



**HAL**  
open science

# Extraction des déterminants de l'utilité perçue des déplacements à vélo à partir de données GPS, application aux cas de Lyon et Bordeaux

Noé Fillon

► **To cite this version:**

Noé Fillon. Extraction des déterminants de l'utilité perçue des déplacements à vélo à partir de données GPS, application aux cas de Lyon et Bordeaux. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2024. dumas-04938834

**HAL Id: dumas-04938834**

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04938834v1>

Submitted on 10 Feb 2025

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



# Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

---

Année 2023-2024

Voie d'approfondissement :  
Transports

Soutenu le 9 septembre 2024

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Manon Seppecher
- Maître de TFE [ou Tuteur] : Bastien Guichardaz
- Expert : Sébastien Pabion

Par

**Noé Fillon**

**Extraction des déterminants de l'utilité perçue des déplacements à vélo à partir de données GPS, application aux cas de Lyon et Bordeaux.**

**Organisme d'accueil  
PTV Mobility France**

# Notice analytique

AUTEUR			
Nom	Noé		
Prénom	Fillon		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	PTV Mobility France, Lyon 3 <sup>ème</sup> arrondissement		
Nom du Tuteur	Bastien Guichardaz		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Extraction des déterminants de l'utilité perçue des déplacements à vélo à partir de données GPS, application aux cas de Lyon et Bordeaux.		
Titre (anglais)	Extraction of the perceived utility of bicycle trips from GPS data, application on the cases of Lyon and Bordeaux.		
Résumé (français)	<p>Alors que la place du vélo en tant que mode de transport est de plus en plus importante et que les pouvoirs publics cherchent à encourager et accompagner son développement, des prévisions de trafic plus fiables sont nécessaires. Des traces GPS récoltées auprès de cyclistes permettent d'étudier les vitesses pratiquées ainsi que leurs préférences en termes d'aménagements. On observe que les cyclistes circulent généralement le plus vite sur les couloirs de bus partagés et les bandes cyclables. Toutefois, ce sont les pistes cyclables qu'ils choisissent préférentiellement dans leurs choix d'itinéraires. L'estimation de tels modèles peut permettre d'améliorer les prévisions de trafic vélo par les modèles à quatre étapes.</p>		
Résumé (anglais)	<p>While bicycle is increasingly more popular as a mode of transportation and local governments want to encourage and follow its development, more reliable travel demand forecast is necessary. GPS tracks gathered from cyclists make it possible to study their speed and their preferences in terms of road layout. We notice that cyclists circulate generally faster on unprotected bike lanes and shared bus lanes, meanwhile they rather choose protected bike lanes or paths for their route choice. Estimating such modes makes it possible to improve bike traffic forecast by four step models.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Vélo, modèle à quatre étapes, choix modal, utilité, vitesse		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Bike, four step model, mode choice, utility, speed		
Termes géographiques (français)			
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	61	4	45

# Déclaration de travail personnel

---

Je déclare que ce rapport constitue l'aboutissement d'un travail personnel et ne peut être suspecté de plagiat.

Le travail présenté distingue explicitement ce que j'ai produit de ce que j'ai emprunté à d'autres. A ce titre, les citations sont clairement identifiables et les sources (écrits, images) qui ont alimenté ma réflexion sont référencées.

# Sommaire

---

Notice analytique .....	2
Déclaration de travail personnel.....	3
Sommaire.....	4
Liste des illustrations.....	6
Liste des tableaux.....	7
Liste des abréviations.....	8
1. Introduction.....	9
2. Etat de l'art : les modèles à quatre étapes et la représentation du vélo.....	12
2.1 Les modèles à quatre étapes.....	12
2.1.1 Les données d'entrée et leur représentation.....	13
2.1.2 Les étapes de la simulation.....	15
2.2 Les modèles de choix discret.....	17
2.2.1 Introduction.....	17
2.2.2 Théorie de l'utilité aléatoire.....	17
2.2.3 Partie déterministe de l'utilité.....	18
2.2.4 Distribution du terme aléatoire.....	18
2.2.5 Application aux modèles de déplacement.....	19
2.3 Le vélo dans les modèles de déplacements des agglomérations lyonnaise et bordelaise.....	19
2.3.1 L'utilité du choix modal.....	19
2.3.2 Le temps généralisé.....	20
2.3.3 Perspectives d'amélioration.....	21
3. Fiabilisation des vitesses.....	23
3.1 Etat de l'art sur l'estimation des vitesses des cyclistes.....	23
3.1.1 Des données qui ne correspondent pas au besoin.....	23
3.1.2 Plusieurs méthodes de mesure non équivalentes.....	23
3.1.3 Modéliser la vitesse à partir de données GPS : les méthodes employées dans la recherche.....	25
3.2 Sources de données.....	26
3.3 Mise en forme des données.....	27
3.3.1 Importation des indicateurs Géovélo sur le réseau OSM – « Map-matching ».....	27
3.3.2 Altitudes et pentes.....	28
3.3.3 Sinuosité.....	29
3.3.4 Densité et longueur de tronçon.....	30
3.3.5 Aménagement cyclable et catégorie de voie.....	30
3.3.6 Résumé des filtrages.....	33

