

Faculté des bioingénieurs

Simulation de la mobilité cyclable à l'aide d'un modèle multimodal pour Louvain-la-Neuve

Perspectives d'aménagement

Auteur	Barbara Stinglhamber
Promoteurs	Pierre Defourny (ELI)
Lecteurs	Yves Hanin (LOCI) Julien Radoux (ELI)
Année Académique	2019 - 2020

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
Bioingénieur en Sciences et technologies de l'environnement

REMERCIEMENTS

Je remercie avant tout mon promoteur, Pierre Defourny, pour son suivi, sa disponibilité, sa bienveillance, sa ponctualité et son soutien lors de l'élaboration de ce mémoire de fin d'études. Je remercie également les personnes travaillant dans le laboratoire d'Environnement et géomatique, pour leurs conseils lors des pauses café, leur aide quand j'en ai eu besoin et leur écoute à tout instant. Je remercie tout particulièrement Benjamin, Baptiste et Julien, qui ont toujours répondu présent à la moindre question ou blocage que j'ai pu rencontrer.

Je voudrais aussi remercier ma maman, Joëlle Landerwyn, pour les nombreuses relectures et corrections d'orthographe de ce mémoire, mais aussi de tous les autres travaux réalisés au cours de mes études.

Je remercie aussi mon binôme de l'option aménagement du territoire, Camille, sans qui ces deux années auraient été bien tristes. Enfin, je dis un grand merci à mes cokoteurs, de m'avoir supportée et soutenue jusqu'au bout.

Merci.

TABLE DES MATIÈRES

Introduction	1
1 Synthèse bibliographique	3
1 Définitions	3
2 Enquêtes sur la mobilité multimodale	3
3 Modèles de mobilité	5
4 Modèles de mobilité multimodale	8
5 Synthèse	13
2 Objectifs et démarche générale	14
1 Objectifs	14
2 Démarche générale	14
3 Acquisition des données	16
1 Type de données	16
2 Sources de données relatives aux réseaux	17
3 Temps de parcours	18
4 Multimodalité	21
5 Données de population	22
4 Méthodologie	23
1 Temporalité et zone d'étude	23
2 Hypothèses	23
3 Construction des réseaux	26
4 Paramétrisation	27
5 Network Analyst comme outil d'analyse	29
6 Protocole de simulation des propositions d'aménagement	29

5	Validation du modèle	31
1	Validation interne	31
2	Validation externe indépendante	32
3	Métriques de performances	33
4	Validation du réseau cyclable	35
5	Validation du réseau piéton	39
6	Validation du réseau voiture	42
7	Limites	42
6	Aires de chalandise de Louvain-la-Neuve	43
1	Situation de référence	43
2	Situation projetée	47
3	Proposition d'aménagement	53
4	Estimation du report modal	56
7	Circulation locale des vélos	61
1	Introduction	61
2	Accessibilité de la gare de Louvain-la-Neuve	61
3	Les parkings vélos de Louvain-la-Neuve	65
8	Recommandations et conclusions	71
1	Recommandations	72
2	Pistes d'amélioration du modèle	74
3	Perspectives et conclusions	74
	Références bibliographiques	I
	Annexes	VI

TABLE DES FIGURES

2.1	Démarche générale du travail	15
4.1	Points d'arrivée des simulations	25
4.2	Points de paramétrisation	27
5.1	Répartition des points de validation théorique (réseau vélo)	32
5.2	Répartition des points de validation théorique (réseau piéton)	32
5.3	Résultat validation cyclable (distance)	36
5.4	Résultat validation cyclable (temps)	37
5.5	Résultat validation cyclable (temps corrigé)	38
5.6	Résultat validation cyclable (itinéraires UCLouvain)	39
5.7	Résultat validation pédestre (distance)	40
5.8	Résultat validation pédestre (temps)	41
6.2	Aire de chalandise cycliste, situation de référence	44
6.1	Aire de chalandise cyclable, situation de référence	45
6.3	Aire de chalandise cycliste, situation de référence	46
6.4	Schéma de l'aménagement de la sortie 8a prévu, importé sur Google Earth . . .	47
6.5	Schéma du carrefour en diamant prévu au croisement N4/N25 (PCM de Louvain-la-Neuve, 2020)	48
6.6	Aire de chalandise cyclable, situation projetée	50
6.7	Aires de chalandses cycliste et cyclable, situation projetée	51
6.8	Aire de chalandise cycliste, situation projetée	52
6.9	Accessibilité cyclable : situation projetée et VEC	54
6.10	Aire de chalandise vélo avec établissement d'autoroutes cyclables	55
6.11	Différences de temps de trajet en voiture et en vélo (situation de référence) . . .	58
6.12	Différences de temps de trajet en voiture et en vélo (situation projetée)	59

6.13	Différences de temps de trajet en voiture et en vélo (avec autoroutes cyclables) .	60
7.1	Aire de chalandise depuis la gare (situation de référence, 15 min)	62
7.2	Aire de chalandise depuis la gare (aménagement des pénétrantes et VEC, 15 min)	64
7.3	Aire de chalandise des parkings vélos (situation de référence)	67
7.4	Aire de chalandise des parkings vélos (situation projetée)	68
7.5	Aire de chalandise des parkings vélos (proposition d'aménagements)	70

LISTE DES TABLEAUX

3.1	Vitesses suivies sur le réseau belge	18
3.2	Temps imposés aux tournants vers la droite	20
5.1	Résultat de la validation de la distance parcourue (réseau cyclable)	35
5.2	Résultat validation cyclable (temps)	36
5.3	Résultat de la validation du temps de parcours corrigé (réseau cyclable)	37
5.4	Résultat de la validation de la distance parcourue (réseau pédestre)	40
5.5	Résultat de la validation de la durée de trajet (réseau pédestre)	40
6.1	Impact de l'aménagement routier du croisement N4/N25 pour les cyclistes	49
6.2	Population concernée par les aires de chalandise	56
6.3	Population concernée par les aires de chalandise (suite)	57
7.1	Résumé des comparaisons d'itinéraires vers les auditoires Montesquieu	66

À l'heure actuelle, la mobilité évolue vers un nouveau paradigme : une mobilité apaisée, mieux pensée, active et multimodale. La société semble vouloir abandonner plus que jamais le tout à la voiture, diminuer l'empreinte écologique, faire de l'exercice et, en plus, "profiter du voyage". À tout niveau décisionnel, des mesures sont prises en ce sens : la Wallonie ouvre la voie avec la Vision FAST 2030, une vision qui pose des objectifs de parts modales à atteindre d'ici 2030. Plus localement, le Plan de Déplacement d'Entreprise de l'UCLouvain annonçait plus de 170 000 € d'investissement pour le réseau cyclable en 2017.

Malgré la volonté apparente des différents niveaux de pouvoir, les Belges ne semblent pas encore convaincus par le concept de multimodalité : selon les résultats d'une étude réalisée par le bureau d'études Indiville auprès de 1007 Belges : seul un Belge sur six (18 %) y voit une solution, mais ces chiffres augmentent auprès de la nouvelle génération. Ainsi, la moitié des jeunes de 18 à 30 ans interrogés pensent que la mobilité combinée peut aider à résoudre la congestion automobile. La principale raison mentionnée pour expliquer l'usage massif de la voiture par 7 utilisateurs sur 10 est le manque d'alternatives, qui se traduit par un gain de temps à l'utilisation du véhicule personnel.

Cependant, la crise sanitaire du COVID-19 de 2020 pourrait changer les comportements ; les gens sont moins enclins à prendre les transports collectifs tout en cherchant à diminuer leur empreinte écologique. En avril, les ventes de vélos ont doublé par rapport à avril 2019 avec une majorité de vélos électriques vendus (Classique 21, 2020), ceux-ci permettent un compromis idéal entre "véhicule personnel", "conscience écologique" et "effort physique minime". Le cycliste wallon fait une arrivée en force sur les routes de Belgique et c'est aux pouvoirs publics d'accompagner cette transition par l'établissement d'infrastructures qualitatives. Alors, comment savoir quels aménagements privilégier pour offrir la meilleure alternative aux navetteurs ?

Louvain-la-Neuve repose sur un concept rare en Belgique, une ville créée, pensée pour le piéton, ce qui la rend attractive aux autres modes de transport doux. Ainsi, une multitude de modes de mobilité cohabitent à l'entrée de Louvain-la-Neuve. Cette particularité rend la ville intéressante pour l'étude de la mobilité, des mémoires ont déjà été rédigés avec pour but la modélisation des trajets pédestres et cyclables dans Louvain-la-Neuve (Ruyssen, 2006). La ville étant piétonne, les visiteurs ont le choix : venir en voiture, se garer en périphérie et changer de mode de mobilité ; laisser la voiture au domicile et venir directement par des modes de mobilité doux (train, vélo...) ; venir en transport en commun et continuer à pied. Aujourd'hui, avec l'essor des vélos à assistance électrique (VAE) et des trottinettes électriques, l'option multimodale pourrait être adoptée plus facilement et pour de plus grandes distances si la ville s'adaptait à ces modes.

Ces nouveaux modes circulent dans Louvain-la-Neuve en tant que modes "doux" alors que ces derniers sont plus rapides que la vitesse moyenne de marche. L'augmentation du nombre de vélos dans cette ville pensée pour les piétons pourrait faciliter son expansion tout en maintenant sa particularité de ville à taille humaine, mais cette cohabitation amène des conflits entre les modes, particulièrement aux heures de pointe. Ce mémoire étudie les aménagements cyclables dans et autour de Louvain-la-Neuve, dans le but de fournir un outil pour l'analyse des aménagements à améliorer ou à créer afin d'avantager un transfert modal vers le vélo. La ville est un endroit propice pour tester de nouvelles perspectives de mobilité avec sa philosophie de création (désavantager la voiture) et son travail en cours pour une transition vers 2030 qui place la mobilité parmi les priorités.

Ce travail débutera par un aperçu des études effectuées sur la mobilité, la multimodalité et les modélisations s'y rapportant. Cette vision globale des travaux déjà effectués sur le sujet de la mobilité multimodale aboutira, dans un second chapitre, aux objectifs spécifiques de ce mémoire. Le troisième chapitre se consacrera à la délimitation de la zone d'étude (comprenant Louvain-la-Neuve, mais aussi les alentours de celle-ci), aux données nécessaires à la construction du modèle élaboré et aux hypothèses de travail suivies. La méthodologie de modélisation et la validation du modèle seront présentées aux chapitres 4 et 5. Le modèle sera comparé d'une part à un autre générateur d'itinéraires bien connus et, d'autre part, aux itinéraires recommandés par l'UCLouvain. Une fois notre modèle validé, nous l'utiliserons, dans les chapitres 6 et 7 pour étudier l'impact de divers aménagements dans et autour de Louvain-la-Neuve. Notamment l'élaboration d'autoroutes cyclables, l'installation de parkings à vélos ou encore l'accès à la gare RER. Nous terminerons ce travail en montrant l'utilité et la pertinence de notre modèle comme outil d'aide à la décision dans la mise en place d'aménagements favorisant le transfert modal vers le vélo en direction et dans Louvain-la-Neuve.

CHAPITRE 1

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Le présent chapitre développe l'état de l'art concernant la modélisation de la mobilité multimodale. Ce développement débutera par des recherches sur des aspects sociaux de la mobilité multimodale. Ensuite, nous discuterons les différents modèles qui ont été développés pour la mobilité d'une part et pour la mobilité multimodale d'autre part.

1 Définitions

La mobilité multimodale est l'association de plusieurs modes de transport pour se rendre d'une origine à une destination (Van nes, 2002). Cette multimodalité dans la mobilité pourrait être la solution aux embouteillages dans les villes (rtbf, 2019).

2 Enquêtes sur la mobilité multimodale

Clauss *et al.* (2016) ont fait le constat qu'aucune étude n'existait actuellement sur les critères utilisés par la population pour choisir son mode de transport. En conséquence, c'est souvent le critère de l'écologie qui est avancé pour promouvoir la multimodalité et les autres alternatives à la voiture. C'est pourquoi l'article réalisé a eu pour objectif d'identifier les déterminants de la perception concernant les différents modes de déplacement des voyageurs en ville. Autrement dit, les auteurs ont cherché à déterminer quels étaient les critères déterminant le choix d'utiliser ou non la voiture. Il apparaît que les 3 facteurs de choix principaux sont : le rapport praticité/prix, le temps de trajet et la flexibilité. Dans cette continuité, un workshop a été réalisé sur le questionnement suivant : *la ville du futur sera-t-elle multimodale ?* Il ressort de ces discussions entre les acteurs que les facteurs d'attractivité de la mobilité multimodale pour les usagers seraient : la facilité d'usage, la disponibilité, le coût et le confort. Les groupes de discussion s'accordent pour dire que, pour améliorer la mobilité urbaine, les acteurs doivent changer de paradigme. En

effet, la solution ne serait pas de diminuer la mobilité, mais de l'organiser intelligemment ; la mobilité multimodale va devenir la clé à l'accessibilité des centres-villes (Spickermann *et al.*, 2014).

Au-delà des critères de choix d'un mode de transport, la zone de résidence influence également la propension d'un citoyen à choisir un mode de mobilité multimodal plutôt qu'un autre. Klinger (2017) a réalisé une enquête pour déterminer les facteurs influençant les changements de modes de mobilité après un déménagement. Il ressort de cette enquête (réalisée dans 3 villes d'Allemagne) qu'une personne déménageant dans une zone favorisant la mobilité multimodale a plus de chance d'abandonner ses habitudes monomodales qu'une personne déménageant dans une ville ne la favorisant pas.

Louvain-la-Neuve étant une ville universitaire, il serait intéressant de savoir si les facteurs de choix déterminés ci-dessus sont valables pour une population d'étudiants. Mehdizadeha *et al.* (2019) ont étudié le lien qu'il y avait entre le choix du mode de transport que faisaient des étudiants universitaires (en Norvège) et leur intérêt pour l'environnement. Le *Norm Activation Model* (NAM) a été utilisé pour examiner la relation entre :

1. la conscience écologique (la personne est-elle consciente des conséquences de ses choix sur l'environnement ?),
2. le sentiment de responsabilité,
3. les critères pour le choix du mode de transport.

Le NAM est un modèle qui explique le comportement altruiste et respectueux de l'environnement en fonction de paramètres prédéfinis. De cette étude, il ressort que le choix effectué dépend fortement des croyances environnementales des étudiants. Ensuite, l'étude a montré que les étudiants ont plus tendance à utiliser les modes de transport verts de manière exclusive (monomodal) que de manière associative (multimodal). Enfin, les conditions météorologiques sont importantes pour le choix du mode de transport (Mehdizadeha *et al.*, 2019).

L'accessibilité d'une ville améliore son développement (Yatskiv, 2017). Il est donc dans l'intérêt des politiques de gérer la mobilité sur leur territoire. C'est pourquoi Tsirimpa *et al.* (2019) ont traité l'impact des politiques sur les comportements des citoyens concernant les modes de mobilité. Plus particulièrement, le cas d'une politique récompensant la mobilité multimodale a été sondé dans deux villes d'Europe (Viennes et Birmingham). En synthèse de cette enquête,

- la politique examinée augmentait le temps passé dans les transports publics et le temps de marche,

- la politique examinée amenait plus d'utilisation des transports publics que des autres modes doux comme le vélo,
- mais les personnes utilisant une voiture individuelle étaient moins réceptives à ce type de politique.

Le critère de l'écologie est souvent avancé pour promouvoir les modes de transport verts et la multimodalité (Clauss *et al.*, 2016). Il a été démontré que pour une distance équivalente, le trajet associant différents modes de mobilité émet moins de CO₂. Cependant, pour avoir un réel impact sur le bilan carbone, il faudrait limiter la fréquence et la longueur des trajets ; aller vers des villes plus compactes (Heinen *et al.*, 2019).

Un travail réalisé par des étudiants en deuxième Master d'urbanisme à Louvain-la-Neuve (2016) étudiait 3 scénarii de transition de mobilité de Louvain-la-Neuve après avoir examiné les facteurs affectant la mobilité de la ville. Les 3 scénarii développés par les étudiants sont les suivants : ville dense, ville étendue et ville multimodale. Les conclusions de ce travail étaient d'une part que le vélo pouvait constituer une alternative aux déplacements à condition d'être encadré par une réflexion de mobilité globale et, d'autre part, qu'aucun des scénarii traités n'était à privilégier, il fallait plutôt mener un approfondissement sur les objectifs que se fixait la ville.

3 Modèles de mobilité

La simulation est une mise en action d'un modèle qui s'accompagne de l'observation du comportement de ce dernier (Amblard et Phan, 2006).

Les auteurs décomposent l'activité de modélisation comme suit.

- **Définition du système** : Le Moigne (1977) définit un système comme l'ensemble des éléments concernés par une interrogation. Cela implique donc d'être capable d'identifier les éléments qui constituent l'objet de l'étude et de se limiter uniquement à ceux susceptibles de répondre à la question posée.

Une fois la structure interne du système définie, il faut se poser la question du cadre dynamique et spatio-temporel dans lequel la modélisation s'inscrit (Amblard et Phan, 2006).

- Un système dynamique est un système où les changements d'état s'inscrivent de manière relative au temps.
- Un système spatio-temporel est un système dynamique dans lequel les éléments et les processus sont définis relativement à un espace. Les entités possèdent alors des

coordonnées relatives à un repère absolu, les écosystèmes sont de parfaits exemples d'un système spatio-temporel.

- **Formalisation du système** : adopter des paradigmes et les formalismes associés pour construire le modèle du système. Il existe plusieurs hypothèses qui aiguilleront le formalisme du modèle choisi : la notion "temps" est-elle continue ou discrète ? L'espace est-il présent (continu, abstrait) ou absent ?...
- **Simulation et analyse**

Les réseaux de transport sont complexes : multitude de modes de transport, variabilités des conditions d'utilisation, existence d'évènements isolés faisant varier l'utilisation possible du réseau (accidents, embouteillages)... De plus, les données relatives aux transports sont de nature variée, ce qui ne facilite pas leur utilisation.

De manière générale, les modèles multi agents sont la norme quand il s'agit de modélisation de la mobilité (Čertický *et al.*, 2015). Les modèles multi agents ont l'avantage de considérer comme entités individuelles des personnes (et non des voyages comme cela est le cas dans les modèles de demande). La simulation via des modèles multi agents peut servir à valider l'impact de l'usage de systèmes coopératifs (Gueriau *et al.*, 2015), à tester les modifications de comportements suite à l'introduction de nouveaux services de mobilité tels que le covoiturage, etc. L'intérêt de l'utilisation d'un simulateur est de pouvoir définir des scénarii, ce qui est difficilement réalisable en contexte réel. Il s'agit d'une approche centrée sur l'individu qui prédit le comportement de voyageurs en lien avec un environnement complexe, dynamique et ouvert (Badeig *et al.*, 2008 ; Bessghaier *et al.*, 2012). L'idée de Mastio *et al.* (2016), est d'étendre une simulation basée sur des individus, essayant de trouver le meilleur chemin pour leur voyage, afin de simuler une population. Dans certains cas, les agents considérés peuvent être informés de l'état du réseau et décider de modifier leur chemin (Zargayouna *et al.*, 2013). L'intérêt des simulations multi agents est d'intégrer des décisions individuelles dans la masse de la population, cet effet se vérifie si un grand nombre d'agents sont intégrés à la simulation (Mastio *et al.*, 2016).

Il existe plusieurs simulateurs de mobilité des voyageurs dans la littérature :

- Transims (Nagel, Rickert, 2001a) simule des voyages multimodaux et évalue les impacts des changements de politique sur les caractéristiques du trafic
- Miro (Chipeaux *et al.*, 2011) reproduit les dynamiques urbaines d'une ville française et propose un prototype de simulation multi agents capable de tester la planification de scénarii en précisant les comportements des individus ;

- AgentPolis (Jakob *et al.*, 2012) est également une plateforme multi agents pour le transport multimodal et MATSim (Michal, Kai, 2012) est une plate-forme bien connue de micro-simulation de mobilité. Toutefois, les entités mobiles dans MATSim sont passives et leur état est modifié par des modules centraux, ce qui limite sa flexibilité et sa capacité à intégrer de nouveaux types d'agents ;
- Sumo (Behrisch *et al.*, 2011) et Vissim (Fellendorf, Vortisch, 2010) sont des simulateurs microscopiques largement utilisés et principalement axés sur la simulation de trafic ;
- Il existe également des simulateurs tel que Archisim (Doniec *et al.*, 2008) qui décrivent de manière très précise le comportement des conducteurs à l'échelle microscopique.

Les modèles multi agents sont des modèles qui étendent à une population un modèle basé sur des agents (*Agent based model*). Ces modèles servent à recréer les activités d'agents indépendants et, ainsi, prévoir leurs réactions. Pour être précis, il faut déterminer les variables à considérer pour reproduire les comportements des agents et il faut également disposer de données de qualité. Un tel modèle peut simuler les flux de circulation (El-Amine *et al.*, 2017). Amblard et Phan (2006) énoncent 8 conditions auxquelles il serait justifié d'avoir recours à une simulation multi agents :

- Lorsque l'on dispose de la théorie, mais pas de la capacité de prévision analytique de celle-ci. Dans ce cas, la simulation permet de prédire un résultat effectif face à une situation donnée ;
- Lorsque que les interactions impliquées par une théorie sont trop complexes que pour être calculées exactement. La simulation permet de tester différentes approximations du système qui permettront de choisir les simplifications de calculs les plus optimales ;
- Lorsque l'on n'est pas sûr que la théorie explique correctement les phénomènes réels et que les calculs de vérification sont complexes ;
- Si l'on pense que des processus simplificateurs d'un phénomène réel n'altéreront pas les fonctions du phénomène ;
- Si les contraintes générales sur des opérations d'un phénomène réel sont connues, mais que l'on ne dispose pas de théorie ;
- Si l'on dispose de processus et de phénomènes résultants sans connaître de théories explicatives ou de contraintes ;
- Lorsque l'on possède des scénarii typiques de comportements des objets et des processus qui ont des similarités avec ces types de comportements ;
- Lorsque l'on dispose de similarités entre des processus et des scénarii typiques et que l'on voudrait savoir ce que les deux produisent comme phénomènes.

Čertický *et al.* (2015) ont créé un modèle qui considèrerait comme des entités individuelles les activités menées par les personnes. Les auteurs font, en effet, l'hypothèse que la demande de transport vient du besoin d'activités et qu'il serait plus opportun de considérer les activités comme moteurs de mobilité plutôt que les personnes. Une fois les besoins en activités modélisés, un modèle multi agents classique vient dessiner les transports associés. Cette technique ne semble pas amener des résultats différents de la technique multi agents classiques.

Network Analyst (une extension de ArcGIS) est également souvent utilisé. Par exemple par Vandenbulcke *et al.* (2009) qui ont montré l'effet de la congestion sur l'accessibilité en voiture des villes en Belgique. Cette extension est un outil d'analyse spatiale basée sur des réseaux permettant de calculer des temps de parcours, localiser les facilités et résoudre des problèmes liés aux réseaux (esri.com). Cette extension contient un modèle de connectivité permettant de représenter les réseaux de transport. Le modèle permet de créer et de simuler les réseaux multimodaux.

4 Modèles de mobilité multimodale

Traditionnellement, ce sont des données GPS qui sont utilisées pour détecter avec précision les données spatiales de mobilité. Le problème de ce type de données est qu'il entraîne une consommation accrue d'énergie et ne s'adresse qu'à une portion de la population ; les véhicules équipés. C'est pourquoi Asgari *et al.* (2016) ont créé *CT-mapper*, un algorithme qui cartographie les itinéraires multimodaux à partir de données mobiles. Le principe est le suivant ; quand un téléphone se connecte à internet, il envoie un message au réseau pour obtenir la connexion. Ce message contient également l'identifiant du téléphone et sa localisation par rapport à l'antenne relais la plus proche. Une fois le téléphone connecté, un message d'actualisation est envoyé au réseau si le téléphone change d'antenne (se déplace) ou s'il se déconnecte d'internet. Avec les smartphones d'aujourd'hui qui envoient et émettent des données constamment (notamment via les applications et notifications push), la fréquence de localisation est quasi constante. Ce type de données mobiles est appelé *Sparse cellular trajectory data*. Cette technique permet d'obtenir, de manière régulière, un point de localisation de chacun des smartphones connectés au réseau internet sur la zone d'étude. Une fois ces points de localisation obtenus, *CT-Mapper* va les accoler à un réseau de transport (voiture, tram, métro, RER, piéton) et va ensuite rechercher le chemin le plus plausible pour relier les points d'un même smartphone entre eux. L'algorithme agit donc en deux temps. Les résultats de cet algorithme de cartographie des itinéraires se sont révélés plus précis et plus performants que les autres modèles comparés et pourrait également servir à la modélisation des itinéraires en temps réel.

Ambrosino *et al.* (2014) ont également recours à un algorithme en deux temps. Les auteurs ont

créé un modèle qui détermine le plus court chemin entre un point d'origine et de destination. Pour chaque paire origine-destination, le modèle cherche le noeud de mobilité multimodale (point de navettage) qui minimise les coûts associés à un transfert de mode (se garer, attendre le prochain mode...) dont les caractéristiques sont définies en amont par l'utilisateur. Le modèle va chercher ce point de navettage idéal en reliant l'origine à la destination et la destination à l'origine. Ensuite, le chemin le plus court possible reliant les points "origine", "destination" et le noeud "changement modal" précédemment identifié est calculé. En procédant ainsi, le modèle se limite au calcul du plus court chemin parmi ceux passant par les points de navettes optimaux. Cette division en deux étapes permet d'optimiser l'algorithme :

- le modèle détermine tous les trajets possibles et choisit le point de navettage optimal ;
- le modèle détermine le chemin le plus court reliant l'origine et la destination passant par le point de navettage.