3.4	Description de la base des données finale .....	34
3.5	Estimation d'un modèle linéaire par morceaux de la vitesse vélo .....	35
3.6	Discussion .....	37
3.6.1	Discussion des résultats .....	37
3.6.2	Prédiction et erreur .....	39
3.6.3	Application à un modèle à quatre étapes.....	41
3.6.4	Limites des hypothèses de la modélisation .....	42
4.	Sécurité et confort – préférence pour les aménagements cyclables .....	45
4.1	Introduction .....	45
4.2	Données à disposition .....	46
4.3	Assemblage des données.....	47
4.3.1	Définitions .....	47
4.3.2	Filtrages .....	47
4.3.3	Association au réseau – Map-matching .....	48
4.3.4	Discontinuités.....	48
4.3.5	Alternatives .....	49
4.3.6	Description des données .....	50
4.4	Modélisation des choix d'itinéraire .....	52
4.4.1	Le modèle logit path-size .....	52
4.5	Résultats.....	54
5.	Mise en perspective .....	55
5.1	Expression de l'utilité des itinéraires .....	55
5.2	Articulation modèle de vitesse - modèle d'utilité .....	56
5.3	Application de l'étude aux MQE .....	56
5.4	Elargissement .....	56
6.	Conclusion .....	57
7.	Références.....	58
	Annexes .....	62

# Liste des illustrations

---

- Fig. 2.1 : Structure d'analyse des systèmes de transport de Manheim/Florian. Source : (McNally 2007) en référence à (Manheim 1979) et (Florian, Gaudry, et Lardinois 1988)
- Fig. 2.2 : Résumé schématique du modèle à quatre étapes. Source : (McNally 2007)
- Fig. 2.3 : Décomposition de la fonction d'utilité du choix modal pour le MMM (a) et MODEL Y (b)
- Fig. 3.1 : Intersection (en rouge) entre un tronçon (en noir) et la zone tampon d'un PDI GV (en vert). La longueur  $l$ , égale à la largeur de zone tampon et représentée en rouge est donc comptée dans le ratio de recouvrement alors qu'intuitivement, le PDI et le tronçon ne sont clairement pas liés.
- Fig. 3.2 : Deux tronçons du réseau OSM : (a) Route des Crêtes, Saint-Cyr-au-Mont-d'Or,  $S_t=0,49$ ,  $L_t=470$  m, (b) Rue Pierre Semart, Lyon 7<sup>ème</sup> arrondissement.  $S_t=0,49$ ,  $L_t=251$  m.
- Fig. 3.3 : Chemin de la Poste, Décines-Charpieu,  $S_t=4$ ,  $L_t=337$  m.
- Fig. 3.4 : Répartition par catégorie de voie des tronçons dans chaque catégorie d'aménagement cyclable. Les deux variables ne sont pas indépendantes et sont parfois même redondantes.
- Fig. 3.5 : Résumé des filtrages effectués sur la base des tronçons avant calage d'un modèle de vitesse
- Fig. 3.6 : Répartition des vitesses dans la base séparée
- Fig. 3.7 : répartition des tronçons par modalité pour la variable  $am\_hwy$
- Fig. 3.8 : exemple de croissance linéaire par morceaux
- Fig. 3.9 : Localisation des tronçons traversant une zone à densité comprise entre, de gauche à droite  $40\ 000$  et  $50\ 000\ km^{-2}$ ,  $50\ 000$  et  $60\ 000\ km^{-2}$ , ou supérieure à  $60\ 000\ km^{-2}$
- Fig. 3.10 : Résidus des vitesses (vitesse mesurée - vitesse prédite) sur les tronçons de la base sur laquelle a été entraîné le modèle
- Fig. 4.1 : Résumé des filtrages effectués sur les traces avant analyse des itinéraires
- Fig. 4.2 : distribution par longueur des chemins parcourus
- Fig. 4.3 : Choix d'itinéraires et indépendance des alternatives. Source : (Ben-Akiva et Bierlaire 1999)