Dib *et al.* (2016) ont, quant à eux, élaboré une méthodologie de modélisation en deux étapes de la mobilité multimodale. Dans un premier temps, une modélisation de chaque mode de transport est effectuée, un groupe de modèles concerne les transports publics (tram, bus, métro, train) et un deuxième concerne les transports privés (voiture, vélo, marche). Ensuite, dans un second temps, ces *submodèles* sont intégrés dans un modèle global de mobilité. Une fois cette modélisation effectuée, un algorithme permet de calculer l'itinéraire le plus court en incluant les changements potentiels de mode de déplacement. Pour former un réseau multimodal de mobilité, il faut lier les deux groupes de modèles (privé et public), le lien entre les réseaux privés et publics se fait par le réseau pédestre, il faut donc que chacun des sous-réseaux de mobilité soit connecté au réseau pédestre. Concernant le modèle de la voiture privée, la connexion au réseau pédestre se fait par les parkings. La même logique est appliquée pour les vélos, où le lien se fait via des bornes à vélos et pour les transports publics, où les liens se font dans les arrêts prévus. L'article ne renseigne pas les avantages de cette approche pour la modélisation du réseau de mobilité multimodale.

Lubamba (2012) a conçu un modèle permettant de modéliser la mobilité multimodale à Kisan-gani en ne suivant pas les réseaux viaires. Dans son travail, un modèle de système d'information géographique (SIG) déterminant le chemin optimal a été élaboré. La subtilité de son modèle est que l'algorithme calcule les itinéraires multimodaux de n'importe quel point vers une destination via une topologie matricielle. Contrairement à d'autres études qui calculent les itinéraires d'un point de départ précis (se situant sur un réseau de transport) à une destination sous une topologie vectorielle. Le territoire étudié est divisé en unités primaires, généralement de forme carrée (formant ainsi une matrice). Le problème de cette configuration est que s'il n'y a pas de réseau routier défini, le logiciel ne calcule pas le chemin le plus direct. En effet, la distance séparant deux carrés côte à côte est plus courte que celle séparant deux carrés disposés en

diagonale. Lubamba a innové en définissant l'unité élémentaire de sa grille matricielle sous la forme d'hexagones. Ainsi, la distance séparant deux centres bord à bord est la même, peu importe leur disposition dans l'espace.

Salonen *et al.* (2013) ont comparé, via l'extension SIG *Network Analyst*, 3 méthodes de modélisation des trajets en voiture et en transports publics. L'article distingue :

- le modèle simplifié : qui reprend les limitations de vitesse et le réseau routier ;
- le modèle intermédiaire : qui inclut la congestion ainsi que le temps de transfert simplifié (dans le cas des transports publics) ;
- le modèle avancé : qui intègre une approche porte-à-porte (temps de marche, parking, attente...).

Par cette comparaison, il est montré que plus la méthode est avancée, plus les résultats seront proches de la réalité, mais plus le système exigera des données. Grâce à cette modélisation, l'auteur a pu construire une aire de chalandise de 20 minutes autour d'un point précis de la zone d'étude pour les modes de transport et méthodes de modélisation.

Zargayouna *et al.* (2014) ont conceptualisé une plateforme de voyage qui guide ses utilisateurs en temps réel et propose des itinéraires multimodaux. Les modes pris en compte sont le vélo, la marche, les transports publics, la voiture privée et la voiture partagée. La détermination des itinéraires se fait par l'exécution de l'algorithme A-star (Hart *et al.*, 1968) sur le réseau de transport. Les auteurs utilisent un modèle multi agents, les itinéraires sont calculés en fonction, d'une part de la position de chacun des agents actifs et, d'autre part, des événements survenant sur le réseau pouvant affecter le voyage. Le modèle liste ainsi les agents de son modèle (Zargayouna *et al.*, 2014) ;

- L'agent organisateur : il s'agit de l'agent qui va déterminer l'itinéraire multimodal optimal pour les agents. Il fait le lien entre la plateforme et les agents. Les agents actifs ont une vitesse en fonction des paramètres entrés dans la plateforme. Ils se déplacent selon un trajet indiqué par l'agent organisateur.
- Les conducteurs de voiture : ils ont une origine et une destination (soit spécifiées à l'avance soit choisies au hasard) et demandent à l'agent organisateur le meilleur chemin à suivre. Si un conducteur emmène un passager, celui-ci lègue le contrôle de ses mouvements non plus à l'itinéraire construit par l'agent organisateur, mais à la voiture qui le transporte.
- Les transports publics : ils n'ont ni origine ni destination, mais suivent un trajet prédéfini. Les agents conduisant les transports publics transfèrent leurs horaires à l'agent organisateur.

Comme pour le conducteur de voiture, si un agent voyageur monte dans un transport public, ses mouvements sont déterminés par ceux du transport public.

- Les agents voyageurs : ils ont une origine et une destination, soit spécifiées à l'avance soit choisies au hasard. Ces agents marchent ou se déplacent grâce à d'autres agents.

L'algorithme A^* (*A-star*) permet d'amener un objet d'un point à un autre, le plus rapidement possible tout en évitant les obstacles. Il s'agit d'un des algorithmes de recherche de chemin le plus efficace bien qu'il ne donne pas la solution optimale : il calcule de manière rapide. L'algorithme A^* est itératif : il tente de se rapprocher de la destination en empruntant les chemins les plus directs, mettant les autres possibilités de côté. En agissant ainsi, l'algorithme peut toujours utiliser les chemins moins directs si le premier chemin choisi s'avère erroné. Cette procédure garantit l'obtention d'un résultat.

Anwar *et al.* (2017) ont étudié l'influence de deux politiques sur le choix de mode de transport d'étudiants d'une université d'Australie. La méthodologie de cette étude se décompose en deux étapes ;

1. modélisation des modes actuels sans prendre en compte les politiques (modélisation des services existants) ;
2. modélisations incluant l'une puis l'autre politique afin de déterminer les facteurs influençant le choix du mode de transport et prédire la probabilité de changement d'habitudes pour un changement vers le bus.

Les deux politiques testées sont :

1. un bus toutes les heures allant de l'université au domicile,
2. un service de P+R (Park and Ride) connecté à un service de bus allant jusqu'à l'université.

Pour se faire, une enquête a été envoyée aux employés et étudiants visant à déterminer leurs habitudes de déplacement et les raisons liées à celles-ci, lieu de résidence, temps et longueur (km) de parcours, heure de départ et d'arrivée, lieu de parking... L'étude ne considère pas les piétons qui habitent sur le campus et ne sont donc pas influencés par les politiques choisies. Les vélos sont également ignorés, car représentant une trop petite portion de l'échantillon. Les auteurs ont choisi un modèle de type logit binaire (*Binary Logit Model*), lequel est capable de représenter des décisions individuelles en fonction de paramètres prédéfinis. Ce modèle va déterminer le choix d'individus via le calcul d'une utilité ou d'une attractivité relative. Dans cette étude, les variables estimées comme pertinentes sont : la longueur du voyage, le temps de navettage, la fréquence, la possession d'un permis de conduire, le genre, le statut (étudiant ou employé), l'âge et la volonté de payer pour les nouveaux services proposés (Anwar *et al.*, 2017).

Codecà *et al.* (2017) ont effectué un travail préliminaire sur la création d'un scénario de mobilité urbaine incluant les usagers faibles sur la Principauté de Monaco (Monaco Simulator of urban mobility trafic, MoST). Au cours de ce travail, les auteurs ont également réalisé une analyse des exigences liées à cette modélisation. Monaco étant une ville côtière installée sur une pente forte, le réseau de mobilité est composé de nombreux tunnels ce qui la qualifie de ville à étages. Cette configuration sur plusieurs niveaux complique la modélisation : le réseau arcs/noeuds à tendance à créer des noeuds sur des intersections qui n'en sont pas réellement à cause de cette hauteur de voirie (Codecà *et al.*, 2017).

Zheng et Geroliminis (2013) ont démontré que l'espace disponible sur les voiries peut être géré afin d'améliorer l'accessibilité des voyageurs. Leur étude se penche sur les bus et les voitures uniquement en utilisant un *Multimodal Fundamental Diagram* (MFD). Il s'agit d'un diagramme sur les dynamiques du trafic d'un système de transport multimodal. Les chercheurs basent leur recherche sur les résultats de Chen *et al.* (2005) qui montrent que les véhicules à haute densité de voyageurs (bus, voitures partagées...) ont une emprise moindre au sol en comparaison aux véhicules de faible densité de voyageurs (comme les voitures individuelles). L'idée de Zheng et Geroliminis est qu'en réservant des voiries à certains modes de transport à des périodes définies, il est possible de :

1. diminuer le temps de trajet des voyageurs,
2. diminuer la congestion.

Le modèle présenté annonce une diminution des embouteillages et une baisse de 50 % de l'utilisation de la voiture individuelle durant les heures de pointe. Les résultats montrent aussi que le prix du mode influence fortement la demande en transport.

Bielli *et al.* (2005) partent du constat que les modules de planification de voyages sont la clé pour augmenter la qualité des services de transport proposés et pour augmenter l'investissement qui encourage les voyageurs à effectuer des transferts modaux vers les transports en commun, dans le but de diminuer la congestion. Leur étude vise à décrire un système de voyage multimodal pour les transports de densification (bus et voitures partagées par exemple) afin de fournir aux passagers des informations complètes sur ces services et permettre de calculer le cheminement multimodal viable le plus court. Les chercheurs utilisent l'opérateur *path View*, lequel utilise les informations de chemin partiel précalculées pour élaguer l'espace de recherche lors du calcul d'un chemin de coût minimum. Par coût minimal, il faut considérer le nombre de transferts. En effet, les voyageurs acceptent une longueur plus grande s'ils peuvent diminuer le nombre de modes empruntés (Blom, 1982). Mais également la distance à pied, puisque les recherches s'accordent pour dire que le facteur "distance" est plus important que le facteur "accès" (Krygsman *et al.*,

2004) et que la marche est fonction des caractéristiques individuelles et des caractéristiques du paysage (Frank and Pivo, 1994). Le modèle vectoriel utilisé distingue deux types d'arcs :

- les arcs de transfert d'un mode à l'autre,
- les arcs de voyage qui connectent deux noeuds par un seul mode de transport.

Les chercheurs concluent que cette méthode apporte une bonne estimation du temps de transport total à condition que les temps de transfert soient établis sur des données réelles (Bielli *et al.*, 2005).

5 Synthèse

Cette revue de la littérature a montré que les modèles de mobilité multimodale sont relativement bien étoffés avec des méthodologies développées en plusieurs étapes pour augmenter la performance des modèles et des algorithmes. Nous remarquons que la plupart des modèles créés servent au calcul d'itinéraires plutôt qu'à la modélisation de la mobilité actuelle dans son ensemble (tous les itinéraires suivis dans les faits). Pourtant, ce deuxième cas de figure permettrait de traduire l'effet de nouveaux tracés de route, de politiques ou d'actions locales sur les itinéraires suivis et les modes de mobilité utilisés. Nous avons également remarqué certaines études dont les méthodologies pourraient s'appliquer à la zone d'étude de Louvain-la-Neuve.

L'apport de ce mémoire à l'état de l'art présenté ci-devant sera la réalisation d'une modélisation de la mobilité multimodale à l'échelle de Louvain-la-Neuve et ce dans le but de proposer des aménagements de circulation cyclable. Pour ce faire, nous prêterons attention aux conclusions pouvant se montrer pertinentes pour nos recherches : la méthodologie, les programmes et algorithmes utilisés, les facteurs influençant les choix, les difficultés liées à l'étude d'une ville en plusieurs niveaux, les solutions dans le cas où les chemins tracés ne sont pas suivis...

CHAPITRE 2

OBJECTIFS ET DÉMARCHE GÉNÉRALE

1 Objectifs

L'objectif général de ce mémoire est de développer un modèle de simulation numérique de mobilité multimodale afin d'évaluer l'accessibilité et de proposer des aménagements de circulation cyclable vers et dans Louvain-la-Neuve. Afin de proposer des aménagements utiles aux utilisateurs, notre modèle tentera de se rapprocher au maximum de l'utilisation effective des réseaux par les usagers. Améliorer l'accessibilité et la circulation au sein de la ville par les modes actifs permettrait de diminuer l'emprise de la voiture individuelle sur les routes d'accès et influencerait positivement la congestion automobile actuelle qui limite Louvain-la-Neuve (Van Peel, 2018). La portée de ce travail concerne la ville de Louvain-la-Neuve, mais pourrait s'exporter à d'autres villes cherchant à améliorer leur accessibilité et à diminuer les embouteillages aux entrées et sorties de leur territoire.

2 Démarche générale

Ce mémoire tentera de répondre à cet objectif général via la démarche présentée à la figure 2.1 qui se compose de 3 objectifs spécifiques : (i) élaborer et valider un modèle multimodal, (ii) évaluer le potentiel de transfert modal de la voiture vers le vélo électrique et (iii) formuler des recommandations pour des aménagements favorisant les modes actifs.

Deux réseaux viaires différents ont été fusionnés (laboratoire d'Environnement et Géomatique, 2006 et 2013) et mis à jour via Open Street Map (2017), formant le réseau utilisé pour ce mémoire. La paramétrisation de celui-ci comprend la création d'une table de tournants (représentant le coût de traversée d'une jonction entre deux axes), l'attribution d'impédances sur

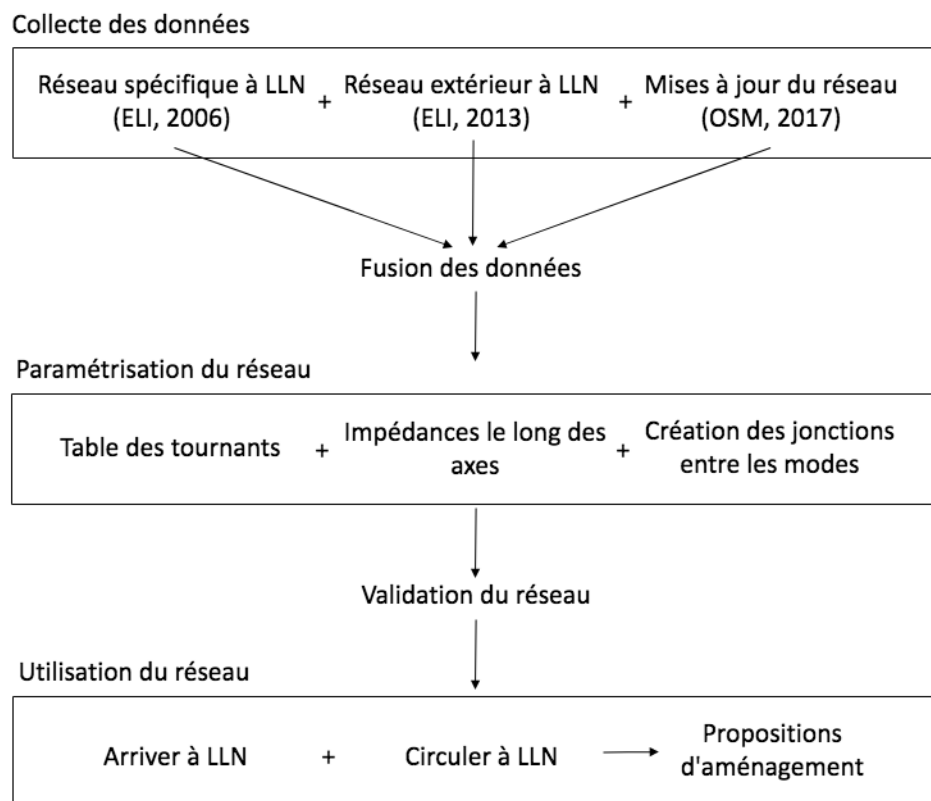


FIGURE 2.1 – Démarche générale du travail

les axes du réseau (qui représentera le coût de traversée des axes) et l’encodage des zones de jonctions entre les modes de mobilité. Le réseau sera validé par comparaison d’itinéraires aléatoires générés par Google maps et par le modèle, afin d’assurer le bien-fondé des résultats obtenus.

Le réseau créé et validé servira à la simulation de la mobilité cyclable vers et dans Louvain-la-Neuve en situation (i) de référence (correspond au réseau actuel), (ii) projetée (désigne le réseau tel qu’il le sera quand les projets d’aménagements prévus à ce jour seront terminés) et (iii) avec intégrations de nouvelles propositions d’aménagement. Pour chaque situation, l’utilisation du réseau aboutira à deux types de résultats :

- Arriver à Louvain-la-Neuve : les simulations étudieront l’impact d’aménagements sur l’accessibilité à Louvain-la-Neuve pour trois types de public : actif, étudiantin et employé par l’UCLouvain (sur site LLN). Les résultats de l’étude à cette échelle seront des aires de chalandises maximales ainsi que des zones au sein desquelles un transfert modal de la voiture vers le vélo pourrait être accepté par les navetteurs.
- Circuler dans Louvain-la-Neuve : à cette échelle, nous étudierons les trajets multimodaux vélo/train depuis Louvain-la-Neuve ainsi que le parage de vélos dans la Ville. Les simulations effectuées généreront l’aire de chalandise de la gare de Louvain-la-Neuve et l’aire de chalandise des parkings à vélos de la Ville.

CHAPITRE 3

ACQUISITION DES DONNÉES

L'approche multimodale de la démarche de modélisation requiert l'articulation cohérente de plusieurs réseaux de transports. Cela nécessite, en outre, d'identifier les points de changements de mode et de les paramétrer.

Un réseau viaire aussi complet et détaillé que possible est souhaitable pour l'étude des trajets domicile/Louvain-la-Neuve. Deux sources de données du laboratoire d'Environnement et Géomatique (Earth and Life Institute) de l'UCLouvain ont été combinées afin d'assurer la complétude du réseau. La ville de Louvain-la-Neuve étant en constante évolution, une vérification a été effectuée par comparaison avec Open Street Map, permettant d'ajouter certains axes en particulier des sentiers et pistes cyclables.

Ce chapitre détaille les sources et le type de données utilisées, ainsi que la logique appliquée pour représenter le temps nécessaire aux parcours sur le réseau considéré : vitesses moyennes, temps de changement de direction, temps de changement de mode et temporalité.

1 Type de données

Le réseau de transport possède une topologie arc/noeud et est orienté selon le sens de circulation. Cette topologie signifie que chaque axe routier est constitué d'un arc linéaire dont les extrémités (carrefour ou fin de voirie) sont définies par des points, appelés noeuds.

Chaque élément ou tronçon du réseau est décrit par une liste d'attributs comprenant :

- l'identifiant de l'arc,
- l'identifiant du noeud en début et en fin d'arc,

- la catégorie de la voirie (autoroute, route nationale, route régionale, route locale, sentiers, pistes cyclables...),
- l'accessibilité aux différents modes de transport,
- le sens de circulation de la voirie,
- la longueur de l'axe,
- la vitesse de circulation sur l'axe (ou impédance),
- le temps nécessaire au parcours de l'axe dans chaque sens.

Chaque mode de transport, en raison de leurs attributs différents, aura son propre réseau. Cela permettra notamment d'adapter la vitesse de circulation sur les axes. Le détail des tables d'attributs de chaque réseau tel que représenté dans le logiciel ArcGIS Extension Network Analyst version XX qui est utilisé pour notre modèle, se trouve de l'Annexe 2 à l'Annexe 6.

2 Sources de données relatives aux réseaux

Dans le cadre de son mémoire "Modélisation par S.I.G des réseaux de communication de Louvain-la-Neuve pour l'analyse d'une mobilité multimodale", Ruyssen (2006) a élaboré un réseau complet de la Ville. Ce réseau multimodal est doté d'une topologie validée et de l'emplacement des parkings de la Ville.

L'analyse de ce réseau de 2006 indique qu'il convient d'ajouter les voiries extérieures à la Ville de Louvain-la-Neuve. Un réseau datant de 2013 mis à disposition par le laboratoire d'Environnement et Géomatique comprend les axes, leurs connexions, leur hiérarchie ainsi que les vitesses limites autorisées. Cependant, ce réseau ne comprend pas les sentiers pédestres et/ou accessibles à vélo ni les pistes cyclables situées le long des voiries automobiles, ajoutés grâce à l'inventaire établi par Open street Map.

Open street Map est un projet cartographique collaboratif gratuit lancé en 2004. Ce réseau possède également une topologie arc/noeud à laquelle s'ajoute un attribut "relation", utilisé pour représenter la relation entre les nœuds et les voies existantes (Mocnik *et al.*, 2017). Les données Open Street Map ont déjà été utilisées dans des études scientifiques (Ibisch *et. al*, 2016) et font l'objet d'une mise à jour continue sur base volontaire.

3 Temps de parcours

Trois réseaux distincts sont construits pour correspondre au temps de déplacement de chaque mode (piéton, vélo et voiture).

3.1 Vitesse le long des axes

3.1.1 Mode vélo

Un vélo à assistance électrique est limité à maximum 25 km/h, permet de rouler plus vite qu'en vélo "classique" dont la vitesse varie entre 16 et 20 km/h (ravel.wallonie.be) et diminue l'effort requis dans les côtes ; l'impact des pentes sera dès lors négligé dans ce travail. Certains vélos électriques permettent d'être plus rapide, mais nécessitent une immatriculation et un permis de conduire. Afin d'intégrer toutes les variations de vitesses survenant sur un trajet, la vitesse moyenne des vélos électrique est fixée à 19 km/h dans ce travail.

3.1.2 Mode piéton

La vitesse moyenne d'un piéton est de l'ordre du mètre par seconde soit 3,6 km/h (Jourjon, 2012). Cette vitesse diminue lors des côtes et augmente dans les descentes. Ruysen (2006) a estimé cette variation de l'allure du pas en fonction du pourcentage de pente. La validation de cette estimation a été faite par des essais sur le terrain. Dans ce travail, le voyageur est considéré piéton uniquement après avoir garé sa voiture ou son vélo dans un parking. Ce voyage étant relativement court par rapport à la durée totale du voyage en voiture (ou en vélo), l'influence de la pente sera négligée.

3.1.3 Mode voiture

La limitation réglementaire de vitesse de chaque axe routier est déjà encodée dans la base de données fournie. Néanmoins, il y a une différence entre la limite de vitesse d'une voirie et la vitesse réelle. Afin de tenir compte de cette différence, la vitesse considérée sur les voiries du réseau automobile de ce mémoire sera celle suivie par 85% des automobilistes (V85) sur le réseau belge entre les années 2003 et 2015 (tableau 3.1).

TABLE 3.1 – Vitesses suivies par 85% des automobilistes sur le réseau belge entre 2003 et 2015 (vias, 2007 ; bivv, 2015)

Vitesse limite (km/h)	V85 (km/h)
30	37,5
50	61,93
70	86
90	106,18
120	136,43

3.2 Table de tournants

Lors de tout trajet, il y a une perte de vitesse non négligeable liée aux changements de direction et croisements. Ce chapitre détaille comment cette variation de vitesse a été prise en compte dans le modèle.

L'option -tournants globaux- incluse dans Network Analyst permet d'établir des règles de tournants en fonction de la hiérarchie des voiries, évitant l'encodage de chaque tournant de manière itérative. Le menu de tournants globaux ne permettant que 3 types de voiries différentes, cela limite un encodage affiné des temps aux tournants, d'autant plus que les voiries présentes sur le réseau ont des limitations de vitesse allant de 30 à 120 km/h et comprennent des zones piétonnes.

3.2.1 Mode vélo

Les voiries sont classées de la manière suivante pour les cyclistes :

- Voiries principales : routes dont la limitation de vitesse s'étend de 90 à 120 km/h
- Voiries secondaires : routes dont la limitation de vitesse s'étend de 30 à 70 km/h
- Voiries locales : zones piétonnes et pistes cyclables.

Les voiries locales sont considérées comme des zones où le cycliste circule en site propre, ce qui permet de n'imputer aucune pénalité temporelle à ces tournants. En dehors de ces zones, trois types de tournants sont distingués :

- tournant vers la droite : une contrainte de 15 secondes a été imputée sur ces tournants, prenant en compte le temps moyen de ralentissement à l'arrivée du tournant, d'attente pour l'insertion dans le trafic (le reste de voiries n'étant pas des sites propres) et d'accélération ;
- tournant vers la gauche : la différence entre un tournant vers la gauche et vers la droite est la nécessité de traverser une bande de circulation supplémentaire. Considérant le temps moyen nécessaire à l'attente d'un passage dans la circulation et de traversée de la route, un temps moyen de 30 secondes a été imputé à ces tournants. La traversée rectiligne d'un carrefour est considérée comme un tournant vers la gauche puisque la contrainte est la même ;
- demi-tour : un temps de 30 secondes est imputé pour effectuer un demi-tour.

3.2.2 Mode piéton

Le mode piéton n'est considéré dans ce travail que sur le piétonnier (site propre) et pour relier les parkings malins à ce dernier ; aucun temps supplémentaire aux tournants n'a été imposé aux axes piétons du modèle puisqu'il est prioritaire sur la zone étudiée.

3.2.3 Mode voiture

L'option -tournants globaux- de Network Analyst ne permettant de considérer que 3 classes de voiries différentes, l'ensemble des tournants reliant des axes limités à 120 km/h avec des axes limités à 90 et 70 km/h a été encodé via des -entités tournants-. Ceux-ci ne seront pas couverts par les règles de -tournants globaux-. La classification des voiries dans le menu -tournants globaux- est donc la suivante :

- voiries principales : routes limitées à 70, 90 et 120 km/h (les tournants entre ces trois types de voiries étant soumis à une table de tournants spécifiques regroupant 785 tournants),
- voiries secondaires : routes limitées à 50 km/h,
- voiries locales : routes limitées à 30 km/h et moins (accès parkings).