# Liste des tableaux

---

- Tableau 3.1 : description des types d'aménagement cyclables
- Tableau 3.2 : description de la catégorisation OSM des voies
- Tableau 3.3 : modalités de am\_hwy (cœur du tableau) en fonction de la catégorisation OSM des voies (lignes) et du type d'aménagement cyclable (colonnes)
- Tableau 3.4 : Résumé de la distribution des variables quantitatives dans la base séparée
- Tableau 3.5 : Résultats de l'estimation du modèle linéaire par morceau de vitesse vélo.
- Tableau 3.6 : Estimation du modèle linéaire simplifié mis en œuvre dans MODEL Y (modalité AM de référence : « none » : pas d'aménagement)
- Tableau 4.1 : Description et fréquence des catégories d'aménagements cyclables dans le réseau girondin (une voie à double-sens est comptée une fois pour chaque sens)
- Tableau 4.2 : Jeux de coefficients (colonnes) utilisés dans la fonction de coût favorisant (<1) ou pénalisant (>1) les tronçons en fonction de leur aménagement, lors de la génération des alternatives 1 à 4 pour chaque OD
- Tableau 4.3 : Répartition des éléments de chemin parcourus par type d'aménagement
- Tableau 4.4 : moyenne de l'écart en points de pourcentage de chaque grande catégorie d'aménagement entre tous les chemins générés et le chemin choisi pour l'OD (première colonne) et entre les chemins générés plus courts que le chemin choisi et le chemin choisi

# Liste des abréviations

---

- ADMA : académie des mobilités actives
- BC : bande cyclable
- CBV : couloir bus-vélo
- CVCB : chaussée à voie centrale banalisée (ou chaussidou)
- DSC : double-sens cyclable
- DSC NM : double-sens cyclable non-matérialisé
- DT : demi-tour
- EMC<sup>2</sup> : enquête mobilités certifiée Cerema
- GV : Géovélo
- IGN : Institut national de l'information géographique et forestière
- MCD : modèle de choix discret
- MMM : Modèle multimodal métropolitain (modèle à quatre étapes développé pour l'aire métropolitaine bordelaise)
- MN : mouvement au noeud
- MNT : modèle numérique de terrain
- MODEL<sup>Y</sup> : modèle à quatre étapes développé pour l'aire métropolitaine lyonnaise
- MPV : aménagement mixte piétons-vélos hors voies vertes
- MQE : modèle à quatre étapes
- OD : paire origine-destination
- OSM : OpenStreetMap
- PC : piste cyclable
- RMSE : root mean square error – racine carrée de l'erreur quadratique moyenne
- TAD ou D : mouvement de tourne à droite
- TAG ou G : mouvement de tourne à gauche
- TD : mouvement tout-droit
- VAE : vélo à assistance électrique
- Vélo'v : service de vélo en libre-service dans l'agglomération lyonnaise
- VR : vélo-rue
- VSA : vélo sans assistance
- VV : voie verte

# 1. Introduction

Pendant plusieurs décennies, le vélo a été un mode de déplacement peu utilisé dans les villes françaises, en témoigne le cas de la Métropole lyonnaise, où la part modale du vélo a stagné à 1,7% entre 2006 et 2015 (Enquête déplacements 2015 - agglomération Lyonnaise 2016). Cependant depuis, les compteurs vélo disposés sur le territoire métropolitain indiquent une forte augmentation de la pratique de ce mode de transport.

Ce développement est également observé au niveau national. Ainsi d'après Vélo & Territoires, la fréquentation des compteurs vélo en France a augmenté de 37% entre 2019 et 2023. La tendance est particulièrement marquée en milieu urbain où sur la même période, la hausse de fréquentation atteint 40% (7% entre 2022 et 2023), alors qu'en milieu périurbain et rural, elle n'est que de respectivement 22% et 26%, et en stagnation depuis 2022 (Borré 2024). Plus particulièrement, dans la Métropole bordelaise, l'enquête mobilité de 2021 (Bouleau et al. 2023) annonce une hausse de 124% du nombre de déplacements à vélo entre 2009 et 2021, la part modale passant ainsi de 4% à 8%, pour les habitants de la Métropole. Une fois de plus, cette tendance n'est pas observée chez les habitants de la Gironde hors du territoire métropolitain. Pour ces deniers, la part modale du vélo est stable, à 2%.

Le développement de la pratique a notamment pu être catalysé par la pandémie de Covid-19, pendant laquelle ce mode a été fortement encouragé par les pouvoirs publics afin de pouvoir éviter la promiscuité des transports en commun sans plus encombrer le réseau routier. Cependant il peut aussi être associé par exemple à la démocratisation du vélo à assistance électrique ou encore à des changements sociétaux plus profonds, dont une conscience environnementale accrue avec en conséquence la volonté de faciliter le recours à des alternatives aux modes de déplacement polluants.

Dans la planification de l'aménagement urbain et des infrastructures de transport, les institutions publiques s'appuient sur des modèles de déplacements permettant d'éclairer les décisions en la matière. Ces modèles sont le plus souvent des modèles « à quatre étapes » (MQE) et se basent sur les données socio-démographiques ainsi que sur les enquêtes mobilité du territoire étudié pour prédire :

- le nombre de déplacements (génération) ;
- l'appariement origine-destination de ces déplacements (distribution) ;
- la répartition de ces déplacements par mode (choix modal) ;
- les itinéraires empruntés (affectation) et par conséquent, la charge sur le réseau de transport.

Aux étapes de distribution et de choix modal, pour comparer les alternatives, on s'appuie sur des fonctions d'utilité (parfois aussi appelées fonctions de coût) définies pour chaque mode de déplacement. L'utilité d'un déplacement avec un mode permet de prévoir la répartition des déplacements entre les alternatives. La quantification de cette utilité est donc un point essentiel pour prévoir de manière fiable le nombre de déplacements entre une origine et une destination par mode.

Dans le contexte où certains de ces modèles ont été développés, le vélo n'occupait qu'une part faible des déplacements et de l'attention. Peu de déplacements à vélo étaient représentés dans les enquêtes mobilités, et peu d'aménagements cyclables l'étaient sur les réseaux de transport. A défaut de plus de données et en sans réel besoin d'une plus grande précision, le temps de trajet est, pour beaucoup de modèles la seule variable utilisée dans le calcul de l'utilité d'un déplacement à vélo. Ce temps de trajet est basé sur des hypothèses de vitesse, souvent non

vérifiées empiriquement. Ainsi dans le modèle de déplacements lyonnais, la vitesse de déplacement des cyclistes a été fixée à 14 km/h dans les scénarios actuels et 16 km/h dans les scénarios futurs, sans que ces hypothèses ne soient appuyées par des données.

Par ailleurs, en se contentant d'une vitesse constante, les modifications de l'infrastructure ne peuvent, selon le modèle, influencer sur la pratique du vélo que si elles impactent la longueur d'un trajet. Or d'après l'Enquête sur les pratiques environnementales des ménages de 2016 (notre-environnement 2024), (EPEM 2016), 25% des français sondés citent des « Pistes cyclables plus nombreuses et plus sécurisées » comme facteur qui pourrait les inciter à utiliser davantage le vélo. D'après une enquête de l'Observatoire du rapport des français au vélo, réalisée en 2022 (Descarrega et Crozet 2023), 61% des non-cyclistes déclarent avoir peur d'utiliser le vélo pour les trajets du quotidien. A la lumière de ces résultats, la sécurité et l'accès aux aménagements cyclables semblent donc être des éléments déterminants dans l'attractivité du vélo.

Dans l'exemple du modèle lyonnais, afin de reproduire l'effet des aménagements cyclables sur le volume de déplacements à vélo, un « bonus de cyclabilité » est ajouté à la vitesse physique, diminuant le temps de trajet sur les tronçons présentant des aménagements cyclables afin de rendre le vélo plus attractif sur les itinéraires les plus équipés. Ce bonus doit refléter l'impact des aménagements en termes de confort et de sécurité sur le coût perçu d'un déplacement à vélo. Cependant, construit de telle manière, cet apport en termes d'utilité n'est pas clairement distingué du temps de trajet réel, et surtout, peu de données peuvent appuyer les hypothèses faites concernant la valeur de ce bonus.