À titre d'exemple, les impédances imposées entre chaque classe de tournant vers la droite sont détaillées au tableau 3.2. Pour les tournants vers la gauche, l'impédance vers la droite a été doublée (afin de représenter le temps nécessaire à la traversée d'une bande de circulation supplémentaire).

TABLE 3.2 – Temps (en secondes) aux tournants vers la droite selon la vitesse d'entrée et de sortie de tournant (Ruyssen, 2006)

origine \ destination	120 km/h	90 km/h	70 km/h	50 km/h	30 km/h
120 km/h	0	10	10	/	/
90 km/h	40	0	10	15	15
70 km/h	40	20	0	15	15
50 km/h	/	40	20	0	15
30 km/h	/	80	60	40	20

3.2.4 Cas particuliers

Certains tournants sont impossibles lors de la circulation : voiries à sens unique ou contresens de chaussée. Cet aspect est ajouté via une impédance de -1, ce qui est considéré comme un tournant interdit dans le modèle.

4 Multimodalité

Les changements de modes de transport constituent une source de perte de temps qui correspond à différentes étapes : trouver une place de parking, manœuvrer, quitter sa voiture ou attacher son vélo...

4.1 Jonctions entre les modes

Louvain-la-Neuve a la particularité de séparer complètement les modes actifs des modes motorisés : la circulation automobile se fait au moyen de pénétrantes aboutissant à une rocade sous une dalle piétonne. Une personne souhaitant se rendre sur la dalle devra se garer dans un parking avant de continuer à pied. La ville compte 86 parkings (dont 24 sont sous la dalle piétonne). Les places de parking sur voiries étant gratuites pour les personnes munies de la carte riverain, elles sont souvent occupées et ne sont donc pas considérées dans ce travail. Les seules jonctions entre le mode voiture et le mode piéton se feront via les parkings.

4.2 Temps de changement de mode

Les jonctions entre modes ne se font que sur le territoire de Louvain-la-Neuve, les données relatives au temps de changement de modes de Ruysen (2006), déterminées *in situ*, ont été reprises. Il a été encodé un temps de 87 secondes lorsque les parkings se trouvaient sous la dalle et 25 secondes dans le cas de parkings à ciel ouvert. Ces temps datant de 2006 sont sans doute relativement optimistes si on considère l'occupation massive et le processus de mutualisation de certains parkings aujourd'hui.

4.3 Composante verticale du modèle

La ville sépare les modes actifs des modes motorisés sur des étages distincts. Cet aspect est intégré aux réseaux par un attribut d'élévation allant de +1 (passerelles piétonnes) à -1 (rocade automobile passant sous la dalle piétonne). Cette élévation permet de signifier à Network Analyst que des arcs se croisant ne seront pas connectés s'ils ne se trouvent pas au même étage de la Ville.

5 Données de population

5.1 Population

Le modèle cherchant à reproduire les trajets domicile-travail vers Louvain-la-Neuve aux heures de pointe, la population considérée est divisée en deux tranches d'âges : la population estudiantine, de 20 à 24 ans, et la population active, de 25 à 64 ans. Les données de population proviennent de StatBel à l'échelle communale (StatBel, 2019).

Les données de population totale sont définies sur base des secteurs statistiques de 2019.

Une entité (commune ou secteur statistique) sera considérée dans l'aire de chalandise si au moins la moitié de sa surface y est contenue. Cette procédure considère qu'une compensation s'effectue entre les entités situées en bordure d'aire de chalandise, certaines étant incluses à la population considérée et d'autres non.

5.2 Employés de l'UCLouvain

L'Université étant un acteur principal de Louvain-la-Neuve, les données concernant ses employés sur le site de la ville sont également analysées, ces données (fournies par les ressources humaines de l'UCLouvain, 2019) sont basées sur les anciennes communes et, comme pour les données de population, nous considérons qu'une compensation s'effectue entre les entités situées en bordure d'aire de chalandise.

Les grandes étapes décrites dans ce chapitre s'organisent comme suit : délimitation de la zone d'étude, mise en place d'hypothèses, construction du réseau (correction, vérification de la topologie), utilisation du réseau (plus précisément, une description de l'outil d'analyse utilisé dans ce travail) et protocole d'étude suivi.

1 Temporalité et zone d'étude

Čertický *et al.* (2015) affirment que ce sont les activités de la population qui sont sources de mobilité, Louvain-la-Neuve étant un pôle universitaire et économique, de nombreux étudiants et travailleurs s'y rendent chaque jour. Ces déplacements durent au maximum 1h pour 70 % des Belges (sdworxs, 2018), sont concentrés aux heures de pointe et génèrent de la congestion lorsque réalisés en voiture comme c'est le cas pour 54 % des employés de l'UCLouvain sur le site de Louvain-la-Neuve (Plan de Déplacement d'Entreprise de l'UCLouvain, 2017). La zone d'étude est définie par l'aire de chalandise de Louvain-la-Neuve pour une mobilité dans le cadre des déplacements domicile-travail de 1h maximum aux heures de points (Annexe 1 pour la liste des 51 communes concernées).

2 Hypothèses

La modélisation consiste à représenter la réalité sous la forme d'un programme informatique afin de tester l'impact d'hypothèses sur cette représentation de la réalité. Un bon modèle fera la juste balance entre les simplifications de la réalité et la représentation des aspects pertinents face à la question posée.

Les hypothèses simplificatrices prises dans le cadre de ce travail sont les suivantes :

- Le vélo se gare par défaut devant le bâtiment de destination.
- Les voitures se garent uniquement dans les parkings, comme c'est le plus fréquent à Louvain-la-Neuve : nous faisons l'hypothèse que les places en voirie sont occupées par les résidents. Cette hypothèse permet d'encoder les zones de jonctions entre le mode voiture et le mode piéton.
- Les personnes ne se déplacent à pied à Louvain-la-Neuve qu'une fois leur voiture ou vélo garé, limitant l'étendue du réseau piéton du modèle.
- La dalle n'est jamais accessible aux véhicules motorisés : en temps normal, les véhicules peuvent accéder à la dalle via des barrières d'entrée entre 6h et 10h du lundi au samedi à titre professionnel et exceptionnel. Ne considérant que les véhicules personnels dans ce mémoire, nous pouvons définir la dalle comme inaccessible au mode "voiture".
- Le vélo à assistance électrique roule à une vitesse moyenne de 19 km/h, laquelle est constante, peu importe les divers obstacles à effets ralentisseurs présents sur le réseau (pente, feux de signalisation, casse-vitesses, passages pour piétons, revêtement de voirie). Nous renforçons cette hypothèse en rappelant que le ralentissement (ou accélération) dû aux pentes est fonction de la puissance du moteur du vélo, de la forme physique du cycliste et d'autres caractéristiques subjectives. L'intégrer demanderait la description du profil de navetteur qui n'apporterait aucune plus-value à ce travail dont le but est d'obtenir une aire de chalandise réaliste.
- Le piéton marche à une vitesse de 3,6 km/h, certes plus lent que la vitesse moyenne du mode piéton dans Google maps (4,5 km/h), mais intégrant les obstacles à effet ralentisseurs présent sur le réseau (pente, feux de signalisation, passages pour piétons ainsi que revêtement de voirie) pour se rapprocher aussi près que possible des situations réelles.
- Les automobilistes roulent à la vitesse suivie par 85 % des Belges entre 2007 et 2015.
- Points d'arrivée des calculs d'aires de chalandise : il s'agit de points choisis en fonction de leur attractivité pour le public visé (étudiants et personnel universitaire), de leur accessibilité en voiture et de leur répartition sur le territoire. Les 3 points d'arrivée des aires de chalandises abordées dans ce travail sont (figure 4.1) :
 - Place de l'université : point central de Louvain-la-Neuve, proche de la gare et des halles universitaires, il s'agit d'un pôle attractif, y compris commercial (Esplanade),
 - Place des Sciences : place importante pour le haut de la ville, il s'agit d'un pôle culturel (ferme du Biéreau, musée L, médiathèque) peu accessible en voiture (parking sous-terrain, du Sud ou malin), mais attractif pour les publics étudiants et employés de l'UCLouvain ;

- Place de Coubertin : place à proximité des bâtiments universitaires de l'Hocaille et du centre sportif du Blocry, assez décentralisés (19 min à pied de la gare SNCB) et dont les publics sont étudiants et sportifs.

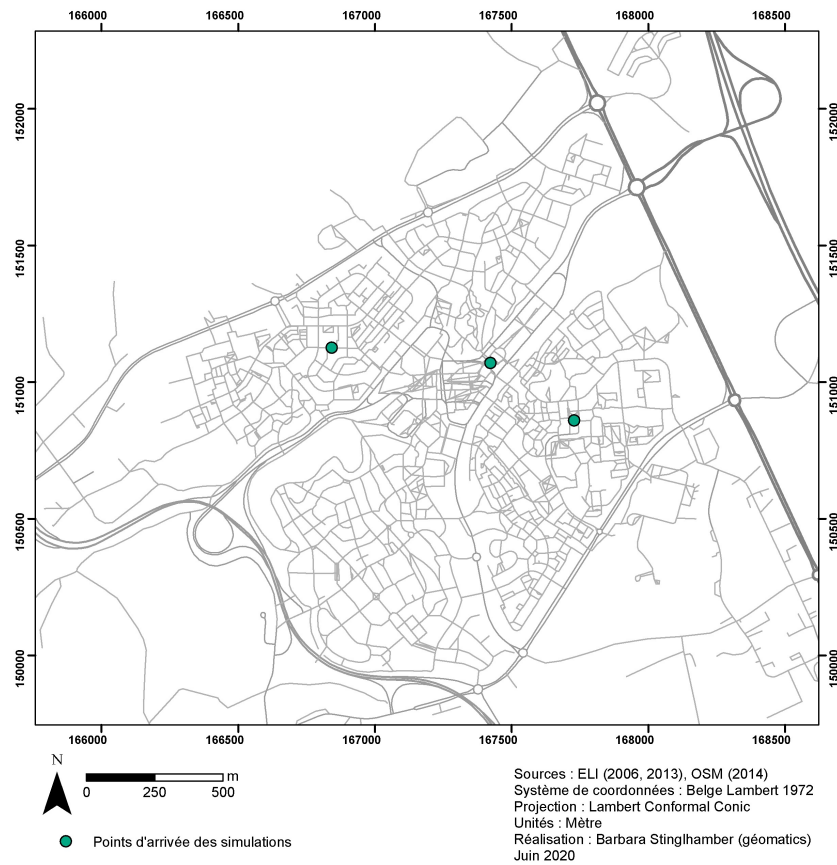


FIGURE 4.1 – Points d'arrivée des simulations

3 Construction des réseaux

Les jeux de données réseau sont bien adaptés à la modélisation des réseaux de transport. Ils sont créés à partir d'entités sources, pouvant comprendre des entités simples (lignes et points), des tournants, mais aussi des restrictions (comme les sens interdits) ou des préférences (comme les pistes cyclables pour les vélos ou les passages pour piétons pour les marcheurs). Les topologies des réseaux permettent de stocker la connectivité des entités sources.

3.1 Mises à jour et corrections

3 réseaux distincts ont été associés avec le programme ArcMap, permettant de corriger et/ou d'ajouter des arcs et des noeuds manuellement. Les principales mises à jour et corrections apportées concernaient les jointures des différents réseaux utilisés et la création d'axes manquants.

3.2 Création de la topologie

La topologie d'un réseau définit la manière dont les entités du réseau se lient entre elles ainsi que la hiérarchie pouvant exister. L'extension Analyste Réseau dans ArcGIS permet de créer et de valider une topologie incluant les aspects suivants :

- stockage des entités simples, règles de topologie, coordonnées topologiques intégrées entre les entités ayant une géométrie partagée ;
- affichage des relations, erreurs et exceptions topologiques, mais également mises à jour de ces données ;
- outils de géotraitement permettant la création, l'analyse, la gestion et la validation de topologie.

Pour vérifier une topologie, le module Analyste Réseau analyse la position des coordonnées des sommets des entités étudiées et permet une valeur de tolérance ("*snapping tolerance*") en dessous de laquelle deux sommets non coïncidants seront automatiquement fusionnés.

D'autres règles de topologie peuvent être intégrées à l'analyse des coordonnées des sommets : interdiction pour une entité d'être subdivisée en deux, interdiction de superposition, interdiction de cul-de-sac... Le module Analyste Réseau permet également d'indiquer les "exceptions" dans la topologie.

4 Paramétrisation

La paramétrisation du réseau vélo a été réalisée par 22 interviews de navetteurs réguliers se rendant sur Louvain-la-Neuve pour le travail et 30 itinéraires recommandés par l'UCLouvain (figure 4.2). Le détail des réponses de chaque personne interviewée se trouve en Annexe 8

De manière générale, les personnes interviewées ne suivent pas le même trajet que celui simulé (ni même celui proposé par Google maps) pour les principales raisons suivantes :

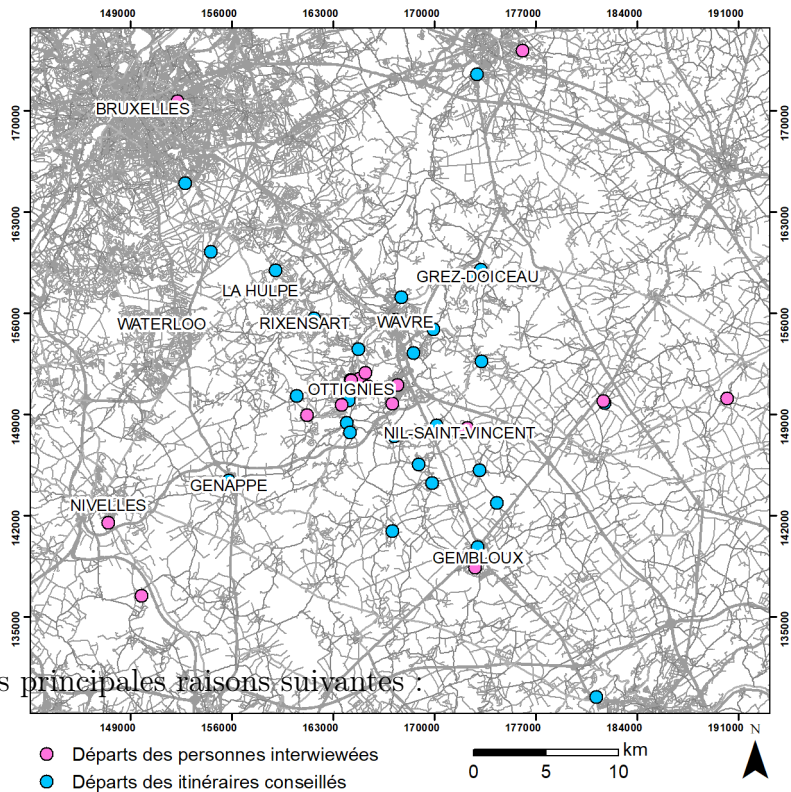


FIGURE 4.2 – Points de paramétrisation

- Moins de dénivelés, cet argument est souvent considéré comme plus important que la distance parcourue.
- Éviter les routes fréquentées par les voitures, surtout aux heures de pointe (certains signalent les emprunter quand les "petits chemins sont boueux") : sentiment de sécurité, route agréable et tranquille, présence de la nature.
- Minimiser le nombre de tournants (en particulier les ronds-points, soulignés comme peu adaptés aux vélos)

La durée de trajet des interviewés varie énormément (points de départ forts différents) : de quelques minutes à plus de 1h30 (pour Bruxelles et Leuven). Les vélos utilisés varient aussi : vélos à assistance électrique, vélos électriques pliables, vélos de ville, vélos de course, VTT et pécledcs. Malgré ces différences de matériel, les personnes interrogées ont toutes signalé un ralentissement dans le piétonnier dû à la densité de piétons.

En comparant les itinéraires vécus et modélisés, nous remarquons que le modèle :

- préfère rester sur les grands-routes en dehors des villes (là où les usagers préfèrent les petits chemins pour croiser moins de voitures et rouler plus vite),
- emprunte des petits chemins en Ville (petit sentier le long du lac souvent utilisé en provenance d'Ottignies) alors que les usagers ne les empruntent jamais en vélo : certains passant pas les grandes voies plus larges, permettant plus facilement de doubler des piétons et d'autre privilégiant un itinéraire plus plat.

Suite à ces observations, une préférence pour les chemins de type "sentiers" et "RAVeL" a été ajoutée au calcul d'itinéraires, donnant des résultats plus proches de l'utilisation réelle du réseau. Un changement de vitesse moyenne a également été réalisé dans les rues du piétonnier de Louvain-la-Neuve, passant de 19 à 10 km/h pour le mode vélo.

Certaines personnes interrogées se rendaient à Louvain-la-Neuve en vélo à assistance électrique, leur témoignage nous a permis de paramétrer les vitesses imputées au réseau cyclable : les RAVeL, adaptés aux cyclistes, sont des routes où il est possible de rouler plus vite que sur le reste du réseau. Nous avons donc modifié la vitesse moyenne sur les RAVeL passant de 19 à 23,5 km/h.

L'UCLouvain propose sur son site internet une trentaine d'itinéraires en direction de Louvain-la-Neuve. Ceux-ci renseignent le dénivelé le long du parcours ainsi que sa longueur. Chacun des parcours conseillés (datant de 2012) a été simulé par notre modèle et comparé avec les tracés recommandés. Une première comparaison permet la conclusion suivante : les itinéraires conseillés évitent systématiquement la nationale 4 malgré que celle-ci dispose d'une piste cyclable. Les interviews confirmant cette observation, une règle de préférence a été ajoutée au modèle, interdisant le passage par cette nationale.

La paramétrisation par interviews nous a permis d'adapter les vitesses moyennes et les préférences des types de voiries sur le réseau.

5 Network Analyst comme outil d'analyse

L'extension Network Analyst dans ArcGIS fournit des outils d'analyse spatiale basés sur le réseau pour résoudre des problèmes de routage complexe, il a de nombreuses fonctionnalités : trois seront principalement utilisées dans ce travail.

5.1 Choix du plus court chemin

La validation du modèle s'effectuera par comparaison d'itinéraires minimisant l'impédance encodée.

5.2 Détermination d'aire de chalandise

L'aire de chalandise est définie, ici, comme la zone de desserte d'où il est possible de démarrer un trajet correspondant à une impédance fixée vers Louvain-la-Neuve. Cette fonctionnalité est d'intérêt majeur pour ce travail et permet d'établir une aire calculée sur base des éléments suivants :

- Variable à minimiser : impédance (ici le temps de parcours)
- Point(s) de départ ou d'arrivée
- Date et heure de déplacement (optionnel) : permet, si le modèle intègre ces informations, d'intégrer la congestion aux heures de pointe.

5.3 Considération de la multimodalité

Dans le cadre d'un modèle multimodal, il convient, via des groupes de connectivité, de lier entre elles les entités sources de réseaux différents. Cela permet d'accorder l'accès à plusieurs réseaux pour un même mode de transport : si le réseau RAVeL et Pistes cyclables sont regroupés sous le même groupe de connectivité, le mode associé à ce groupe de connectivité (ici le vélo) pourra circuler sur ces deux réseaux sans contrainte. Des groupes de connectivités différents peuvent se connecter entre eux via des jonctions (lieux de changements modaux comme les parkings). Pour ce faire, il s'agit d'associer les jonctions aux différents groupes de connectivités ayant accès au lieu de changement modal.

6 Protocole de simulation des propositions d'aménagement

Cette section détaille la méthodologie de scénarii suivie pour les propositions d'aménagements avancées au terme de ce mémoire (Chapitre 2 - Objectifs et démarche générale). Notre modèle étudie l'utilisation du vélo dans le cadre de trajet domicile-travail, les propositions d'aménagement

simulées sont : création de larges pistes cyclables permettant une augmentation de la vitesse moyenne (autoroutes cyclables) et installation de zones de parkings sécurisés. Ces propositions d'aménagement :

- sont en accord avec le principe STOP qui opère la priorisation modale quant aux infrastructures à prévoir (gracq.org) : piétons (*Stappen*), cyclistes (*Trappen*), transports en commun (Openbaar vervoer) et véhicules particuliers (Privévervoer) ;
- correspondent à des infrastructures envisagées ou envisageables à court ou moyen terme pour la ville ;
- répondent aux objectifs de ce mémoire.

Ce chapitre établit le niveau de performance de la démarche de modélisation mise en place. Amblard et Phan (2006) établissent une série de prérequis à la validation ; les expériences menées doivent être reproductibles et le modèle doit être décrit de telle manière à permettre sa reproduction. Ces prérequis sont assurés dans les chapitres - Acquisition des données - et - Méthodologie - dans ce travail.

1 Validation interne

Après cette étape vient la validation interne, laquelle se fait en deux temps (Amblard et Phan, 2006)

1. Vérification : il s'agit de s'assurer que le modèle produit réponde à la question posée. Le modèle produit dans le cadre de ce travail permet de délimiter des zones de chalandise cyclables et multimodales selon les impédances. Ce qui répond à l'objectif général de ce mémoire : proposer de l'aménagement de circulation cyclable vers et dans Louvain-la-Neuve à partir d'une simulation numérique de mobilité multimodale.
2. Délimitation des propriétés du modèle : le modèle est-il robuste ? Il s'agit, en général, d'effectuer une analyse de sensibilité. Au cours des simulations exploratoires effectuées et de la paramétrisation du modèle, une sensibilité à l'impédance ainsi qu'aux contraintes temporelles aux tournants a été remarquée. Pour arriver à une paramétrisation complète et cohérente du modèle, une calibration a été faite par essais et erreur. L'autre élément contraignant la performance du modèle est la complétude du réseau, celle-ci a été traitée dans le Chapitre 3 -Acquisition des données-.

2 Validation externe indépendante

Il s'agit de comparer les résultats du modèle avec des observations indépendantes menées sur le système cible (Amblard et Phan, 2006). La validation de chaque réseau du modèle sera réalisée via calcul d'itinéraires. 62 points de départ ont été choisis aléatoirement dans un rayon de 23 km autour de la Place de l'Université de Louvain-la-Neuve pour la validation cyclable (figure 5.1). Le réseau pédestre étant limité au territoire de Louvain-la-Neuve, 15 points aléatoires serviront sa validation (figure 5.2).

Un même itinéraire sera simulé par le modèle et par Google maps, un générateur d'itinéraire ayant l'avantage de considérer le mode voiture, piéton et cycliste, mais aussi une association de ceux-ci. Cela permet de garder la même référence tout au long de la validation. Les résultats de durée de trajet et de distance à parcourir seront comparés afin d'évaluer la qualité du réseau.

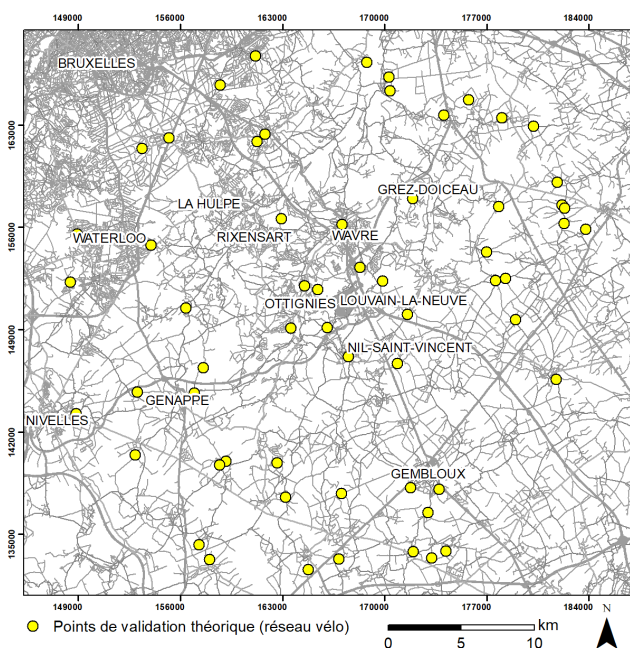


FIGURE 5.1 – Répartition des points de validation théorique (réseau vélo)

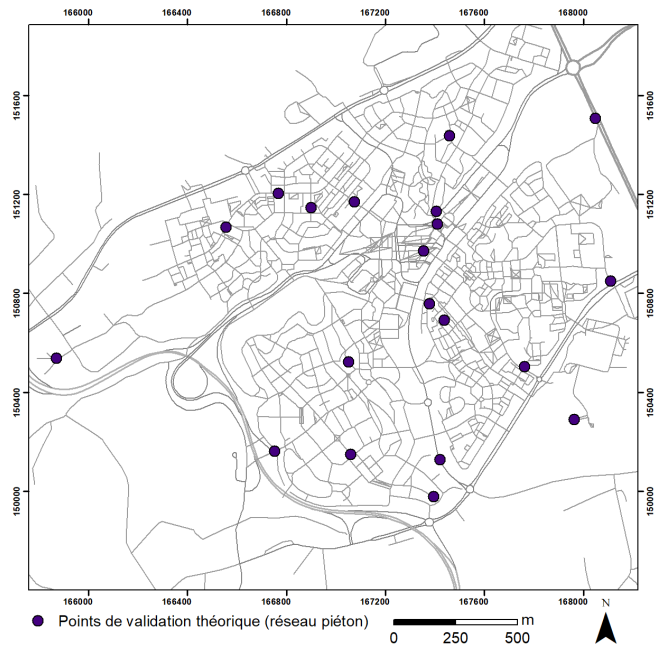


FIGURE 5.2 – Répartition des points de validation théorique (réseau piéton)

Idéalement, il conviendrait de procéder à une validation comparant les résultats de simulation à des observations directes des temps et distances de déplacements. Ce type de campagne de mesure est très coûteuse au vu la zone considérée et ne peut relever d'un mémoire. C'est la raison pour laquelle Google maps est assimilé à une référence même s'il comporte parfois des erreurs, comme tout générateur d'itinéraires. Les 22 interviews de cyclistes réalisées dans le cadre de la paramétrisation du modèle ont mis en lumière un paramètre important : la pratique du réseau par les navetteurs diffère de l'utilisation du réseau permise par infrastructures en place,

les infrastructures cyclables étant parfois inadaptées, inconfortables ou insécurisantes. Afin de nous rapprocher de l'utilisation dans les faits du réseau, nous distinguerons, dans la suite de ce travail : le réseau *cyclable* (le cycliste circule de manière équivalente sur tous les aménagements présents) et le réseau *cycliste* (intégration des préférences des utilisateurs interrogés lors de la paramétrisation du modèle).