Deux enjeux principaux se dégagent donc de la situation décrite : la fiabilisation des valeurs de temps de trajet en tant que déterminant principal de l'utilité des déplacements à vélo dans les modèles actuels, ainsi que la mise en évidence d'autres déterminants de cette utilité qui pourraient se révéler avoir autant d'importance que le temps de trajet, particulièrement le sentiment de sécurité amené par les aménagements cyclables.

Les nouvelles technologies de l'information peuvent être d'une grande aide face aux enjeux soulevés, permettant de générer de grandes quantités de données de mobilités jusqu'alors inaccessibles. En particulier, il est possible d'accéder au détail des trajets des individus via les données de localisation des smartphones. L'exploitation de traces GPS peuvent alors permettre d'analyser les comportements des cyclistes et d'en induire certains déterminants.

Afin de mieux planifier les infrastructures cyclables pour permettre d'encourager et d'accompagner le développement de ce mode de transport, les Métropoles de Lyon et Bordeaux cherchent à fiabiliser les prévisions concernant les déplacements à vélo principalement par le biais d'études des vitesses pratiquées par les cyclistes. Ce travail s'appuiera donc sur deux projets menés au sein de PTV Mobility France, l'un en partenariat avec la Métropole de Lyon, l'autre avec la Métropole de Bordeaux, tous deux ayant pour but de fiabiliser les vitesses pratiquées par les cyclistes avec pour but d'affiner les modèles de déplacements concernant le vélo, principalement par le biais d'une estimation plus fine de leur vitesse à partir de données GPS.

Au fil de ce travail nous tenterons donc de répondre à la problématique suivante : **Comment l'analyse de traces GPS de déplacements effectués à vélo peut permettre d'estimer l'utilité des déplacements avec ce mode ?**

Ce document débutera donc par un état de l'art sur les modèles à quatre étapes en théorie et la représentation du vélo dans les modèles étudiés. Ensuite nous verrons dans quelle mesure l'analyse données GPS collectées auprès de cyclistes dans l'agglomération lyonnaise peut permettre d'affiner le calcul du temps de trajet via l'estimation d'un modèle prédictif de la vitesse

des cyclistes. Puis nous étudierons la préférence pour aménagements cyclables en lien avec la sécurité perçue, à travers un modèle de choix d'itinéraire, en nous basant sur des données récoltées dans l'agglomération bordelaise. Finalement, nous apporterons une prise de recul par rapport aux méthodes employées et aux résultats présentés dans une phase de discussion.

## 2. Etat de l'art : les modèles à quatre étapes et la représentation du vélo

### 2.1 Les modèles à quatre étapes

Afin de guider la planification des transports, les modèles à quatre étapes (MQE) sont fréquemment utilisés comme outils d'aide à la décision. Ces modèles permettent en effet d'estimer les flux de déplacements par paire origine-destination (OD) et par mode, ainsi que le niveau d'occupation des axes de transport. Cette section 2.1 s'inspire largement de (McNally 2007), qui décrit de manière plus détaillée le fonctionnement d'un MQE, les hypothèses préalables et leurs limites. La figure 2.1 décrit les interactions entre les systèmes influant sur les déplacements de personnes, introduits par (Manheim 1979) et (Florian, Gaudry, et Lardinois 1988) :