3 Métriques de performances

Considérant l'estimation obtenue par Google maps comme référence (X), l'estimation fournie par le modèle (x) (nombre de parcours contenus dans la validation : n), l'erreur sera la différence $x - X$. Cette dernière sera caractérisée par les métriques statistiques abordées ci-après. Les résultats détaillés de chaque trajet sont disponibles aux Annexes 7, 8 et 9.

3.1 Erreur absolue (EA)

Il s'agit de la différence, en valeur absolue entre l'estimation du modèle et l'estimation de Google maps. Afin de mieux visualiser l'ampleur des erreurs, nous considérerons l'erreur absolue minimale, maximale et moyenne, définies par les fonctions suivantes :

$$EA_{min} = \text{Min}|x_i - X_i| \quad (5.1)$$

$$EA_{max} = \text{Max}|x_i - X_i| \quad (5.2)$$

$$MEA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - X_i| \quad (5.3)$$

3.2 Erreur relative (ER)

Cette notion permet d'apprécier l'erreur en pourcentage. Toujours dans un but de mieux visualiser l'impact pour l'utilisateur, les erreurs relatives minimales, maximales et moyennes seront considérées. Elles s'expriment comme suit :

$$ER_{min} = \text{Min} \frac{|x_i - X_i|}{|X_i|} \quad (5.4)$$

$$ER_{max} = \text{Max} \frac{|x_i - X_i|}{|X_i|} \quad (5.5)$$

$$MER = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_i - X_i|}{|X_i|} \quad (5.6)$$

3.3 Erreur quadratique moyenne (RMSE)

L'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*) se calcule sous l'hypothèse que l'erreur est distribuée normalement autour de la valeur réelle. Le RMSE nous informe sur la forme du nuage de points du graphique reliant les valeurs estimées aux valeurs réelles (données par Google maps). Plus cette statistique est faible, plus le nuage sera aplani et plus les valeurs du modèle seront proches des valeurs estimées par Google maps (Le RMSE donne davantage de poids aux erreurs importantes).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - X_i)^2}{n}} \quad (5.7)$$

3.4 Régression linéaire

Comme mentionné ci-devant, le RMSE informe sur la forme du nuage de points du graphique reliant les valeurs estimées aux valeurs de référence (données par Google maps). Une droite de régression peut être établie sur base de la méthode des moindres carrés à partir de ce même graphique. La pente et l'intercepte de cette droite donneront des indications sur la surestimation (ou la sous-estimation) du modèle. Le coefficient de détermination R^2 peut être calculé à partir de cette droite. Ce coefficient mesure la qualité de la prédiction d'une régression linéaire.

3.5 Test d'hypothèse

C'est sur base des résultats d'un test d'hypothèse que la validité de l'ensemble des trajets du réseau pourra être vérifiée.

En gardant l'erreur comme variable d'intérêt (donnée par la formule $Y_i = x_i - X_i$) et en posant que cette erreur suit une distribution normale de moyenne ν et de variance σ^2 , nous obtenons la relation suivante : $Y \sim N(\nu; \sigma^2)$.

La variance σ^2 étant inconnue, ce sera la variance expérimentale qui sera considérée :

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2 \quad (5.8)$$

L'hypothèse à vérifier est $H_0 : \nu = \nu_0$, où $\nu_0 = 0$. Autrement dit, la moyenne des erreurs vaut zéro ; le modèle est valable. Le résultat du test sera soit d'accepter H_0 soit de le rejeter en faveur de $H_1 : \nu \neq \nu_0$. Une loi de Student est utilisée pour ce test :

$$\frac{\bar{Y} - \nu}{\sqrt{\frac{S^2}{n}}} \sim Student(n-1) \quad (5.9)$$

La statistique de ce test vaut :

$$T = \frac{\bar{Y} - \nu_0}{\sqrt{\frac{S^2}{n}}} \quad (5.10)$$

La région dans laquelle H_0 sera acceptée (appelée région d'acceptation) est déterminée par la formule suivante :

$$|T_{obs}| \leq t_{1-\frac{\alpha}{2}, n-1} \quad (5.11)$$

avec α le niveau de signification du test qui est ici fixé à 0,01. Cette valeur reflète un faible besoin de précision au vu du grand nombre de facteurs aléatoires intervenant dans le calcul d'itinéraires.

4 Validation du réseau cyclable

Afin de se rapprocher de l'utilisation dans les faits du réseau, la validation distingue également les réseaux cyclables et cyclistes :

- validation cycliste : par comparaison avec des itinéraires recommandés par l'UCLouvain ;
- validation cyclable : par comparaison d'itinéraires avec Google maps.

4.1 Validation cyclable

Les résultats des itinéraires modélisés se trouvent en Annexe 8. Les itinéraires simulés pour cette validation équivalent à une longueur cumulée de 989,94 km.

4.1.1 Distance

Le résultat des différentes métriques de validation se trouve au tableau 5.1. Les distances estimées par le modèle et par Google sont également comparées à la figure 5.3 pour laquelle la droite de régression est caractérisée par l'équation suivante : $y = 1,0068x + 0,2091$. Le modèle explique 97 % de la variable.

TABLE 5.1 – Résultat de la validation de la distance parcourue (réseau cyclable)

EA_{max}	2,23 km
EA_{min}	0 km
MEA	0,76 km
ER_{max}	17,26 %
ER_{min}	0 %
MER	4,93 %
RMSE	0,71 km

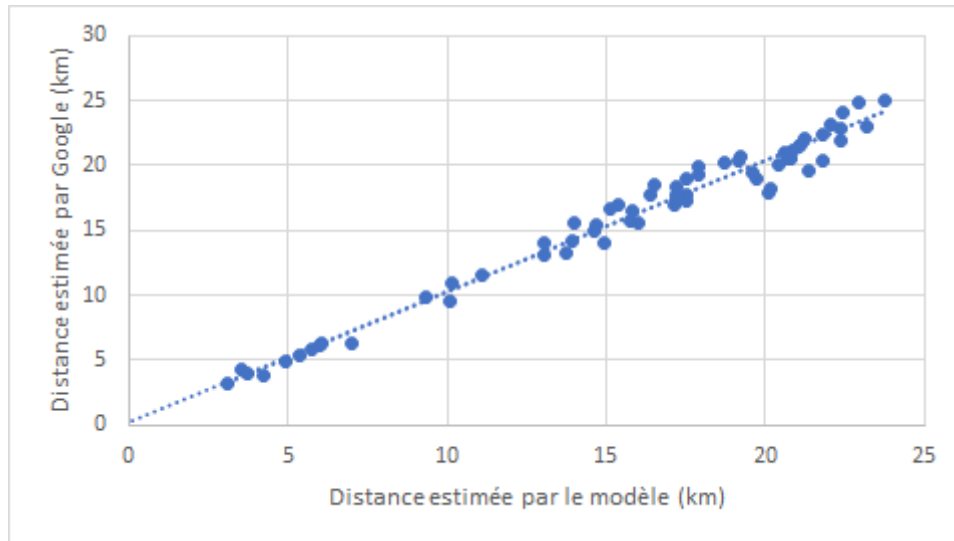


FIGURE 5.3 – Comparaison entre la distance estimée par Google et par le modèle (réseau cyclable)

4.1.2 Temps de parcours

La même logique a été appliquée au temps de parcours simulé par le modèle et par Google ; les résultats des différentes métriques de validation sont les suivants :

TABLE 5.2 – Résultats de la validation du temps de parcours (réseau cyclable)

EA_{max}	1232,83 s
EA_{min}	3,42 s
MEA	315,038 s
ER_{max}	26 %
ER_{min}	0,086 %
MER	9,12 %
RMSE	280,14 s

Les données estimées par le modèle et par Google sont comparées dans le graphique ci-dessous (figure 5.4). La droite de régression est caractérisée par l'équation suivante : $y = 1,0632x - 45,251$ et le modèle explique 92 % de la variable.

Google n'intègre pas le mode "vélo à assistance électrique". Ainsi, une partie des erreurs s'explique par la différence de vitesse moyenne entre le vélo électrique (19 km/h dans ce travail) et le vélo classique (17,25 km/h pour Google maps). En recalculant un temps de parcours pour les itinéraires Google avec une vitesse moyenne de 19 km/h (en divisant la distance estimée par Google par la vitesse moyenne considérée dans notre modèle), nous obtenons les résultats suivants :

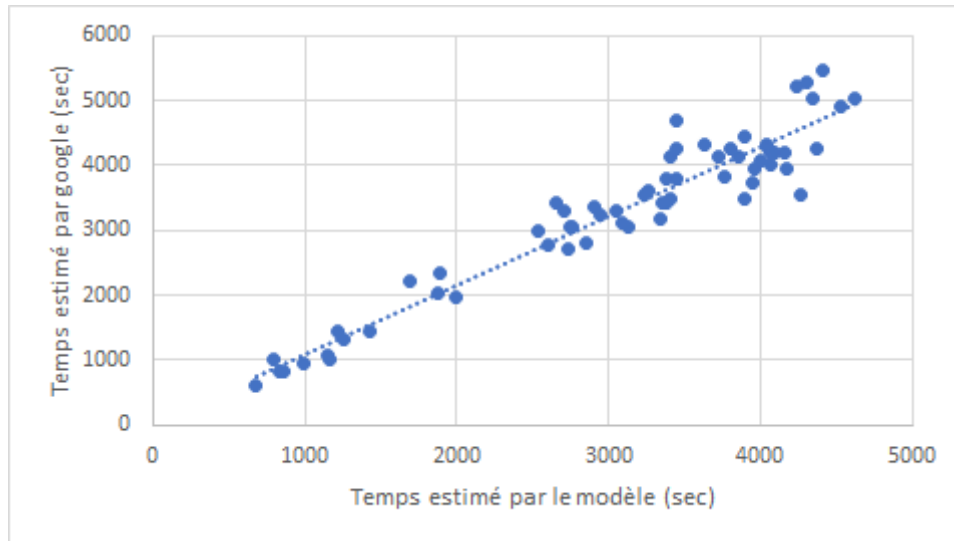


FIGURE 5.4 – Comparaison entre le temps de parcours estimé par Google et par le modèle (réseau cyclable)

TABLE 5.3 – Résultat de la validation du temps de parcours corrigé (réseau cyclable)

EA_{max}	508,24 s
EA_{min}	1,03 s
MEA	163,952 s
ER_{max}	19,69 %
ER_{min}	0 %
MER	6,07 %
RMSE	162,0 s

Enfin, nous observons un nuage de points dont la droite de régression est caractérisée par l'équation suivante : $y = 0,992x - 10,998$ et dont le modèle explique 96 % de la variable.

4.1.3 Discussions

Bien que la correction de la vitesse moyenne de Google maps ait amélioré la convergence des résultats, il subsiste des erreurs entre le modèle et la référence, dues à différents paramètres non prévisibles, difficilement intégrables à un modèle. Le nombre de piétons traversant la chaussée ou le laissez-passer d'un vélo à un rond-point, en sont des exemples.

Malgré cela les erreurs de distance et de temps de parcours représentent respectivement 4,7 % et 10,23 % (l'erreur sur le temps de parcours devient 5,35 % en incluant les corrections de vitesse moyenne). Nous pouvons dire, au vu de ce pourcentage et du coefficient de détermination entre le modèle et Google maps (s'élevant à plus de 0,91) que le modèle est très proche de la référence. De plus l'intercepte des droites de régression vaut 0,209 km (pour un parcours allant de 5 à 25 km) et l'intercepte vaut près de 45 secondes (et 10 secondes avec correction de la

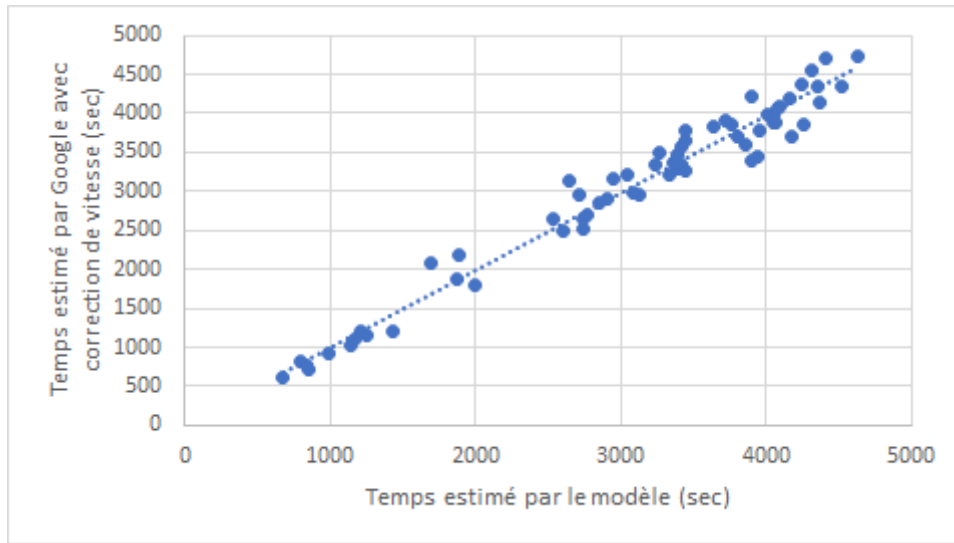


FIGURE 5.5 – Comparaison entre le temps de parcours estimé par Google avec modification de la vitesse moyenne et par le modèle (réseau cyclable)

vitesse moyenne de Google) pour un trajet allant de 8 minutes à plus d’une heure, nous pouvons considérer que le biais systématique est inexistant.

Pour s’assurer de la qualité du modèle, un test de Student a été réalisé sur l’estimation du temps de parcours et de distance. Le résultat est le suivant :

$$|T_{obs,temps}| = 0,50844 < t_{0,995,64} = 2,6589 \quad (5.12)$$

$$|T_{obs,distance}| = 2,50646 < t_{0,995,64} = 2,6589 \quad (5.13)$$

Ce résultat confirme que le modèle du réseau cyclable est valable pour répondre aux objectifs de ce mémoire.

Cependant, le tirage des points n’est pas totalement aléatoire et les points de validation ne se répartissent pas uniformément sur le réseau (il y a beaucoup plus de points à 23 km qu’ailleurs). Mais le présent travail vise à déterminer l’aire de chalandise cycliste de Louvain-la-Neuve en vélo électrique, il est donc plus important de s’assurer que le modèle propose des itinéraires reflétant les trajets effectués par les navetteurs au quotidien que d’essayer de corriger celui-ci avec le résultat de Google maps.

4.2 Validation cycliste

La trentaine d’itinéraires recommandés par l’UCLouvain (4.4. Paramétrisation) a été à nouveau simulée après la paramétrisation. La figure 5.6 présente sur un graphique les résultats des différents itinéraires avec l’interdiction de passage par la Nationale 4. Le modèle explique 93

% de la variable et l'équation de la droite de régression s'écrit : $y = 1,0757x + 0,1018$. Les résultats détaillés de la validation cycliste se trouvent en Annexe 9.

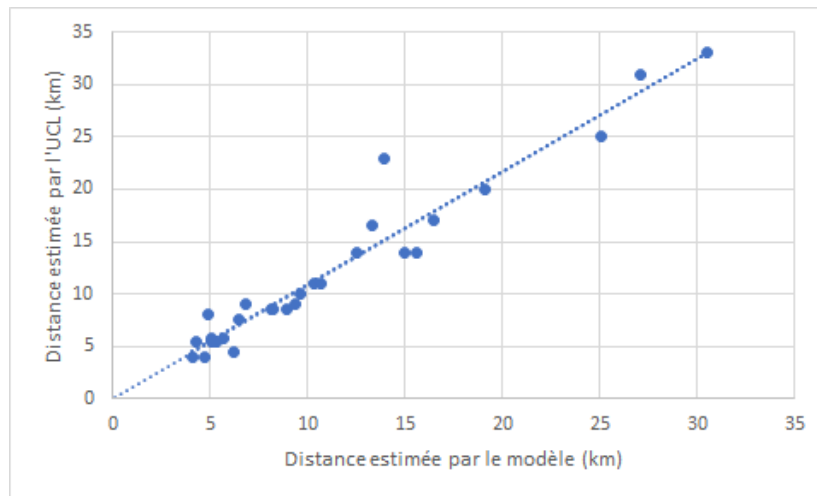


FIGURE 5.6 – Comparaison de la distance estimée par l'UCLouvain et par le modèle (réseau cycliste)

5 Validation du réseau piéton

La longueur totale du réseau pédestre est de 168,027 km. Les trajets validés cumulent une distance de 23,125 km, ce qui représente 13,76 % du réseau total. Pour plus de facilité, l'arrivée d'un trajet représente également le départ du suivant. Ces points de validation diffèrent de la validation cyclable puisque le mode piéton n'est accessible que dans Louvain-la-Neuve.

5.1 Distance

Le résultat des différentes métriques de validation se trouve au tableau 5.4. Les distances estimées par le modèle et par Google sont également comparées (figure 5.7 pour laquelle la droite de régression est caractérisée par l'équation suivante : $y = 0,9634x + 12,016$). Le modèle explique la variable à 98 %.

TABLE 5.4 – Résultat de la validation de la distance parcourue (réseau pédestre)

EA_{max}	244,57 m
EA_{min}	1,22 m
MEA	57,90 m
ER_{max}	27,17 %
ER_{min}	0,17 %
MER	5,05 %
RMSE	43,81 m

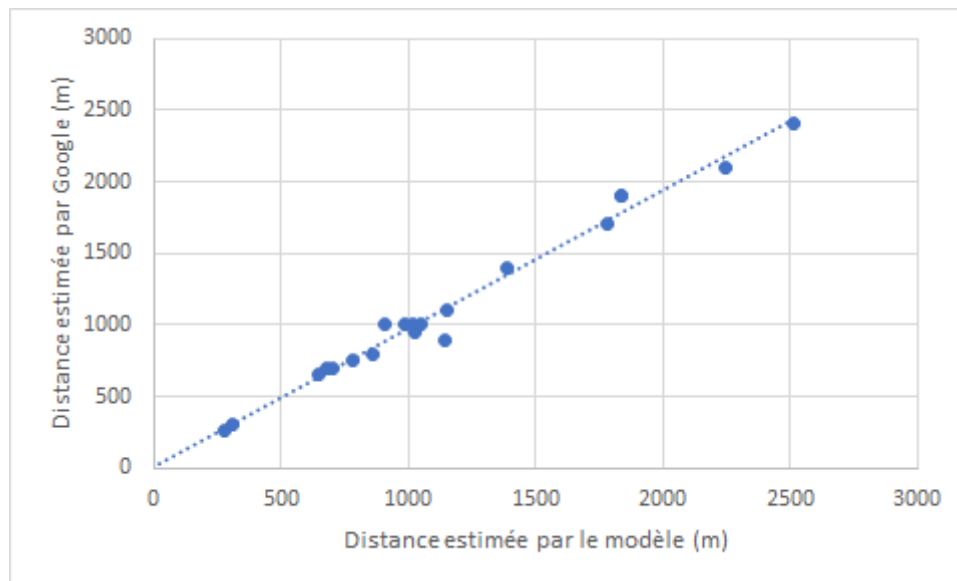


FIGURE 5.7 – Comparaison de la distance estimée par Google et par le modèle (réseau pédestre)

5.2 Temps de parcours

Le résultat des différentes statistiques se trouve au tableau 5.5. Les distances estimées par le modèle et par Google sont également comparées (figure 5.8 pour laquelle la droite de régression est caractérisée par l'équation suivante : $y = 0,7381x - 4,4375$). Le coefficient de détermination vaut 0,97.

TABLE 5.5 – Résultat de la validation de la durée de trajet (réseau pédestre)

EA_{max}	686,41 s
EA_{min}	70,79 s
MEA	307,2928 s
ER_{max}	73,41 %
ER_{min}	16,87 %
MER	36,79 %
RMSE	132,55 s

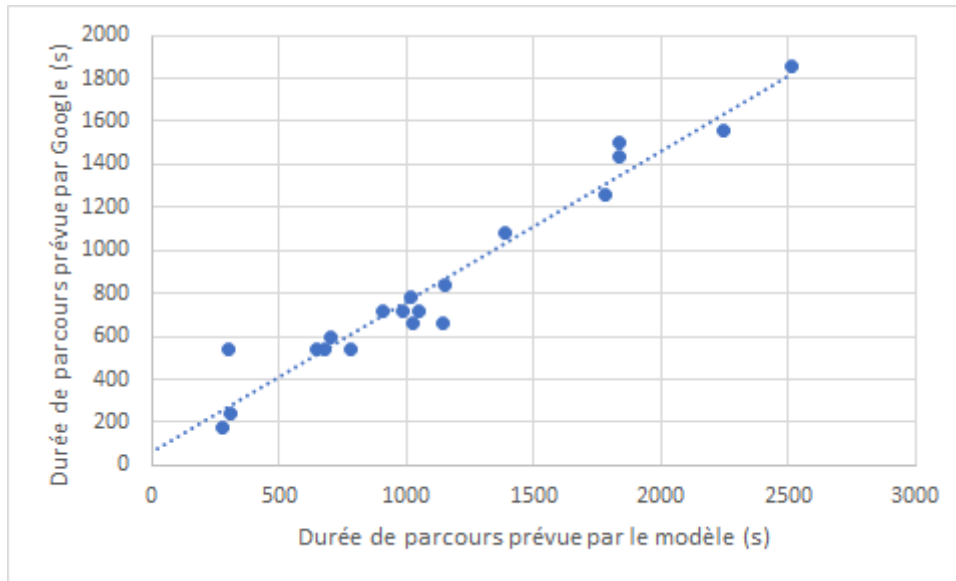


FIGURE 5.8 – Comparaison de la durée de trajet estimée par Google et par le modèle (réseau pédestre)

5.3 Discussions

Tout comme pour les résultats de la validation vélo, les fluctuations des erreurs observées sont dues à différents paramètres non prévisibles et difficilement intégrables à un modèle réalisé dans le cadre d'un mémoire universitaire.

Malgré cela les erreurs de distance et de temps de parcours représentent 5,00 % et 28,89 %. Nous pouvons dire, au vu de ce pourcentage, du coefficient de détermination entre le modèle et Google maps (s'élevant à plus de 0,95) et de la différence de vitesse moyenne de marche considérée par le modèle et Google (respectivement 3,6 et 4,5 km/h) que le modèle est significativement proche de la réalité. De plus l'intercepte des droites de régression vaut 12 m et 59 secondes ce qui peut être négligé pour des parcours allant de 200 m à 2 km et de 4 à 40 minutes, il aurait fallu procéder à des essais sur le terrain pour renforcer la validation du modèle concernant la durée de trajet puisque la référence est aussi un générateur d'itinéraire basé sur des hypothèses de vitesse moyenne.

Pour s'assurer de la qualité du modèle, un test de Student a été réalisé. Le résultat est le suivant pour la distance :

$$|T_{obs}| = 1,7271 < t_{0,995,64} = 2,8609 \quad (5.14)$$

et pour le temps de parcours :

$$|T_{obs}| = 7,7673 > t_{0,995,64} = 2,8609 \quad (5.15)$$

Ce résultat confirme que le modèle du réseau piéton est valable pour répondre aux objectifs de ce mémoire à propos de la longueur du trajet estimé. La vitesse moyenne étant le résultat d'une hypothèse de travail, elle ne peut être validée par Google maps lequel ne suit pas la même hypothèse (4,2 km/h). Cependant, le coefficient de détermination de notre modèle étant de 0,91, nous considérons que notre modèle est également valable pour le calcul du temps de parcours.

6 Validation du réseau voiture

Ne disposant pas de données relatives au trafic routier sur notre réseau, nous avons décidé de ne pas réaliser de simulations pour les voitures, sauf via Google maps. Lequel permet d'intégrer les données trafic d'un mardi matin ordinaire. La validation de ce réseau a néanmoins été réalisée et est disponible à l'Annexe 10.

7 Limites

La référence choisie pour cette validation est un générateur d'itinéraires qui existe depuis 2012 pour le mode "vélo". Celui-ci permet de reconnaître les routes pourvues de pistes cyclables ou de marquages dédiés (Belga News, 2012). Depuis 2018, l'option "dénivelée" est disponible pour les trajets à pied ou à vélo (Innoncente, 2018). À notre connaissance, il n'existe pas de générateur d'itinéraire plus performant que Google bien qu'il existe une multitude de calculateurs d'itinéraires pour vélo sur internet aujourd'hui. Certains organismes comme provelo ou le GRACQ proposent également des cartes contenant des itinéraires autour d'une ville sans permettre le calcul du temps de parcours.

Les itinéraires de la validation cyclable et cycliste avaient tous la même destination : la Place de l'Université et la Place Crois du Sud. Cela implique que les trajets validés passaient à plusieurs reprises par les mêmes rues, notamment dans le centre-ville.

Il aurait été intéressant de valider la vitesse moyenne du mode piéton et du mode vélo *in vivo*. Malheureusement, le confinement engendré par la crise sanitaire du COVID-19 a avorté toute possibilité de réaliser ce genre de validation : les sorties étaient interdites et la densité de personnes habituellement présentes sur le site n'était plus identique.

CHAPITRE 6

AIRES DE CHALANDISE DE LOUVAIN-LA-NEUVE

Le présent chapitre se concentre sur les trajets en direction de Louvain-la-Neuve. Nous présentons l'accessibilité actuelle de la ville, l'accessibilité future (situation projetée) et examinerons une proposition d'aménagement portée par la province du Brabant wallon : la création d'auto-routes cyclables. Enfin, une étude de la population concernée par les aires simulées sera présentée ainsi que les différences de temps de trajet entre la voiture et le vélo.

1 Situation de référence

Les simulations présentées ont pour but de donner un *instantané* de l'état des lieux de l'accessibilité cyclable de Louvain-la-Neuve. La situation de référence désigne le réseau viaire étudié dans son état actuel. Ce réseau a permis la validation de la conception, de la mise en place du modèle et de sa paramétrisation.

1.1 Aire cyclable

Sur ce réseau existant, l'aire cyclable obtenue pour 1h de trajet en vélo couvre une zone de 749,28 km^2 (figure 6.1).

1.2 Aire cycliste

La figure 6.3 détaille l'accessibilité cycliste de Louvain-la-Neuve.

La figure 6.2 compare les aires de chalandises cyclable et cycliste (construite sur base de la calibration : évitant la Nationale 4) et met en évidence les différences entre les deux zones (32 km^2 représenté en rouge sur la figure). La différence entre ces deux aires montre l'importance de penser les aménagements *pour* les utilisateurs. La simple existence d'une piste cyclable sur la nationale 4 ne suffit pas à son utilisation.

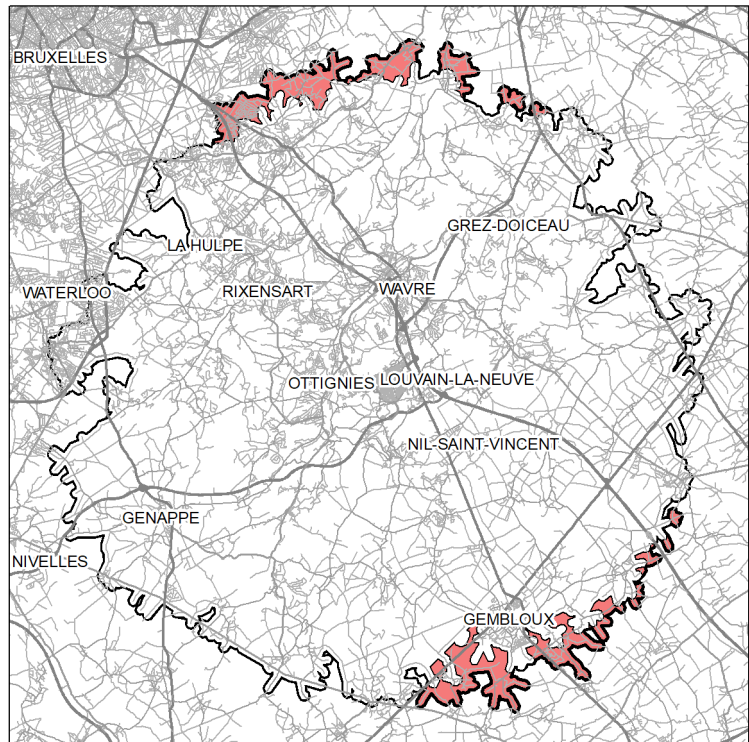


FIGURE 6.2 – Aire de chalandise cycliste, situation de référence

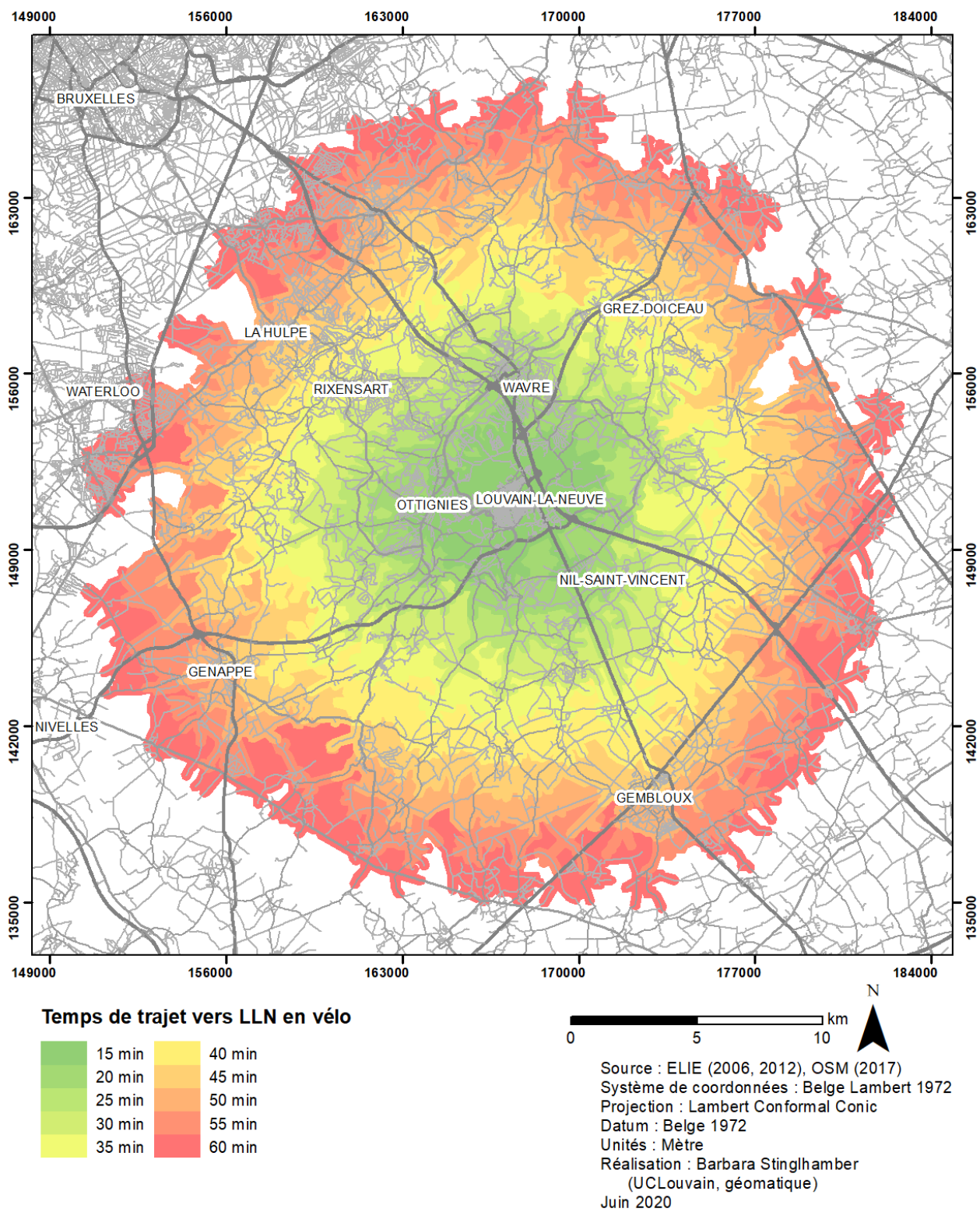


FIGURE 6.1 – Aire de chalandise cyclable, situation de référence

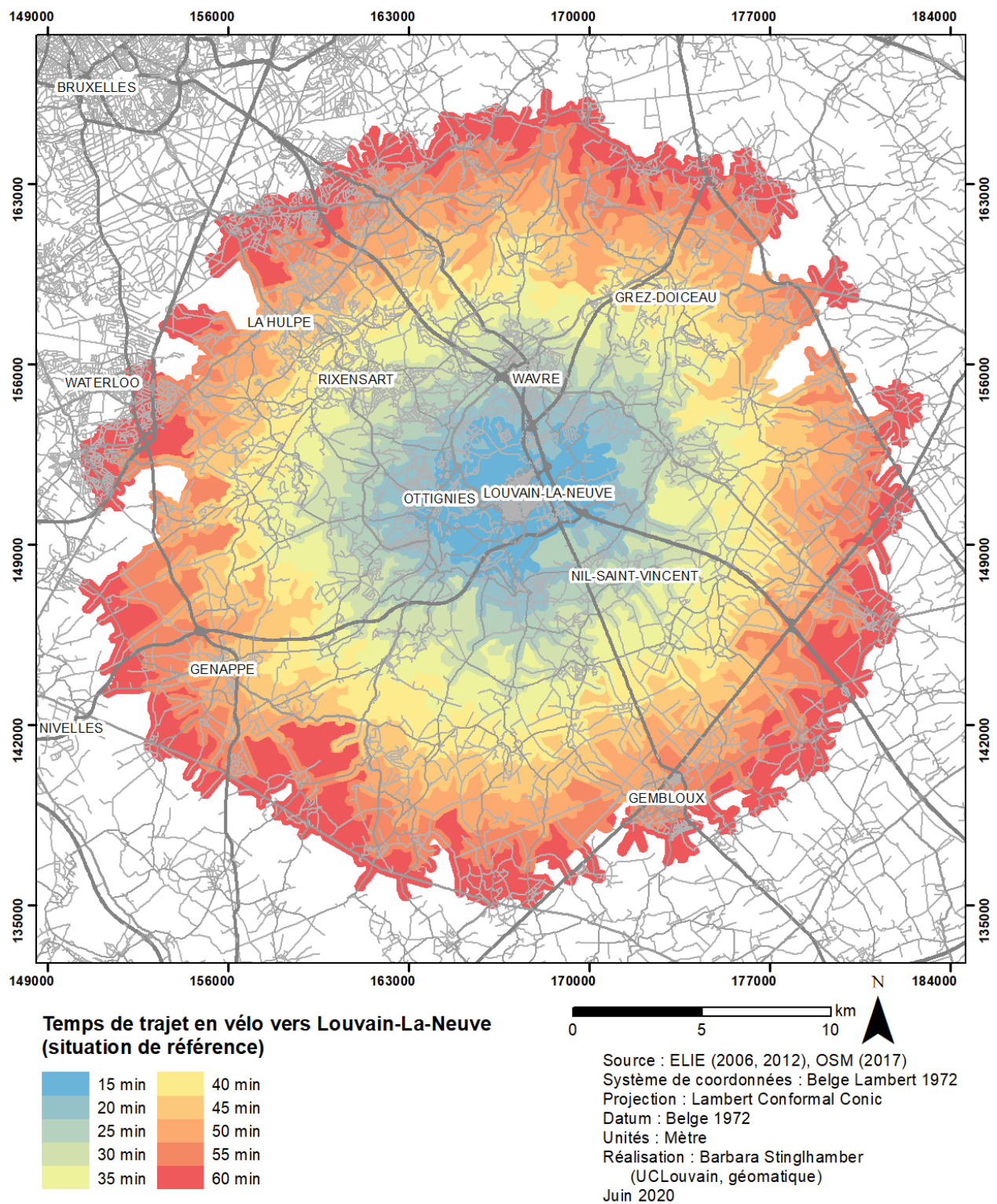


FIGURE 6.3 – Aire de chalandise cycliste, situation de référence

2 Situation projetée

Les simulations effectuées dans cette section permettent de présenter l'accessibilité cyclable future de Louvain-la-Neuve. Il s'agit d'intégrer au réseau les planifications prévues à l'heure actuelle : les aménagements projetés au rond-point de la Planche à voile et à la sortie 8a de l'E411.

2.1 Rond point de la sortie 8a

Cet aménagement fournira une connexion directe entre l'E411 et le nouveau parking P& R de la SNCB situé sous le nouveau quartier de Courbevoie, le long du Boulevard de Wallonie.

Une connexion cyclable sécurisée a été créée au-dessus de l'E411 (permettant de relier Vieux Sart à Louvain-la-Neuve) et fait passer le cycliste sous la Nationale 4 pour rejoindre le nouveau parking de la SNCB, équipé en infrastructures cyclables. Ce chemin est visible en jaune sur la figure 6.4.



FIGURE 6.4 – Schéma de l'aménagement de la sortie 8a prévu, importé sur Google Earth

Cependant, le parking prévu pour les vélos ne semble pas optimal (Falisse, communication personnelle, mai 2020) : petit, éloigné de la gare, accès dénivélé, une rampe doit encore être ajoutée diminuant la capacité du parking. Force est de constater que cet accès au parking en provenance de Vieux Sart est le seul qui existe dans cet aménagement, empêchant un accès au parking de la gare pour les cyclistes en provenance d'autres destinations et entrant dans

Louvain-la-Neuve par la Nationale 4 ou le Boulevard de Lauzelle.

Il n'y a pas de changement du tracé des pistes cyclables prévu dans le rond-point, forçant les cyclistes à effectuer de nombreuses traversées de voiries alors que la paramétrisation du modèle a mis en évidence l'inadéquation des ronds-points avec une pratique confortable du vélo. Certaines pistes cyclables traversent des axes du rond-point, mais ne sont pas connectées au reste du réseau. C'est notamment le cas de la piste traversant le boulevard du Brabant wallon (reliant le rond-point à l'E411) qui n'est pas prolongée jusqu'à la piste le long de la Nationale 4.

2.2 Rond-point de la Planche à voile

Ce rond-point, situé à la sortie 9 de l'E411, est encombré aux heures de pointe. L'aménagement prévu par la Ville consiste en la création d'un carrefour en diamant, supprimant le croisement des nationales 4 et 25 (figure 6.5). Les accès cyclables prévus pour cet aménagement actuellement en cours d'approbation par le fonctionnaire délégué sont des traversées bidirectionnelles le long de la Nationale 4. Tous les croisements de ce carrefour seront équipés en feux de signalisation intelligents qui permettront aux cyclistes s'engageant dans le carrefour de le traverser d'une traite sans devoir s'arrêter (les voitures étant bloquées par un feu rouge, PCM de Louvain-la-Neuve, 2020).

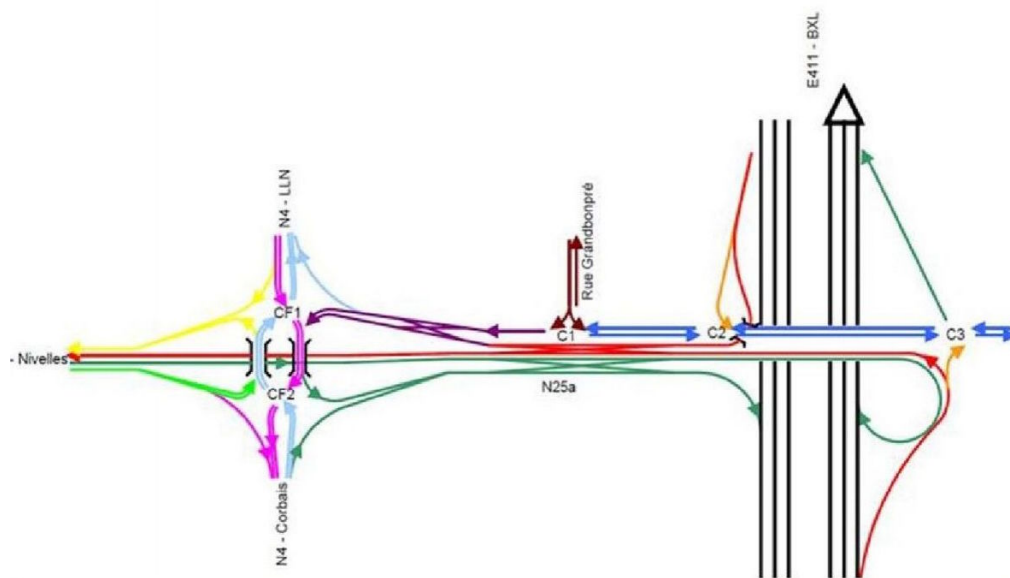


FIGURE 6.5 – Schéma du carrefour en diamant prévu au croisement N4/N25 (PCM de Louvain-la-Neuve, 2020)

Afin de visualiser au mieux l'impact du projet de réaménagement du rond-point de la Planche à voile, 7 itinéraires traversant le croisement visé ont été simulés avant et après aménagement (détail des itinéraires disponibles à l'Annexe 13). Le résumé des comparaisons est repris au tableau 6.1.

La validation via interview de cyclistes a démontré que les ronds-points représentaient des croisements pénalisants : insécurité et nombreuses routes à traverser. Ici, nous remarquons que le rond-point de la Planche à voile va être réaménagé en un carrefour en diamant qui ne va pas améliorer la situation. Ajoutant, au maximum, près de 2 min supplémentaires au trajet par rapport à un rond-point (qui ralentissait déjà les cyclistes). Ce nouvel aménagement, additionné aux nombreux ronds-points que comporte Louvain-la-Neuve (surtout sur sa rocade), représente un impact non négligeable sur le temps de trajet des cyclistes et en diminue la compétitivité.

TABLE 6.1 – Impact de l'aménagement routier du croisement N4/N25 pour les cyclistes

Traversée	Caractéristique	Avant aménagement	Après aménagement	impact sur le temps de traversée
nord vers sud	Longueur du trajet 1	1254,3 m	1231,8 m	- 22,5 m
	Durée de parcours 1	5 min 46 s	5 min 6 s	- 40 s
sud vers nord	Longueur du trajet 2	1195,8 m	1286,0 m	+ 90,2 m
	Durée de parcours 2	5 min 21 s	5 min 45 s	+ 20 s
est/ouest	Longueur du trajet 3	1277,9 m	1678,6 m	+ 400,6 m
	Durée de parcours 3	5 min 34 s	7 min 22 s	+ 1 min 50 s
nord/est	Longueur du trajet 4	860,2 m	789,9 m	- 70,3 m
	Durée de parcours 4	2 min 44 s	2 min 43 s	0 s
nord/ouest	Longueur du trajet 5	995,7 m	1188,8 m	+ 193,1 m
	Durée de parcours 5	4 min 35 s	6 min 24 s	+ 1 min 50 s
sud/ouest	Longueur du trajet 6	1022,1 m	890,3 m	- 131,7 m
	Durée de parcours 6	3 min 9 s	3 min 12 s	0 s
sud/est	Longueur du trajet 7	1125,7 m	1309,8 m	+ 184,1 m
	Durée de parcours 7	5 min 25 s	4 min 45 s	- 40 s

2.3 Aire cyclable

L'aire de chalandise projetée fait 748,79 km^2 soit 0,49 km^2 de moins que la situation de référence (figure 6.6). Cette différence est induite par les modifications réalisées aux sorties 9 et 8a de l'E411 détaillés ci-dessus. Ces différences montrent une nouvelle fois que les aménagements autour de Louvain-la-Neuve ne sont pas étudiés pour avantager l'utilisation du vélo.

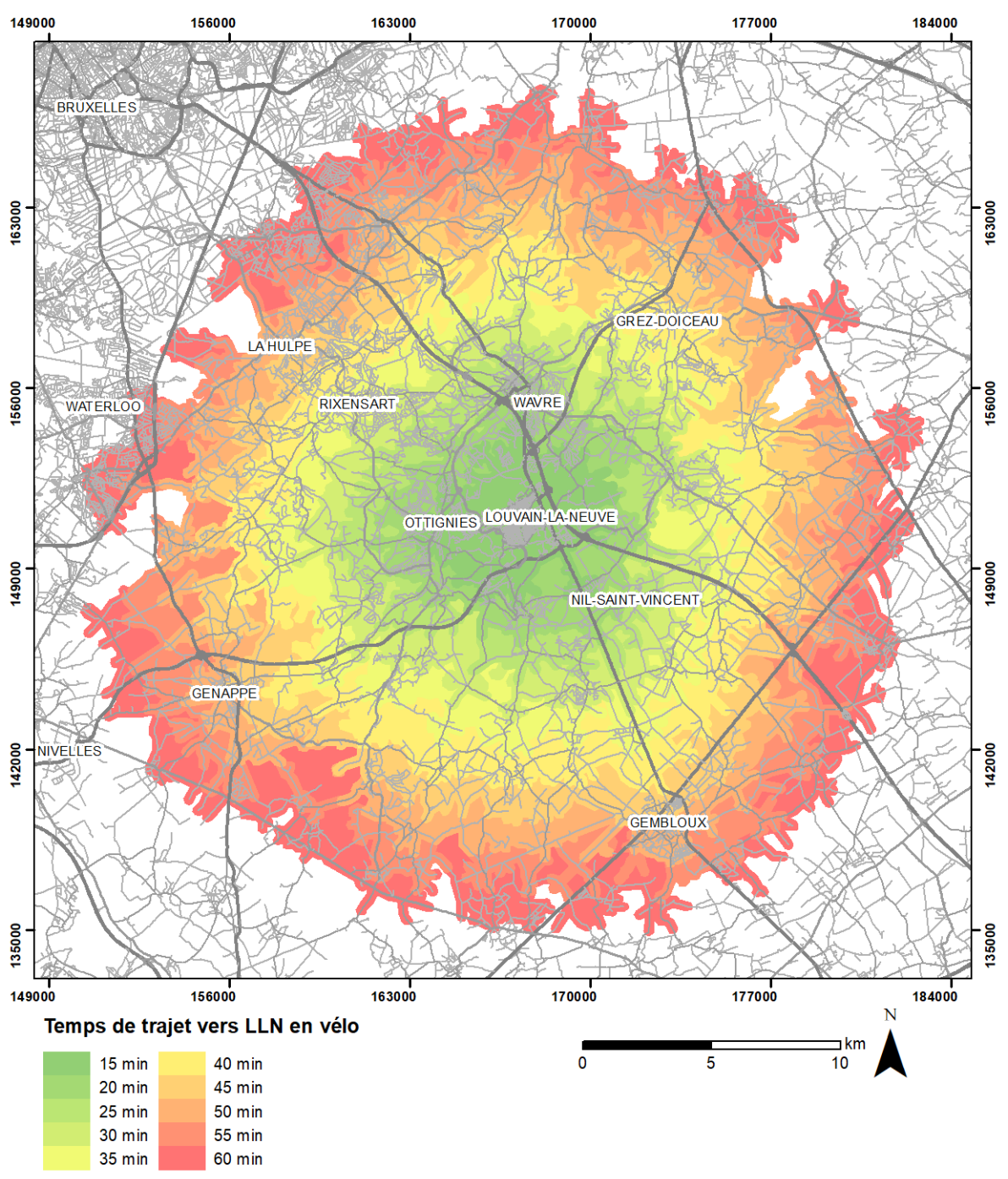


FIGURE 6.6 – Aire de chalandise cyclable, situation projetée

2.4 Aire de chalandise cycliste

La figure 6.8 montre le détail de l'accessibilité de Louvain-la-Neuve suivant la situation *cycliste*.

La figure 6.7 compare les aires de chalandise cyclable et cycliste (construites sur base de la validation vécue) et met en évidence la différence entre les deux (zone rouge sur la figure de 31,96 km^2), montrant à nouveau l'importance de penser les aménagements pour les utilisateurs. Malgré des investissements importants, l'aire de chalandise cycliste est diminuée en situation projetée parce que les utilisateurs préfèrent un détour à des infrastructures inadéquates.