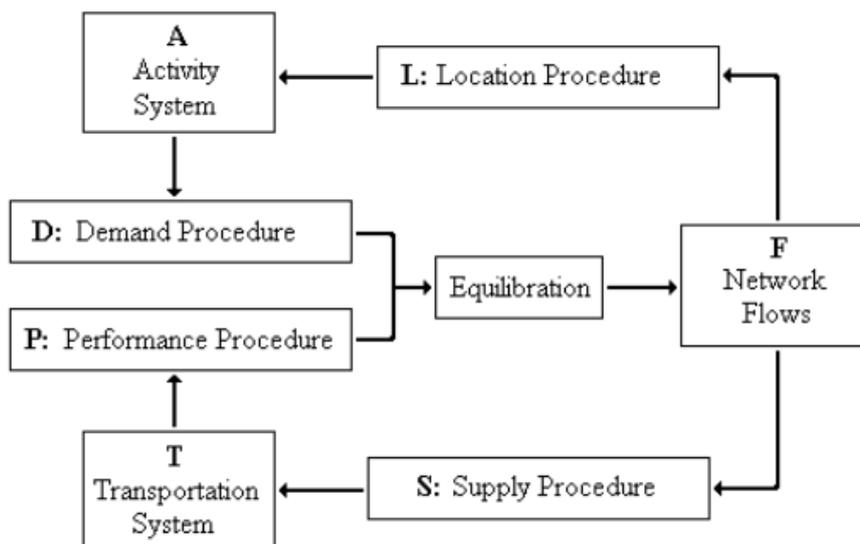


Fig. 2.1 : Structure d'analyse des systèmes de transport de Manheim/Florian. Source : (McNally 2007) en référence à (Manheim 1979) et (Florian, Gaudry, et Lardinois 1988)

Les MQE représentent l'interaction entre le système des activités (noté **A** dans la fig. 2.1), et le système de transport **T**. Le système des activités ou des localisations **A** décrit la distribution spatiale des activités accomplies par la population durant une journée. Il est représenté par les données d'occupation des sols ou encore les données démographiques et socio-économiques par des zones prédéfinies. Le système de transport **T** comprend les réseaux (routes, rail, voies cyclables...), et les services de transport.

Un MQE déduira de ces deux systèmes les flux de transports **F** qui consistent en un équilibre entre le système des activités générant une demande **D** et la performance du système de transport **P** constituant l'offre. Un MQE ne permet en revanche pas de prévoir les évolutions du système des activités (localisation de la population et des activités) (procédure **L**) ou du système de transport (procédure **S**) en fonction des flux de transport **F**. En scénario prospectif, ces évolutions sont prévues par d'autres procédés externes au MQE et fournies comme données d'entrée du modèle.

### 2.1.1 Les données d'entrée et leur représentation

#### Définir le territoire d'étude

En premier lieu, afin de modéliser les déplacements sur un territoire, il est nécessaire de définir ledit territoire d'étude. Les déplacements à l'intérieur de ce territoire seront modélisés de manière complète, tandis que l'extérieur du territoire sera modélisé comme une ou plusieurs zones pour lesquelles on développe un modèle simplifié. On modélise les échanges internes au territoire d'étude, les échanges entre l'intérieur et les zones extérieures, ainsi que les déplacements externes traversant le territoire d'étude, avec un modèle simplifié pour les deux derniers cas (McNally 2007).

#### Le système de transport

Le réseau de transport est représenté sous forme d'un graphe, composé de nœuds et de tronçons. Un nœud correspond à un point géolocalisé représentant généralement une intersection dans le réseau et un tronçon est une ligne ou un segment ou une succession de segments reliant un nœud de départ et un nœud d'arrivée, sans intersection entre les deux et ne pouvant être parcouru que dans un sens (McNally 2007). Ceux-ci présentent différents attributs définissant leur rôle dans le système de transport (modes autorisés, vitesse, capacité...). Le système de transport comprend également les services de transport (McNally 2007), essentiellement les transports en commun, représentés par les tracés des lignes, les localisations des arrêts et les fréquences ou horaires de passage.

#### La représentation en zones du système d'activités

La répartition de la population par groupes (par exemple en séparant les actifs, retraités, étudiants, élèves du primaire...) et des activités est représentée de manière agrégée, par zones. Bien que l'information du territoire qu'elle représente soit conservée dans les modèles étudiés, une zone est modélisée comme un point appelé centroïde de zone, qui concentre l'ensemble de la population et des activités. Le centroïde de zone est relié au réseau de transport, plus précisément aux nœuds, par des connecteurs (McNally 2007). Ceux-ci représentent les tronçons internes à la zone que doit emprunter un individu partant d'un point moyen de cette zone pour rejoindre le réseau. Bien qu'ils ne représentent pas une infrastructure physique particulière, les connecteurs ont en conséquence des caractéristiques similaires aux tronçons, par exemple un ensemble de modes autorisés, une longueur, une vitesse maximale par mode ou une capacité.

En agrégeant l'ensemble des origines ou destinations possible dans une zone en son seul centroïde, on suppose qu'elles sont toutes équivalentes, donc en particulier que le temps nécessaire pour rejoindre chaque nœud du réseau relié par un connecteur ou le temps de marche pour rejoindre les arrêts de transport en commun est homogène dans toute la zone. On préfère donc construire les zones comme des territoires très connexes (au regard du réseau de transport) pour se rapprocher de cette condition. On évite, par exemple, qu'une zone soit située de part et d'autre d'un cours d'eau (Bonnell 2004c).