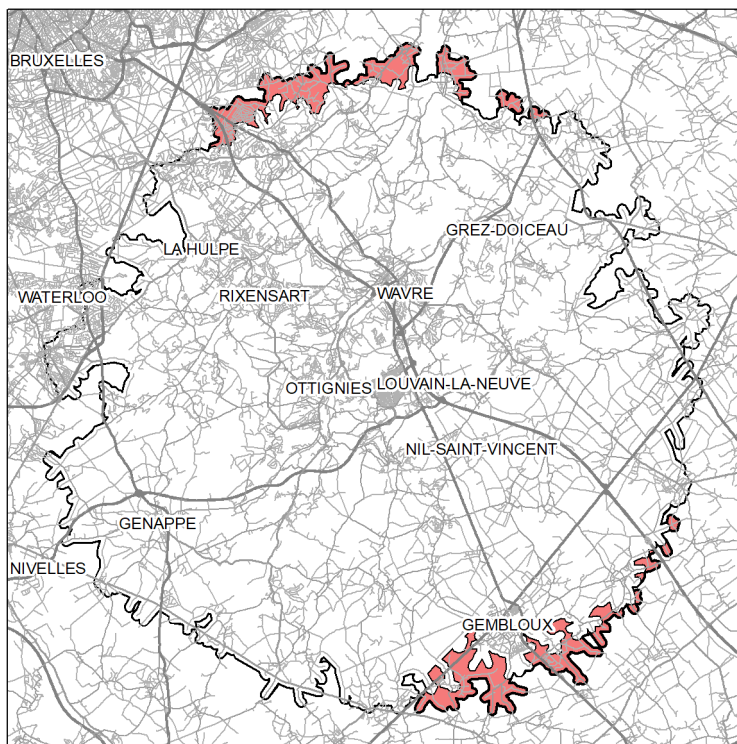


FIGURE 6.7 – Aires de chalandises cycliste et cyclable, situation projetée

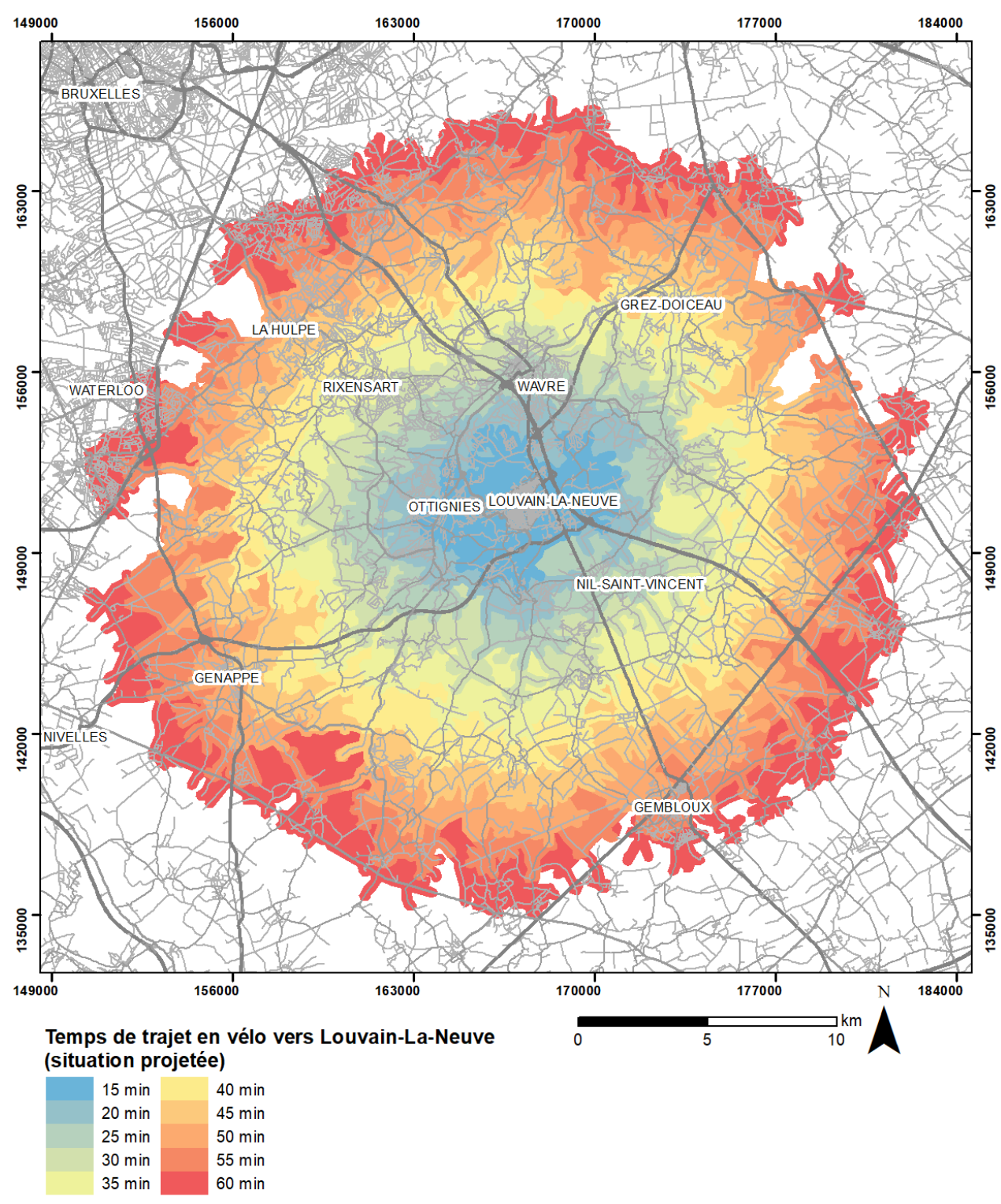


FIGURE 6.8 – Aire de chalandise cycliste, situation projetée

3 Proposition d'aménagement

La Région wallonne a annoncé, dans la continuité de sa vision FAST 2030, sa volonté de mettre à l'étude 5 tracés potentiels d'autoroutes cyclables (Voies Express Cyclables, VEC) autour de Bruxelles. L'une d'entre elles rejoint notamment Wavre par la E411 et la Nationale 4 (Ladeveze, 2019). L'université plaide pour que ce tracé soit dès le départ prolongé jusque Louvain-la-Neuve. Une autre VEC susceptible d'influencer l'accessibilité cyclable de Louvain-la-Neuve est celle qui suit la Chaussée de la Hulpe (Falisse, communication personnelle, 4 mai 2020).

Aujourd'hui, ce sont les pays d'Europe du Nord (Pays-Bas, Norvège, Danemark, Allemagne...) qui développent le plus de VEC, aidés par le taux d'utilisation du vélo et par le grand nombre de pistes cyclables dans leurs villes. Le principe d'une VEC est de relier entre elles des villes par le biais de voies cyclables rapides (en comparaison des pistes cyclables, permettant de se déplacer au sein d'une ville ou d'une commune). Cela permet de diminuer le temps de parcours tout proposant une infrastructure sécurisée. En Belgique, c'est la Région flamande qui devance les autres avec la création de la HST-Route qui relie Leuven à Bruxelles en 26 km. D'autres VEC ont vu le jour dans le nord du pays, là où le nombre de cyclistes est plus élevé (Willaume, 2019).

Le service public régional de Bruxelles définit une bonne infrastructure cyclable de la manière suivante : une voie droite, plate, diminuant au maximum les arrêts aux intersections, offrant un confort optimal et suffisamment large pour laisser circuler un flux important de cyclistes différents. Ainsi, la largeur optimale d'une voie rapide cyclable à double sens est de 4 mètres. De telles voies peuvent être envisagées tant le long de grands axes routiers (autoroutes et routes nationales) que le long des voies ferrées, ces deux types de voiries étant relativement plates et rectilignes.

Louvain-la-Neuve se trouve au croisement de 3 routes nationales (N25, N238 et N4, la seule accessible aux vélos actuellement) et d'une autoroute (E411). En raison de la vitesse des voitures sur l'E411 et son éloignement avec l'entrée de Louvain-la-Neuve (nécessité de passer par la N25 ou la N4), celle-ci ne sera pas considérée comme aménageable en VEC.

L'établissement de VEC le long des routes nationales permet d'augmenter l'aire de chalandise cycliste de Louvain-la-Neuve (figure 6.10). Placer ces autoroutes cyclables le long de voiries automobiles permettrait un plus grand report modal. En effet, les automobilistes bloqués par la congestion observeraient les cyclistes non ralentis circulant sur des voies adjacentes. Ces routes nationales relient plusieurs agglomérations entre elles, augmentant en même temps l'accessibilité cyclable d'autres villes comme Bruxelles ou Gembloux (d'où démarrent certaines personnes

interrogées). Il est évident que, pour cette simulation, l'aire cyclable est confondue avec l'aire cycliste : le scénario des autoroutes cyclables suppose que les pistes cyclables déjà existantes soient améliorées le long des nationales pour les transformer en VEC.

La figure 6.9 montre les différences d'aires de chalandise entre la situation cycliste projetée (aire grisée) et la situation avec établissement de VEC (ligne orangée). Cet aménagement permet d'augmenter de 106 km^2 la zone située à maximum 1h de Louvain-la-Neuve et constitue un réseau de voies agréables pour les cyclistes. Autant de caractéristiques favorisant l'utilisation du vélo en direction de la ville.

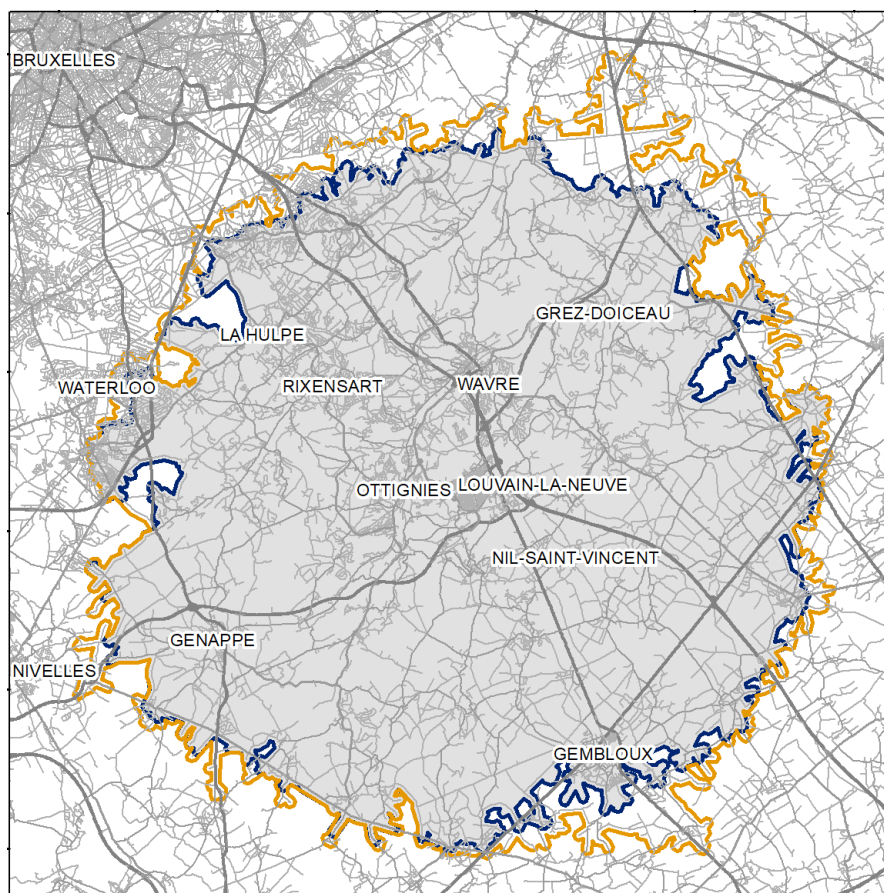


FIGURE 6.9 – Comparaison de l'accessibilité cyclable : situation projetée et avec établissement de VEC

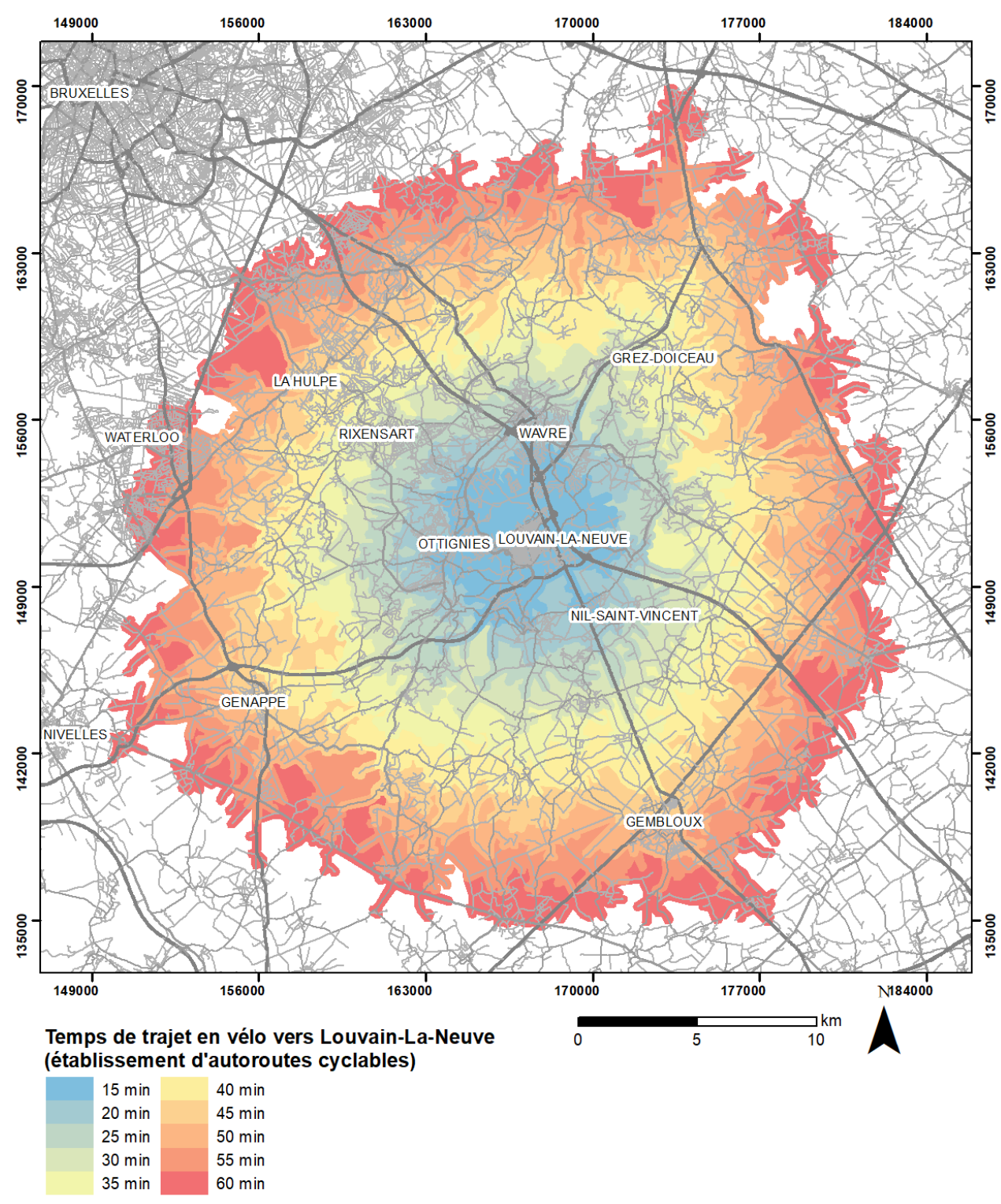


FIGURE 6.10 – Aire de chalandise vélo avec établissement d'autoroutes cyclables

4 Estimation du report modal

4.1 Population concernée par les aires de chalandise

Les tableaux 6.2 et 6.3 reprennent le nombre de personnes concernées par les aires de chalandise présentées ci-dessus. Ces chiffres traduisent le nombre de personnes concernées par un potentiel transfert modal vers le vélo en direction de Louvain-la-Neuve. 15 % des employés de l'Université (site LLN) qui résident à un quart d'heure de ville en vélo (et 34 % à une heure). Pourtant, seuls 4 % d'entre eux se rendaient en vélo sur leur lieu de travail en 2017, traduisant de la faiblesse des infrastructures présentes sur le réseau. Ces chiffres sont encore plus étonnants lorsque l'on sait que l'université accorde une prime au kilomètre pour ses employés venant en vélo au travail.

Les faibles différences entre les situations de référence et projetée proviennent du niveau d'agrégation de l'information sur la population, qui ne permet pas de rendre compte des différences de surface entre les simulations, la maille des données de population étant plus grossière (anciennes communes et secteurs statistiques).

TABLE 6.2 – Population concernée par les aires de chalandise

	Temps de parcours (minutes)	Employés UCLouvain site LLN	Part des employés UCLouvain site LLN (%)	Population estudiantine (20 - 24 ans)	Part des étudiants du total considéré (%)
Situation de référence	15	554	15	2 918	18
	30	933	25	7 073	44
	45	1 100	30	11 072	68
	60	1 245	34	16 148	100
Situation projetée	15	554	15	2 918	18
	30	933	25	7 073	44
	45	1 100	30	11 072	68
	60	1 245	34	16 148	100
Installation de VEC	15	554	15	2 918	14
	30	1 537	42	7 534	40
	45	1 708	46	12 933	63
	60	1 816	49	20 371	100

TABLE 6.3 – Population concernée par les aires de chalandise (suite)

	Temps de parcours (minutes)	Population active (25 - 65 ans)	Part de la population active sur le total considéré (%) (%)	Population totale	Part de la population sur le total considéré (%)
Situation de référence	15	16 393	13	31 101	11
	30	49 602	40	101 170	35
	45	82 613	67	173 809	60
	60	82 613	100	288 044	100
Situation projetée	15	16 393	13	31 101	11
	30	49 602	40	101 170	35
	45	82 613	67	173 809	60
	60	122 704	100	288 044	100
Installation de VEC	15	16 393	6	38 106	12
	30	53 362	20	113 749	35
	45	99 290	38	199 409	62
	60	261 126	100	320 194	100

4.2 Transfert modal attendu

Un transfert modal s'effectue si l'utilisateur trouve un avantage au changement : faire de l'exercice, prendre l'air, profiter du paysage, avantage écologique et économique... Dans ce travail, le transfert modal peut s'effectuer malgré un rallongement du temps de trajet, pour autant que celui-ci n'excède pas 30 min par jour (appelé "zone de transfert modal acceptable"). Les figures 6.11, 6.12 et 6.13 présentent la différence de temps de trajet engendrée par le transfert modal de la voiture vers le vélo.

L'aire délimitant la zone de "transfert modal acceptable" est ainsi obtenue (zone bleutée sur les figures ci-dessous), elle démontre le potentiel de transfert modal du réseau cyclable ; plus de 1 200 employés de l'université sont concernés pour la situation projetée, soit 33 % du personnel UCLouvain du site de Louvain-la-Neuve alors que seuls 4 % de ces employés pratiquaient le vélo pour aller au travail en 2017. Avec établissement d'autoroutes cyclables, l'aire de transfert modal acceptable concerne près de 1 300 employés de l'université (35 % du personnel UCLouvain du site de Louvain-la-Neuve).

Le réseau cycliste le permettant à l'heure actuelle, l'Université pourrait envisager une politique volontariste pour amorcer, sans attendre la fin de travaux planifiés, un transfert modal de ses employés. L'université de Gand met gratuitement des vélos à disposition de ses étudiants, l'UCLouvain pourrait envisager le même type de projet et proposer : des vélos à prix réduit, des vélos en prêt à l'année moyennant une caution ou encore des vélos en libre-service sur le site de Louvain-la-Neuve, gratuit avec la carte d'accès UCL. Cette politique pourrait être adressée

aussi bien aux employés de l'Université qu'aux étudiants.

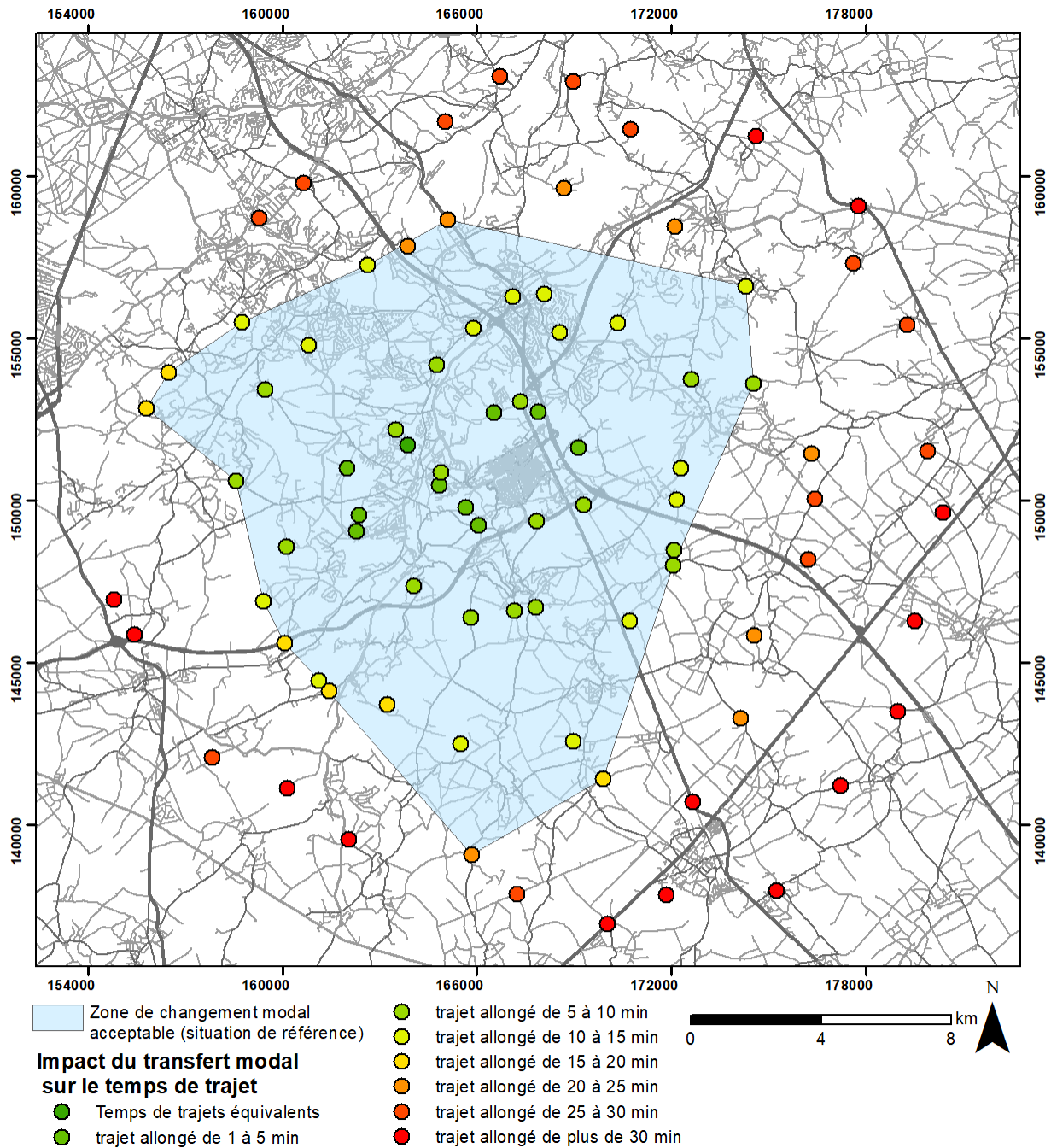


FIGURE 6.11 – Différences de temps de trajet en voiture et en vélo (situation de référence)

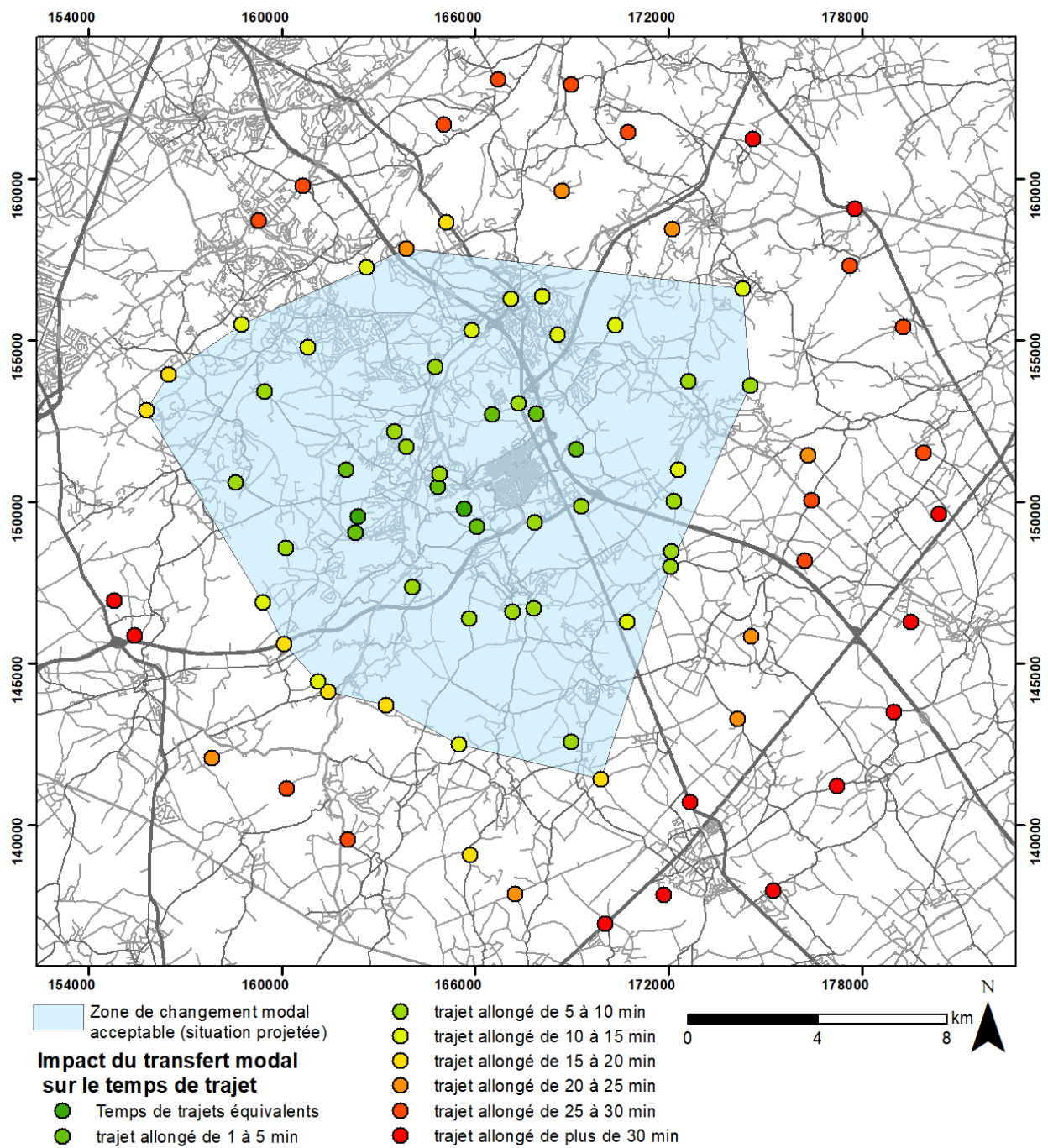


FIGURE 6.12 – Différences de temps de trajet en voiture et en vélo (situation projetée)

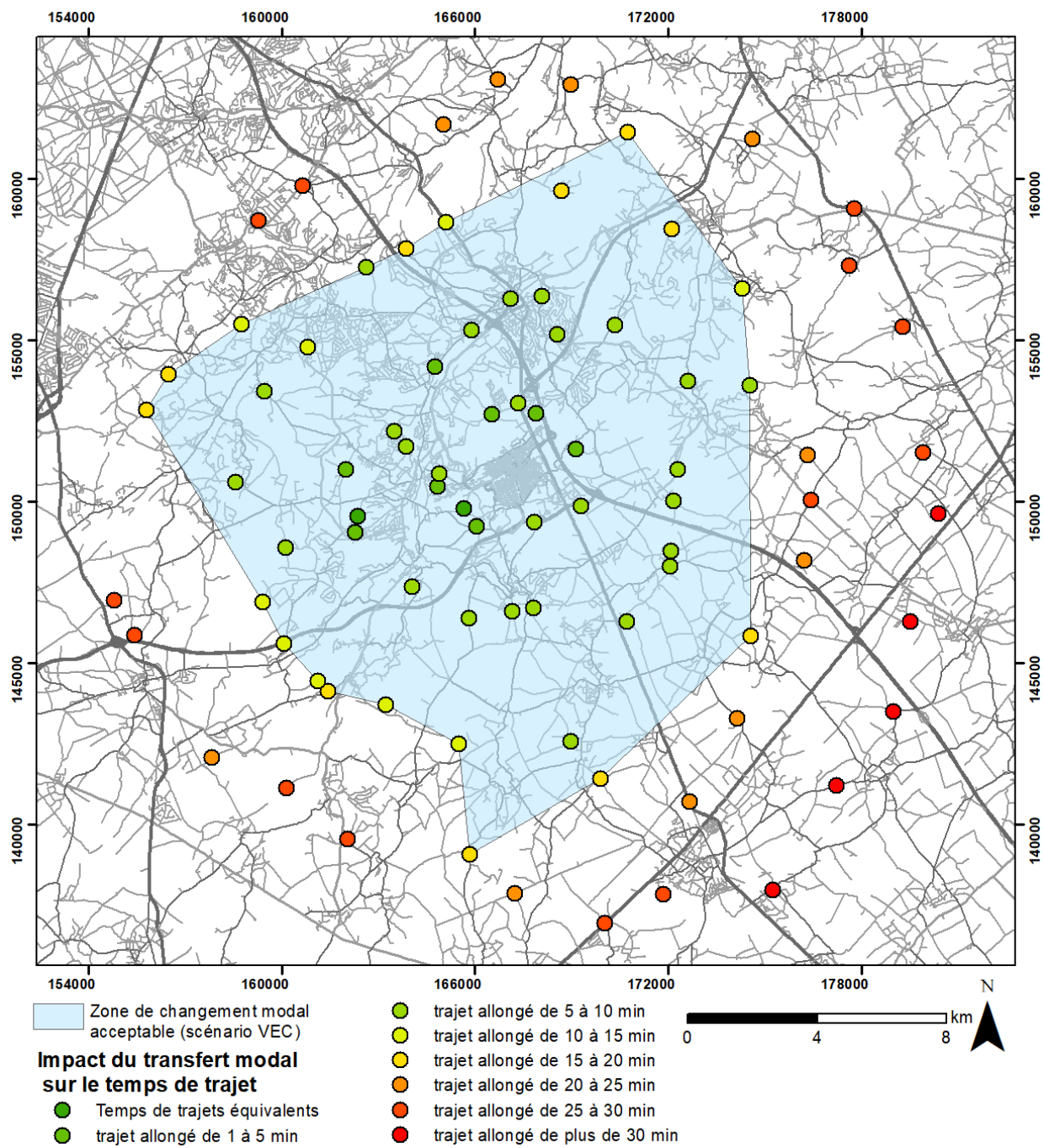


FIGURE 6.13 – Différences de temps de trajet en voiture et en vélo (avec autoroutes cyclables)

CHAPITRE 7

CIRCULATION LOCALE DES VÉLOS

1 Introduction

Le chapitre précédent abordait l'arrivée des navetteurs à Louvain-la-Neuve. Dans ce chapitre, nous aborderons la mobilité des cyclistes dans Louvain-la-Neuve.