#### Conséquences de la représentation et hypothèses simplificatrices

Par plusieurs aspects, la représentation du système de transport peut s'avérer complexe. En effet, plusieurs paramètres concernant les tronçons doivent être calés ou faire l'objet d'hypothèses. C'est le cas de la vitesse libre des véhicules, ou encore de la capacité des tronçons. Par ailleurs, pour limiter le temps de calcul, l'écoulement des files d'attente lors d'une congestion

n'est pas représenté dynamiquement dans un modèle à quatre étapes. Le lien entre demande, capacité et temps de parcours est donc réalisé via des courbes débit-vitesse qui constituent des hypothèses simplificatrices du fait de la nature statique de la simulation dans les MQE (Bonnell 2004c). Concernant le vélo, et particulièrement pour ce mode sur lequel la réglementation a moins d'effet, la vitesse pratiquée (qui, particulièrement pour le vélo, ne se calque pas sur la limite de vitesse), le temps d'attente sur les nœuds (temps différent pour tourner à droite, à gauche ou aller tout droit) ou le bonus d'attractivité lié aux aménagements cyclables (souvent représenté en termes de vitesse) constituent tous des paramètres à mesurer ou des hypothèses à formuler.

Quant au découpage des zones, il est d'autant plus critique que les déplacements intra-zonaux ne sont pas modélisés en détail. De même que l'on agrège toutes les origines et destinations de la zone en son centroïde, on détermine également une distance et un temps unique (par mode) pour tous les déplacements internes à une zone (intra-zonaux). Les déplacements intra-zonaux modélisés n'empruntant pas le réseau, leurs caractéristiques deviennent insensibles à une modification de celui-ci. Ce floutage des distances, temps de trajet ou caractéristiques des infrastructures empruntées s'applique particulièrement au vélo, mode plutôt utilisé pour des déplacements courts (environ 1 déplacement à vélo sur 25 mesure moins de 1 km, un peu moins de la moitié mesurent moins de 2 km sur la Métropole bordelaise d'après l'EMC<sup>2</sup> de 2021). Il n'est donc pas forcément pertinent d'accroître la précision de la fonction d'utilité si la dimension des zones ajoute une plus grande incertitude.

Le zonage doit donc être le plus fin possible, en particulier dans les zones denses où de nombreuses paires OD peuvent être proches, afin de minimiser la part des déplacements intra-zonaux. L'homogénéité interne des zones en termes de temps nécessaire pour atteindre le réseau doit également faire l'objet d'une attention particulière (Bonnell 2004c). La finesse est toutefois limitée par les temps de calcul et les découpages des zones sont partiellement contraints par les limites administratives ou les zonages des fournisseurs de données.

En conséquence de la représentation par zones, le réseau de transport, en particulier le réseau routier, n'est pas représenté entièrement. Les voies de desserte très locale n'y figurent souvent pas car les connecteurs associés aux centroïdes de zone (section [2.1.1](#), « La représentation en zones du système d'activités ») jouent leur rôle de desserte de l'origine ou de la destination. Dans un MQE, les déplacements intra-zonaux, donc très locaux, n'empruntent d'ailleurs pas le réseau. Le modélisateur doit donc arbitrer quant aux voies ou catégories de voies devant être représentées, sachant que peu de voies sont en pratique exclusivement utilisées pour de la desserte locale ou exclusivement pour du transit (Bonnell 2004c).

La non-exhaustivité peut également fausser les distances sachant que le chemin réel le plus rapide ou le moins coûteux pour une paire OD peut passer par des tronçons qui ne sont pas représentés. Ce point peut être d'autant plus critique pour les cyclistes : ils pourraient, dès lors que l'on intègre le sentiment de sécurité ou l'effort physique comme paramètres, emprunter pour du transit des voies considérées comme étant de desserte locale pour les automobilistes, les déterminants de l'utilité pouvant être très différents entre les deux modes. La représentation ou non de voies étant souvent plus basée sur le trafic automobile, l'absence des voies de desserte locales peut grandement fausser l'utilité calculée sur un itinéraire.