L'accessibilité et l'aire de chalandise de la gare seront abordées ainsi que l'analyse de la localisation des parkings vélos.

2 Accessibilité de la gare de Louvain-la-Neuve

Le RER (Réseau Express Régional) promet de relier la zone bruxelloise à Louvain-la-Neuve en 30 min.

En considérant 1h maximum de trajet domicile-travail, 10 min de trajet domicile - gare de Bruxelles Schuman et 5 min pour embarquer dans le RER, la durée consacrée à un trajet gare de Louvain-la-Neuve - travail sera de maximum 15 min en vélo.

2.1 Situation de référence

Avec les aménagements actuellement présents (situation de référence), l'aire de chalandise de la gare s'étend jusqu'à Wavre (décathlon), Vieuxsart et Franquénies (figure 7.1) et permet d'atteindre la totalité des parcs scientifiques et d'affaires situés autour de Louvain-la-Neuve en moins de 15 min à vélo, soit tout le bassin d'emploi de Louvain-la-Neuve.

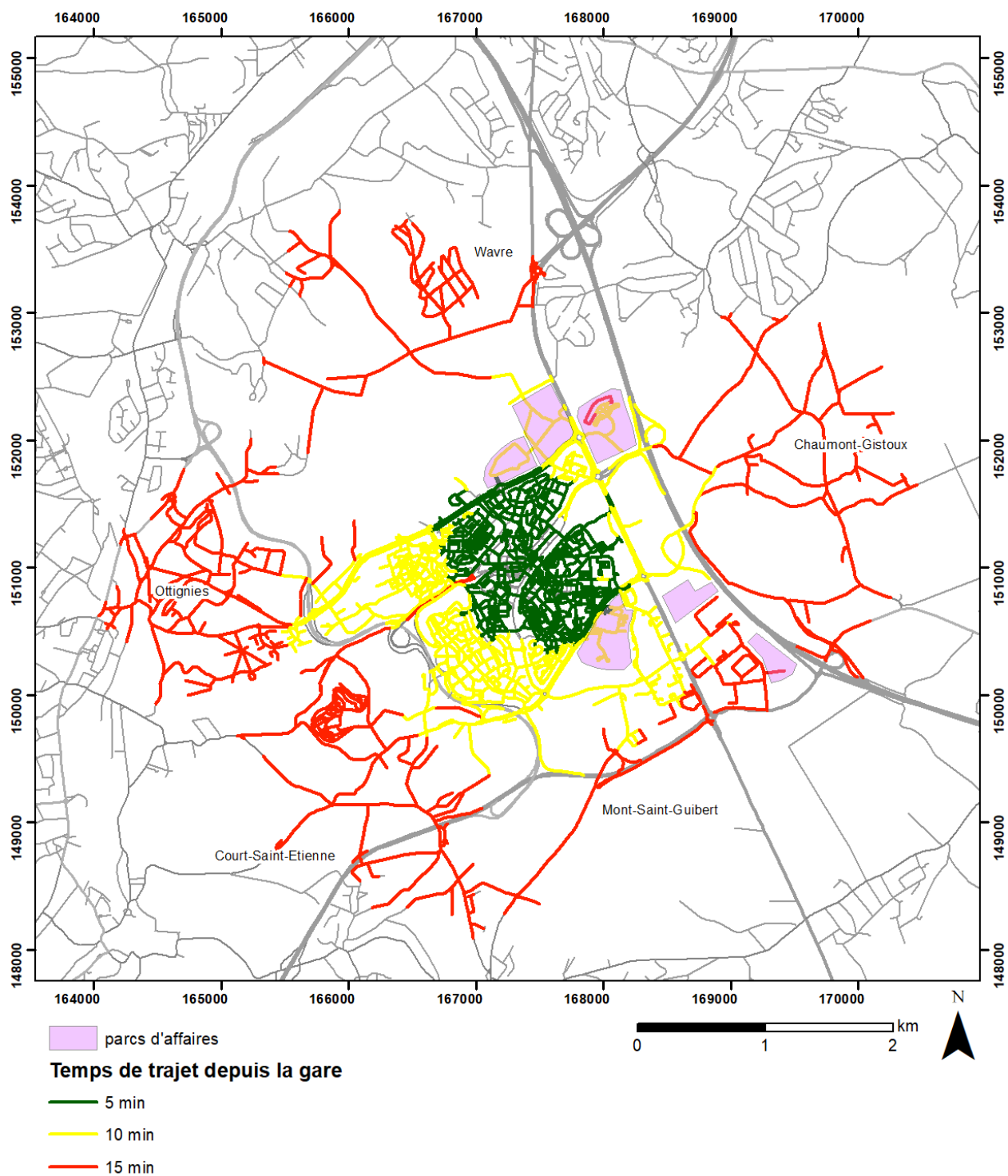


FIGURE 7.1 – Aire de chalandise cyclable de la gare de Louvain-la-Neuve à 15 min maximum (situation de référence)

2.2 Situation projetée

En intégrant aux infrastructures actuelles les futurs aménagements prévus par les autorités compétentes, l'aire de chalandise devient celle présentée à la figure 7.2. Les simulations se basant sur la situation cycliste, il n'y a pas de différence entre l'aire de référence et projetée, la Nationale 4 n'étant pas prise en compte dans les deux cas.

2.3 Propositions d'aménagements

Il serait intéressant de pouvoir agrandir cette aire de chalandise, afin d'augmenter le transfert modal vers le train et le vélo en provenance de Bruxelles. Pour ce faire, plusieurs stratégies sont envisageables.

En reprenant le scénario d'établissement de VEC autour de Louvain-la-Neuve, l'aire de chalandise est augmentée. Pour rappel, nous faisons l'hypothèse que les aménagements situés sur la Nationale 4 s'améliorent et que les cyclistes acceptent de l'emprunter. Cette nationale étant la plus proche du centre-ville, il est nécessaire d'en améliorer les infrastructures cyclables au vu de son influence dans l'accessibilité de la gare de Louvain-la-Neuve.

Une autre stratégie pourrait être de rendre les pénétrantes ainsi que la rocade souterraine accessible aux vélos. Leur permettant de maintenir une vitesse moyenne de 23 km/h puisqu'aucun piéton ne circule sur ces axes. Cette stratégie associée à l'établissement de VEC donne l'aire de chalandise présentée à la figure 7.2, laquelle s'étend jusque l'entrée de Louvrance et de Mousty.

Les stratégies présentées permettent aux cyclistes d'atteindre les agglomérations voisines en un quart d'heure (Wavre, Ottignies, Mousty, Louvrance). Cela montre les possibilités de mobilité offertes par le vélo pour autant les aménagements qui y sont consacrés soient ambitieux et qualitatifs.

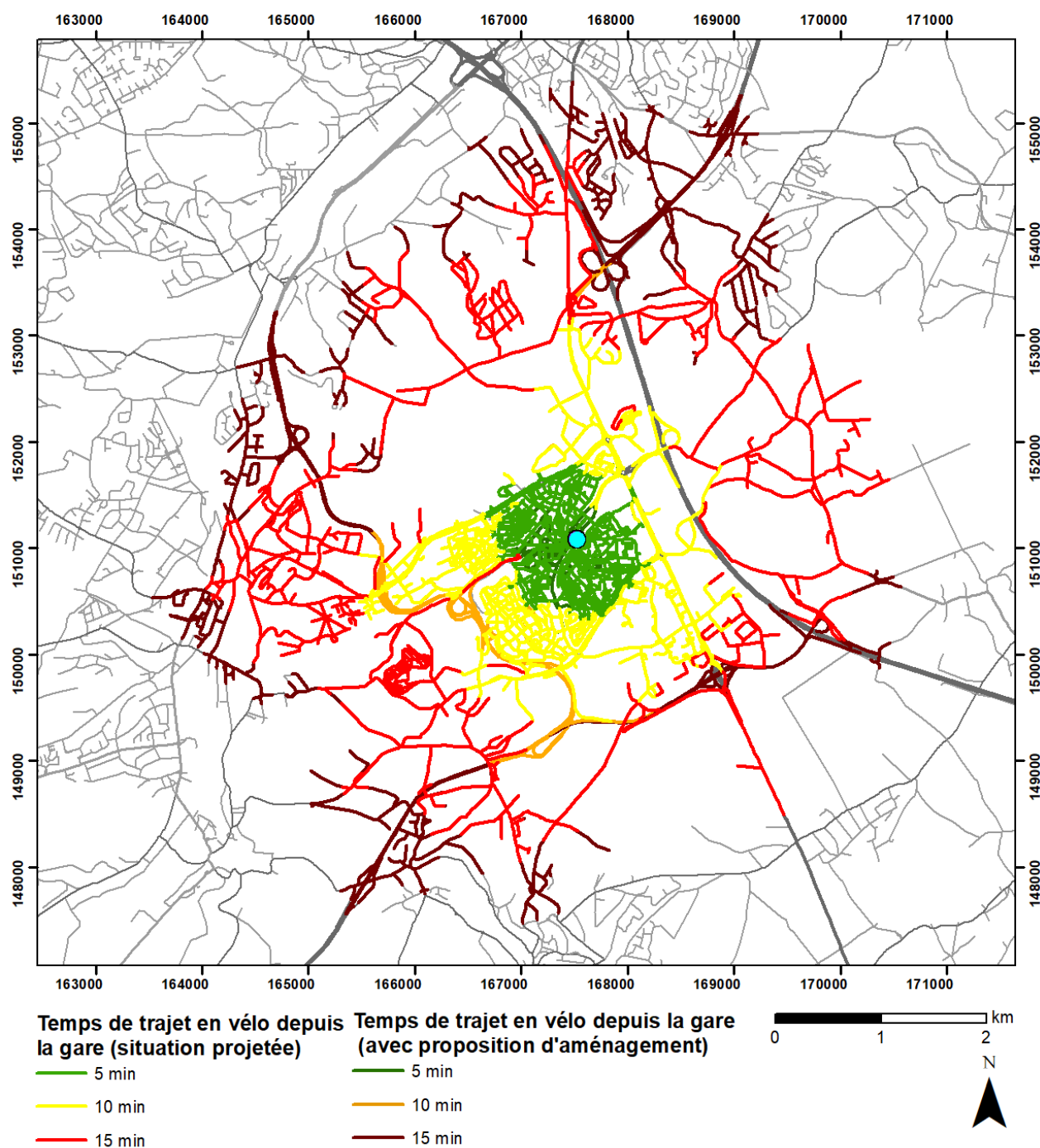


FIGURE 7.2 – Comparaison des aires de chalandise cyclistes de la gare de Louvain-la-Neuve à 15 min maximum, situation projetée et scénario d'accessibilité des pénétrantes

3 Les parkings vélos de Louvain-la-Neuve

Une personne se déplaçant à vélo, dans n'importe quelle ville, devra le laisser dans un lieu prévu à cet effet (anneau en U, abris, parking sécurisé...) et devra se rendre dans le bâtiment de sa destination à pied. La localisation des parkings vélos influence l'avantage comparatif de ce mode de transport par rapport aux autres. Dans le cas de l'usage des vélos électriques dont le prix d'achat est élevé, ce sont les parkings sécurisés qui seront étudiés.

3.1 Impact de la localisation des parkings : étude du parking Leclerc

Dans cette section, l'impact de la localisation du parking Leclerc sur le temps de parcours d'un cycliste se rendant aux auditoires Montesquieu est déterminé. Pour ce faire, la simulation est réalisée en deux versions :

1. Le cycliste doit se garer au parking Leclerc et continuer à pied vers les auditoires Montesquieu,
2. Le cycliste a la possibilité de laisser son vélo à l'entrée des auditoires et ne doit donc pas se garer au parking Leclerc.

Pour ces deux étapes, un temps subjectif de 90 secondes représentant le parage du vélo a été ajouté (descendre du véhicule, poser un cadenas, enlever le casque...).

Une dizaine de points situés autour de Louvain-la-Neuve ont été pris comme départs des itinéraires à destination des auditoires Montesquieu (Annexe 12). Les simulations avaient l'objectif de trouver le trajet le plus rapide (qui n'est pas forcément le plus court). Les résultats des comparaisons sont repris au tableau 7.1. Le cycliste réalise, dans tous les trajets simulés, un détour en se rendant au parking Leclerc ce qui rallonge son temps de trajet à vélo et ajoute encore 210 m à parcourir à pied.

TABLE 7.1 – Résumé des comparaisons d'itinéraires vers les auditoires Montesquieu

Trajet	Distance	Distance via parking Leclerc	Impact	Durée	Durée via parking Leclerc	Impact
1	13,3 km	13,6 km	+300 m	61 min 53 s	65 min 44 s	+3 min 50 s
2	8,6 km	9,1 km	+500 m	42 min 43 s	48 min 52 s	+6 min 40 s
3	3,9 km	4,3 km	+400 m	31 min 16 s	36 min 57 s	+5 min 10 s
4	2,8 km	3,0 km	+200 m	22 min 13 s	26 min 11 s	+4 min 0 s
5	3,0 km	3,2 km	+200 m	18 min 38 s	21 min 39 s	+3 min 30 s
6	5,6 km	5,8 km	+200 m	29 min 42 s	32 min 43 s	+3 min 0 s
7	6,9 km	6,8 km	-100 m	34 min 54 s	36 min 31 s	+1 min 40 s
8	4,3 km	4,5 km	+200 m	26 min 49 s	28 min 28 s	+1 min 40 s
9	5,6 km	6,0 km	-400 m	27 min 45 s	32 min 49 s	+5 min 0 s
10	2,9 km	3,2 km	-300 m	17 min 32 s	24 min 06 s	+6 min 30 s

Cette analyse du parking vélos Leclerc démontre l'importance d'étudier la localisation des parkings sécurisés de Louvain-la-Neuve. Les placer à côté des parkings voitures (par souci d'économie ou par facilité d'intégration dans le paysage) ne favorise en rien un transfert modal : cyclistes et automobilistes se retrouvent piétons au même endroit. Or, si la voiture est plus rapide que le vélo pour la majorité des points testés (chapitre 6 - Aires de chalandise), les automobilistes sont contraints de passer à la marche pour circuler dans Louvain-la-Neuve, contrairement aux cyclistes, dont la circulation est permise sur la dalle piétonne. Cet accès à la dalle pourrait conférer aux cyclistes un avantage sur les automobilistes. Le parking Leclerc comprenant à la fois des places vélos et voitures, cet avantage potentiel du vélo est supprimé : les deux modes étant contraints à la marche au même endroit.

3.2 Situation de référence : les parkings sécurisés

La figure 7.3 présente les temps de marche allant de 1 à 3 min à pied depuis les parkings sécurisés mis à disposition des cyclistes (respectivement du vert au rouge).

Force est de remarquer l'absence de parkings sécurisés dans Louvain-la-Neuve : seuls 6,7 % du réseau pédestre se trouve à maximum 3 min à pied d'un parking vélo sécurisé. Cette situation amène les cyclistes à marcher sur des longues distances pour rejoindre leur destination.

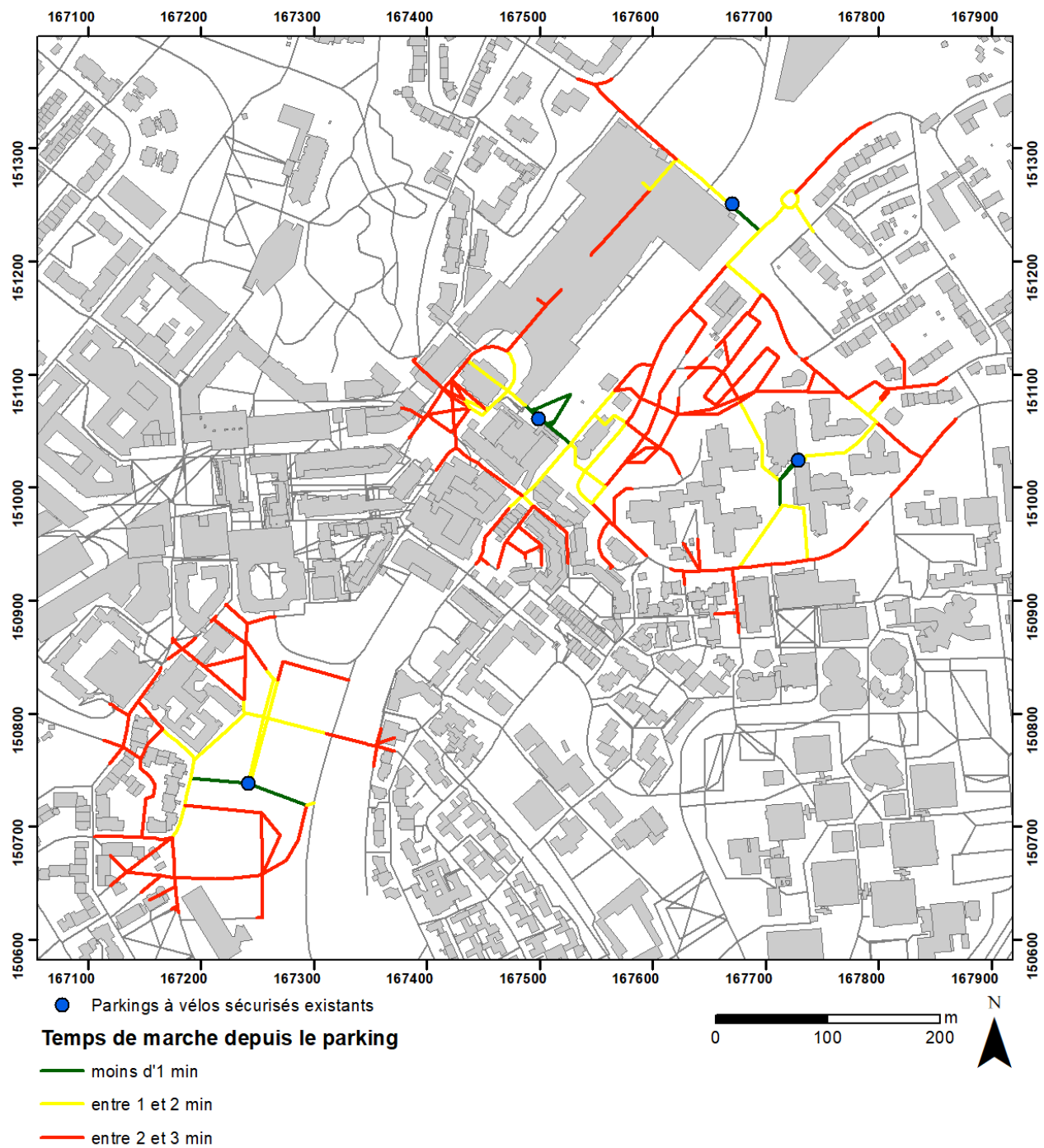


FIGURE 7.3 – Aire de chalandise pédestre des parkings à vélos sécurisés de Louvain-la-Neuve, situation de référence

3.2.1 Situation projetée

La Ville d'Ottignies-Louvain-la-Neuve projette d'améliorer l'accessibilité du centre-ville à vélo. C'est pourquoi, dans le quartier du Biéreau, 2 parkings sécurisés vont être ajoutés : un à proximité de l'école Martin V et l'autre sur un terrain communal Voie du Roman Pays.

Le nouveau quartier de Courbevoie (situé le long du Boulevard de Wallonie) abritera également un futur parking sécurisé pour les vélos, permettant ainsi de rejoindre la gare, mais nous savons déjà que celui-ci n'est pas adapté aux cyclistes (Falisse, communication personnelle, 4 mai 2020).

Les zones de chalandise pédestre des parkings sécurisés de Louvain-la-Neuve augmentent (figure 7.4), mais les 13,7 % du réseau piéton situé à maximum 3 min à pied d'un parking sécurisé n'assurent pas aux cyclistes un accès complet des bâtiments de la Ville, les obligeant encore à marcher.

Ces deux figures (7.3 et 7.4) montrent les conséquences des emplacements des parkings à vélos : éloignés des destinations alors qu'un cycliste cherche à laisser son vélo le plus près possible de sa destination pour éviter de devoir marcher trop longtemps après un voyage et/ou pour augmenter son sentiment de sécurité.

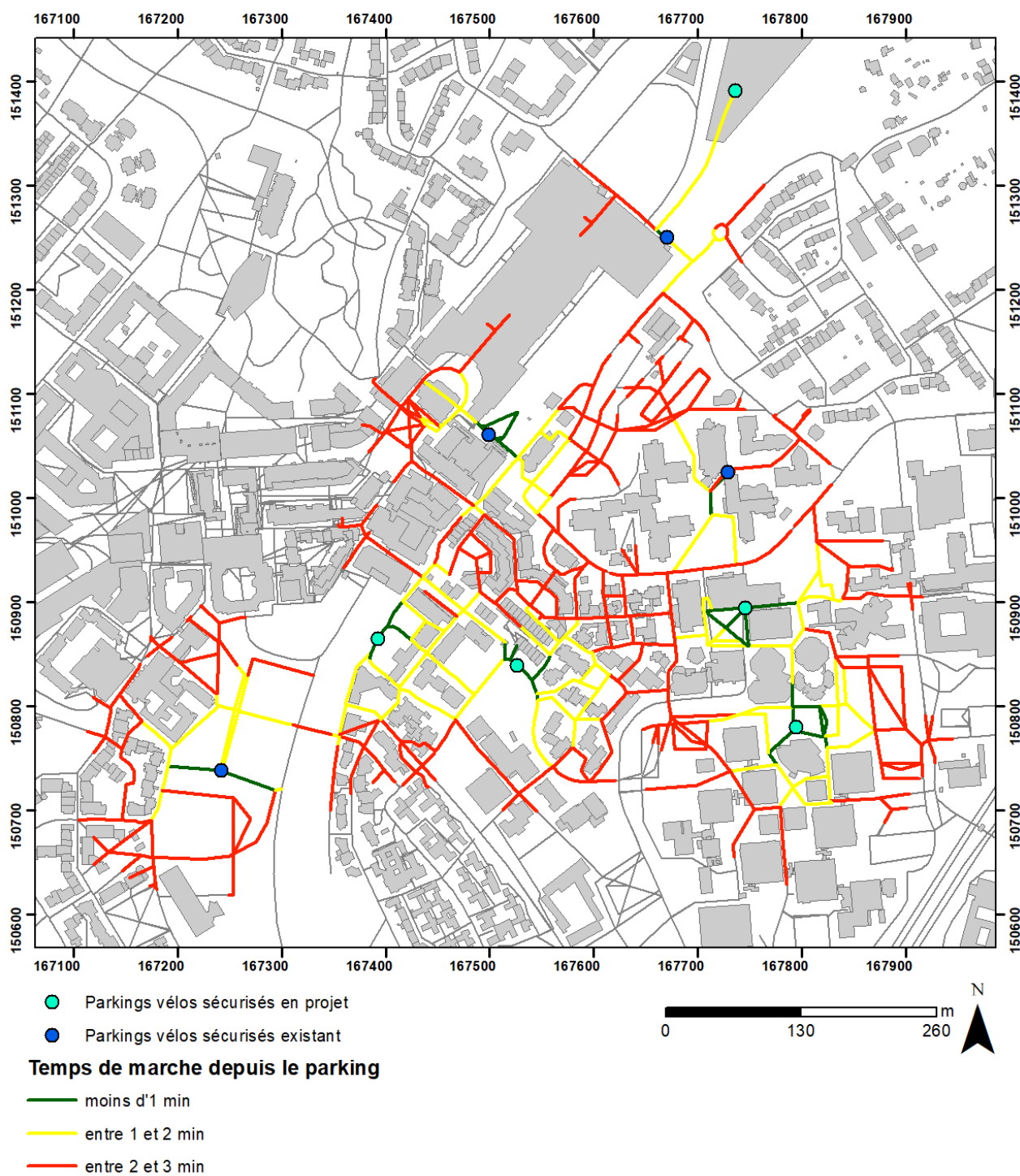


FIGURE 7.4 – Aire de chalandise pédestre des parkings vélos sécurisés de Louvain-la-Neuve, situation projetée

3.3 Proposition d'aménagements

Le quartier de l'Hocaille abrite également des auditoriums et des bibliothèques ; y installer des abris à vélos sécurisés serait pertinent. Le centre sportif du Blocry (CSB) attire des visiteurs bien au-delà des limites communales (PCM de Louvain-la-Neuve, 2020) ; il est estimé que près de 80 % du public se rend au CSB en voiture (hors étudiants). Ce choix est renforcé par l'éloignement de la gare SNCB, l'inadéquation de l'offre de bus par rapport à la demande et le manque d'infrastructures cyclables (notamment des parkings sécurisés et des accès cyclables) dans le quartier du Blocry. Ces deux quartiers sont relativement éloignés des gares TEC et SNCB (à peu près 19 minutes à pied).

L'ajout de ses deux parkings sécurisés augmenterait la part du réseau piétonnier situé à 3 minutes maximum d'un parking vélos (18,5 % du piétonnier, figure 7.5).

Il pourrait être plus intéressant pour les étudiants et professeurs de se rendre en vélo à ces deux parkings en partant de la gare d'Ottignies. Nous avons comparé les temps de parcours pour un sportif Ottintois se rendant au CSB via deux trajets différents :

- en prenant le train à Ottignies et en continuant à pied depuis la gare de Louvain-la-Neuve,
- en prenant le train à Ottignies et en continuant en vélo depuis la gare de Louvain-la-Neuve,
- en prenant son vélo directement depuis la gare d'Ottignies.

Le résultat des simulations est le suivant :

- le trajet en train entre Ottignies et Louvain-la-Neuve dure 8 min (coût sans aucune réduction : 2,40 €) et le trajet entre la gare de Louvain-la-Neuve et le CSB dure 19 min à pied ce qui donne un temps de parcours total de *27 min* (1,38 km de marche) ;
- le trajet en train entre Ottignies et Louvain-la-Neuve dure 8 min (coût sans aucune réduction : 6,40 €) et le trajet entre la gare de Louvain-la-Neuve et le CSB dure 6 min en vélo ce qui donne un temps de parcours total de *14 min* ;
- le trajet entre la gare d'Ottignies et le CSB en vélo est long de 3,6 km. Ce qui correspond à un temps de parcours de *16 min en vélo électrique*.

Le cycliste descendant du train à Ottignies pour se rendre au Centre sportif du Blocry gagnerait jusqu'à 20 min sur son trajet par rapport à un piéton qui descendrait du train à Louvain-la-Neuve en continuant à pied. De même qu'un étudiant se rendant Place de Coubertin gagnerait 12 min sur son trajet en suivant la même logique. Le cycliste qui démarrerait de la gare de Louvain-la-Neuve gagnerait encore 4 min sur son aller-retour, mais devrait payer un supplément au transport de son vélo dans le train. Les autorités communales auraient intérêt à se pencher sur la sécurisation de cette connexion entre les deux villes.

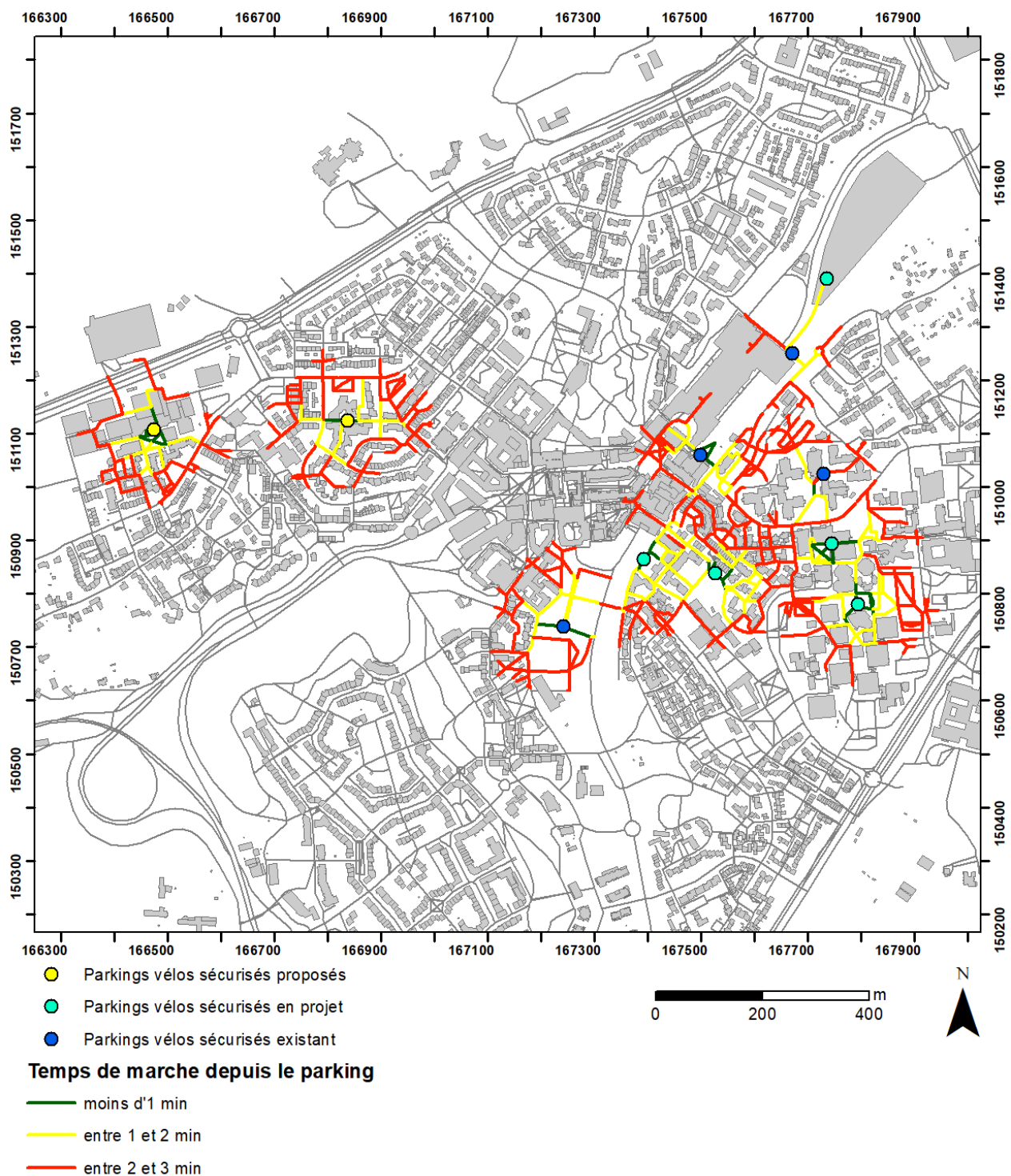


FIGURE 7.5 – Aire de chalandise pédestre des parkings à vélos sécurisés de Louvain-la-Neuve, existants et proposés

CHAPITRE 8

RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

Au cours de ce travail de fin d'études, nous avons créé un modèle de mobilité multimodale vers et dans Louvain-la-Neuve. Une vingtaine d'interviews de cyclistes ont servi à la paramétrisation de la vitesse moyenne des vélos sur le réseau et nous avons validé ce modèle via le générateur d'itinéraires Google maps ainsi que via itinéraires recommandés par l'UCLouvain. Ce travail permet de visualiser l'accessibilité cyclable et cycliste de Louvain-la-Neuve.

En avril 2020, les ventes de vélos ont doublé par rapport à avril 2019 avec une majorité de vélos électriques vendus (Classique 21, 2020). Ceux-ci permettent à tous de rouler sur de longues distances sans effort physique à fournir. Les primes de l'employeur reversées au kilomètre lors de parcours en vélo sur le chemin du travail amortissent cet investissement conséquent (le prix d'un vélo électrique tournant aux alentours de 1500 €). Une personne interrogée avait fait son calcul : en combinant la prime qu'elle percevait et les économies de carburant effectuées, elle rentabilisait son investissement de 2000 € en deux ans.

Louvain-la-Neuve est conçue pour favoriser les piétons, mais il lui est essentiel de s'adapter aux modes doux plus rapides, comme le vélo, pour pouvoir s'étendre tout en conservant son concept originel : que chacun soit à moins de 10 min du centre-ville.

1 Recommandations

Plusieurs recommandations concrètes peuvent être formulées sur base des résultats obtenus dans le cadre de ce mémoire.

1. Le potentiel de transfert modal est déjà présent chez le personnel universitaire : plus de 30 % de celui-ci perdraient moins de 30 min par jour sur leur trajet en devenant cycliste. Pour rappel, il est interpellant de constater qu'en 2017, seuls 4 % des employés de l'Université (site LLN) se rendaient au travail en vélo, la mise en place de politiques volontaristes d'accompagnement au transfert modal augmenterait largement ce ratio. L'université pourrait s'inspirer de la stratégie de l'université de Gand (mettre gratuitement des vélos à disposition). Il peut y avoir plusieurs déclinaisons de ce projet :

- des vélos en location sur le site de Louvain-la-Neuve, gratuit avec la carte d'accès UCL
- possibilité d'achat de vélo électrique à prix réduit pour les employés de l'université
- prêt de vélo à l'année moyennant une caution pour les employés ou étudiants de l'université.

2. Malgré le potentiel de transfert modal du réseau actuel, il est nécessaire d'améliorer les infrastructures en place, celles-ci pénalisent le potentiel comme cela s'est observé lors de la comparaison des aires cyclables et cyclistes. Malheureusement, les aménagements prévus n'améliorent en rien la situation, ces dernières étant encore plus inadaptées et pénalisantes pour les cyclistes.

3. Plus largement que la communauté universitaire, le bassin d'emploi des parcs scientifiques et d'affaires situés autour de Louvain-la-Neuve (dont l'axe parc de Mont-Saint-Guibert) est également concerné, car situé à maximum 15 min en vélo de la gare de Louvain-la-Neuve. Sans apporter d'aménagements supplémentaires sur le réseau actuel, l'entièreté des travailleurs des parcs scientifiques et d'affaires pourrait se rendre sur son lieu de travail en associant le vélo au train.

4. Avec les vélos électriques, une connexion, autrement que par le train, s'envisage entre Ottignies et Louvain-la-Neuve : le choix du vélo électrique faisant gagner 20 min sur le temps de trajet pour se rendre dans le quartier de Blocry. Un système de vélos électriques en location à la gare d'Ottignies renforcerait cette connexion nouvelle entre les deux Villes. L'itinéraire cycliste pourrait également être sécurisé par la mise en place du concept de "ville 30".

5. Ces propositions n'auront un impact que si la ville améliore le système de parcage de vélos sur son territoire. La grande centralisation entamée avec la création du parking Leclerc et le début

des travaux du parking Croix du Sud diminue l'avantage comparatif du vélo : Louvain-la-Neuve manque cruellement de parkings sécurisés bien placés.

2 Pistes d'amélioration du modèle

Dans cette section, nous énoncerons les améliorations à réaliser pour augmenter la portée de ce mémoire.

- Intégrer les voyages en train dans l'étude multimodale, ce qui permettrait donc de calculer une aire de chalandise multimodale vélo et train.
- Distinguer le mode vélo classique du mode vélo électrique pour toucher un public plus large.
- Intégrer les pentes comme contrainte aux modes actifs : cette hypothèse étant un paramètre influençant les résultats. La variation de vitesse des piétons en fonction de la pente a déjà été déterminée dans un précédent mémoire (Ruyssen, 2006), il faudrait obtenir les mêmes estimations valides pour les vélos électriques (et vélos classiques si ceux-ci étaient intégrés au modèle).
- Considérer la disponibilité actuelle des places de parking à Louvain-la-Neuve : ce problème a amené la Ville et l'Université à rendre certains parkings payants (dans le but d'assurer une disponibilité d'emplacement aux employés ou résidents). Dans ce travail, les parkings sont tous considérés comme gratuit et disposant de places libres, ce qui ne reflète pas la situation actuelle.

3 Perspectives et conclusions

Ce travail est justifié par la vision FAST du Gouvernement wallon et c'est aux entités décentralisées de mettre en œuvre les mesures nécessaires à l'atteinte de ces objectifs de transfert modal.

Le modèle et les résultats de simulations présentés dans ce travail indiquent à la Ville d'Ottignies - Louvain-la-Neuve les effets de diverses mesures : installations de parkings, aménagement de VEC, implantation du réseau RER... Néanmoins, la Ville n'est pas la seule à qui ce mémoire pourrait être un outil d'aide à la décision : L'UCLouvain a également un rôle dans l'aménagement de Louvain-la-Neuve, via son Plan de Déplacement d'Entreprise puisque les chiffres de population présentés au chapitre 6 démontrent que le réseau cyclable actuel permet à plus de 30 % de ses employés sur site de réaliser un transfert modal acceptable vers le vélo.

De plus, favoriser la cyclabilité de Louvain-la-Neuve et de ses accès permettrait à la ville de s'agrandir tout en conservant sa philosophie originelle : "*une Ville à taille humaine*". Par exemple, le projet d'écoquartier Athéna-Lauzelle se situe au nord de la rocade extérieure et, sans une amélioration de l'accessibilité cyclable de la ville, ne serait pas en accord avec la volonté

des créateurs de Louvain-la-Neuve (que chaque habitation se trouve à moins de 10 minutes du centre-ville).

Il n'appartient qu'aux décideurs de rendre sa compétitivité au vélo. Les infrastructures et aménagements étudiés ici ont souvent montré que l'utilisation du vélo était pénalisée : rond-point de la Planche à voile, parking Leclerc, parking de Courbevoie. Autant d'investissements qui étaient censés améliorer la vie des cyclistes et qui ne font que renforcer la suprématie de la voiture. Finalement, la Ville et l'UCLouvain veulent-elles réellement assurer un transfert modal ou assurer une politique de façade ? Les prochains aménagements prévus nous le diront.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Amblard, F., & Phan, D. (2006). *Modélisation et simulation multi-agents : application pour les sciences de l'homme et de la société*. Paris, France : Hermès Science publications ; Lavoisier.

Ambrosino, Daniela et Anna Sciomachen (2014). "An algorithmic framework for computing shortest routes in urban multimodal networks with different criteria". *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 108, p. 139-152.

Anwar, A.H.M. Mehbub et Jie Yang (2017). "Examining the Effects of Transport Policy on Modal Shift from Private Car to Public Bus". *Procedia Engineering* 180. International High-Performance Built Environment Conference – A Sustainable Built Environment Conference 2016 Series (SBE16), iHBE 2016, p. 1413-1422. issn : 1877-7058. doi : <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.304>. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817318118>.

Asgari Fereshteh ans Sultan, Alexis et al. (2016). "CT-Mapper : Mapping sparse multimodal cellular tra- jectories using a multilayer transportation network". *Computer Communications* 95. Mobile Traffic Analytics, p. 69-81. issn : 0140-3664. doi : <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2016.04.014>. url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366416301517>.

Bielli, Maurizio, Boulmakoul, Azedine, & Mouncif, Hicham (2006). Object modeling and path computation for multimodal travel systems. *European Journal of Operational Research*, 175, 1705-1730.

Blom, J.A., 1982. *Employment Locations and Mode Choice (Werkge- legenheidslokaties en vervoerwijzekeuze)*. Ministry of Transport, Public Works and Water Management (PbIVVS), The Netherlands, (in Dutch).

Čertický, Michal et al. (2015). "Fully Agent-based Simulation Model of Multimodal Mobility in European Cities". *Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems (MT-ITS)*, p. 229-236. doi : 10.1109/MTITS.2015.7223261.

Clauss, Thomas et Sebastian Döppe (2016). "Why do urban travelers select multimodal travel options : A repertory grid analysis". *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 93, p. 93-116. issn : 0965-8564. doi : <https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.08.021>.
url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856416307571>.

Codecá, Lara et Jérôme Härrí (2017). "Towards multimodal mobility simulation of C-ITS : The Monaco SUMO traffic scenario". *2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, p. 97-100. doi : 10.1109/VNC.2017.8275627.

D'Andrea, R. et al. (2016). "Quelle mobilité pour une ville en transition ?"

Dib, Omar, Marie-Ange Manier et Laurent Moalic (2016). "Advanced modeling approach for computing multicriteria shortest paths in multimodal transportation networks". *2016 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, p. 40-44. doi : 10.1109/ICITE.2016.7581304.

Frank, L.D., Pivo, G. (1994). Impacts of mixed use and density on utilization of three modes of travel : single-occupant vehicle, transit, and walking. *Transportation Research Record* 1466, 44-52.

Grimm V. (1999). "Ten years of individual-based modelling in ecology : what we have learned and what could we learn in the future", *Ecological Modelling*, vol 115, p. 129-148. Hart, Peter E., Nils J. Nilsson et Bertram Raphael (1968). "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths". *IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics* 4.2, p. 100-107. doi : <http://dx.doi.org/10.1109/TSSC.1968.300136>.

Heinen, Eva et Giulio Mattioli (2019). "Multimodality and CO2 emissions : A relationship moderated by distance". *Transportation Research Part D : Transport and Environment* 75, p. 179-196. issn : 1361-9209. doi : <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.022>.
url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136192091930118X>.

Ibisch, Pierre & Hoffmann, Monika & Kreft, Stefan & Peter, Guy & Kati, Vassiliki & Biber-Freudenberger, Lisa & Dellasala, Dominick & Vale, Mariana & Hobson, Peter & Selva, Nuria. (2016). A global map of roadless areas and their conservation status. *Science*. 354. 1423-1427.

10.1126/science.aaf7166.

Innocente, Florian (2018, septembre 5). A pied ou à vélo, Google Maps vous dit si ça va monter ou descendre. Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse <https://www.igen.fr/app-store/2018/09/pied-ou-velo-google-maps-vous-dit-si-ca-va-monter-ou-descendre-105123>

Jourjon, François (2012). « Comment estimer votre vitesse moyenne de marche en randonnée ? » [archive], sur Randonner Malin. Kibambe Lubamba, Jean-Paul (2012). "Multimodal accessibility modeling from coarse transportation networks in Africa". *International Journal of Geographical Information Science* 27.5, p. 1005-1022.
doi : 10.1080/13658816.2012.735673.

Klinger, Thomas (2017). "Moving from monomodality to multimodality? Changes in mode choice of new residents". *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 104, p. 221-237.
issn : 0965-8564. doi : <https://doi.org/10.1016/j.tra.2017.01.008>.
url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856416302956>.

Krygsman, Stephan, Dijst, Martin, & Arentze, Theo (2004). Multimodal public transport : an analysis of travel time elements and the interconnectivity ratio. *Transport Policy*, 11, 265-275.

RTBF (2019). La mobilité " multimodale " loin de convaincre les Belges, selon une étude de la Febiac. Consulté le 5 janvier 2020, à l'adresse https://www.rtb.be/info/societe/detail_la-mobilite-multimodale-loin-de-convaincre-les-belges-selon-une-etude-de-la-febiac?id=10123988

Ladeveze, M. (2019, novembre 26). La Région wallonne veut cinq autoroutes pour vélos vers Bruxelles. Consulté le 15 mai 2020, à l'adresse <https://www.dhnet.be/actu/belgique/la-region-wallonne-veut-cinq-autoroutes-pour-velos-vers-bruxelles-5ddd2198d8ad58130db81ca0>

Le Moigne (1977). "La théorie du système général - Théorie de la modélisation". Presses Universitaires de France.

Le RER vélo. (s. d.). Consulté le 15 mai 2020, à l'adresse <https://mobilite-mobiliteit.brussels/fr/se-deplacer/velo/le-rer-velo>

Leurquin , U. (2016). Analyse quantitative de l'accessibilité multimodale en Région bruxelloise par modélisation des réseaux présents et à venir . Louvain-la-Neuve, Belgique : Université Catholique de Louvain.

Mehdizadeha, Milad, Mohsen Fallah Zavarehb et Trond Nordfjaernc (2019). "Mono- and multi-modal green transport use on university trips during winter and summer : Hybrid choice models on the norm-activation theory". *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 130, p. 317-332. issn : 0965-8564.

doi : <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.046>.

url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856419305324>.

Miller, H. J., & Shaw, S. (2001). *Geographic Information Systems for Transportation : Principles and Applications (Spatial Information Systems)* (1re éd.). Oxford, Royaume-Uni : Oxford University Press.

Mocnik, F.-B., Zipf, A., & Raifer, M. (2017). The OpenStreetMap folksonomy and its evolution. *Geo-spatial Information Science*, 20(3), 219-230. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1368193>

rtbf. (2012, juillet 12). Les itinéraires pour vélo désormais disponibles dans Google Maps. Consulté le 17 avril 2020, à l'adresse https://www.rtbf.be/info/medias/detail_les-itineraires-pour-velo-desormais-disponibles-dans-google-maps?id=7803988

rtbf. (2019, janvier 21). La mobilité « multimodale » loin de convaincre les Belges, selon une étude de la Febiac. Consulté le 6 mars 2020, à l'adresse https://www.rtbf.be/info/societe/detail_la-mobilite-multimodale-loin-de-convaincre-les-belges-selon-une-etude-de-la-febiac?id=10123988

Salonen, Maria et Tuuli Toitoven (2013). "Modelling travel time in urban networks : comparable measures for private car and public transport". *Journal of Transport Geography* 31, p. 143-153. issn : 0966-6923. doi : <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2013.06.011>.
url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096669231300121X>.

sdworx. (2018, 17 septembre). Un Belge sur sept consacre plus de deux heures par jour à ses trajets domicile - lieu de travail. Consulté 8 juin 2020, à l'adresse <http://sdworx.be/nl-be:%7E:text=Aujourd'hui%2C%2015%20%25%20des,qui%20fait%201h20%20aller-retour>.

Spickermann, Alexander, Volker Grienitzb1 et Heiko A. von der Gracht (2014). "Heading towards a multi- modal city of the future? : Multi-stakeholder scenarios for urban mobility". *Technological Forecasting and Social Change* 89, p. 201-221. issn : 0040-1625. doi : <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.08.036>.
url : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162513002217>.

Stahl Olafsson, Anton, Thomas Sick Nielsen et Trine Agervig Carstensen (2016). "Cycling

in multimodal transport behaviours : Exploring modality styles in the Danish population”.
Journal of Transport

Van Peel, Hugues (2018). "Un nouvel échangeur pour supprimer les bouchons au carrefour de la N4 et de la N25". rtbf. Consulté à l'adresse https://www.rtb.be/info/regions/brabant-wallon/detail_un-nouvel-echangeur-pour-supprimer-les-bouchons-au-carrefour-de-la-n4-et-de-la-n25?id=9937634

Willaume, G. (2019, août 8). L'essor des autoroutes pour vélo. Consulté le 15 mai 2020, à l'adresse <https://www.cyclable.com/blog/2017/11/15/lessor-des-autoroutes-pour-velo/>

Zheng, N., & Geroliminis, N. (2013). On the distribution of urban road space for multimodal congested networks. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 80, 109-138.

Modélisation de la mobilité multimodale vers et dans Louvain-la-Neuve - perspectives d'aménagement

La crise sanitaire liée au COVID-19 de 2020 a chamboulé les habitudes de mobilité de la société. Frileux à l'idée de se rassembler dans les transports en commun, mais attentifs à l'empreinte écologique, les navetteurs semblent se tourner vers le vélo, compromis idéal entre individualité et écologie. Cette tendance se confirme au vu du nombre de ventes de vélos qui a doublé au mois d'avril 2020 par rapport à l'an dernier.

Ce mémoire étudie les aménagements cyclistes dans et autour de Louvain-la-Neuve dans le but de fournir un outil d'analyse des aménagements à améliorer ou à prévoir. Le réseau élaboré pour répondre à cet objectif a été paramétré de manière à correspondre aux choix des utilisateurs du réseau, ce qui le différencie des planificateurs d'itinéraires classiques.

Les simulations démontrent que les aménagements actuels et prévus ne favorisent pas l'utilisation du vélo, rallongent le temps de trajet des cyclistes et les forcent à abandonner leur vélo loin de leur destination. Les résultats obtenus dans ce mémoire montrent d'une part que plus de 30 % des employés UCLouvain sur site LLN perdraient maximum 15 min sur leur trajet domicile-travail en empruntant un vélo plutôt que la voiture. Et, d'autre part, que l'ensemble de parcs scientifiques et d'affaires situés autour de Louvain-la-Neuve se trouve à un quart d'heure en vélo de la gare.

La création de ce modèle et les résultats de ses différentes simulations donnent des arguments percutants pour l'amélioration de l'accessibilité cyclable des Villes et fournit un outil utile pouvant servir à d'autres agglomérations.

Stinglhamber Barbara
Juin 2020