### Données nécessaires

Les MQE se basent sur diverses sources de données. Les caractéristiques socio-économiques des zones (population et autres variables socio-démographiques, nombre d'emplois

par type de métiers etc.) sont susceptibles d'évoluer en fonction des projets urbains et des mouvements des populations. Elles peuvent elles-mêmes faire l'objet de prévisions et de scénarios. Ces caractéristiques sont utilisées comme variables d'entrée d'un MQE.

Les données de mobilités provenant des enquêtes mobilité certifiées Cerema ou EMC<sup>2</sup> (Les Enquêtes Mobilité Certifiées Cerema 2023) permettent de connaître la mobilité de la population sur le territoire étudié par zones géographiques et en fonction de variables socio-démographiques, ainsi que ses déterminants. Avec les comptages (routiers, vélos, fréquentation des TC...), qui permettent de connaître ponctuellement la fréquentation des différents modes de transport, ces données permettent le calage et la validation des paramètres d'un MQE (McNally 2007).

### 2.1.2 Les étapes de la simulation

Les MQE peuvent être découpés en quatre procédures principales décrites dans les paragraphes suivants. La figure 2.2 décrit l'enchaînement des étapes.

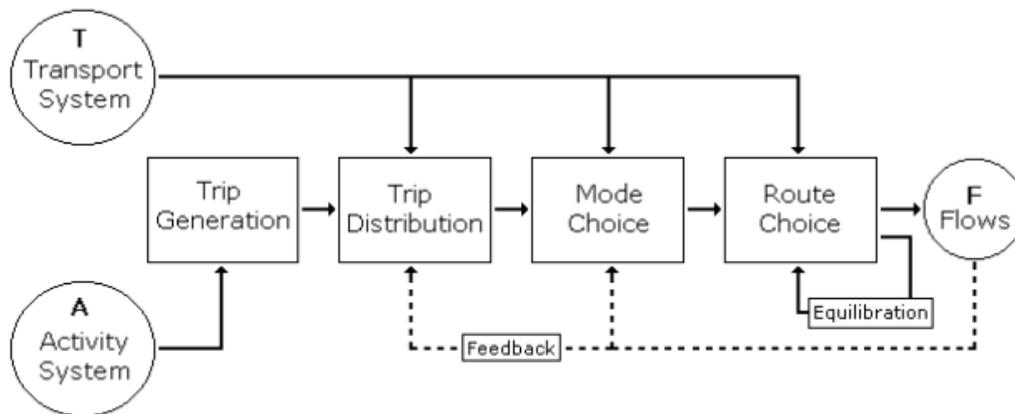


Fig. 2.2 : Résumé schématique du modèle à quatre étapes. Source : (McNally 2007)

Les modèles étudiés sont construits sur PTV Visum. Un certain nombre de fonctionnalités qui sont propres à ce logiciel sont donc utilisées dans ces modèles.

#### Génération

Cette étape consiste à déterminer le nombre de déplacements au départ (émissions) et à l'arrivée (attractions) dans chaque zone en se basant sur les données socio-économiques par zone et les enquêtes mobilité.

Les données des enquêtes mobilité permettent de déterminer pour chaque segment de demande (un segment de demande consiste en un couple groupe, motif de déplacement, ex. travail, loisirs, achats...), le nombre de déplacements effectués durant une période ou une journée, et par conséquent les émissions pour les déplacements au départ du domicile. Dans le cas du modèle VISEM utilisé dans les modèles étudiés, on génère des chaînes d'activités, chacune au départ et à l'arrivée au domicile (Modèle de données VISEM s. d.), (Génération des déplacements VISEM s. d.).

Il peut être plus difficile d'estimer le nombre d'attractions par zone étant donné que la majorité des enquêtes sur la mobilité sont échantillonnées selon le lieu du domicile (McNally 2007), (Les Enquêtes Mobilité Certifiées Cerema 2023). En fonction des modèles, il est possible de ne pas définir de manière stricte le nombre d'attractions par segment de demande mais un potentiel d'attraction de la zone (Distribution/Choix modal VISEM combinés s. d.).

## Distribution

Cette étape consiste à associer les origines et les destinations, c'est-à-dire à déterminer, parmi l'ensemble des émissions d'une zone, comment elles se répartissent entre les destinations et, parmi ses attractions, comment elles se répartissent entre les origines. La distribution, de même que la génération, se partitionne par segment de demande.

On utilise généralement un modèle gravitaire (la structure de formule se rapprochant de celle du modèle Newtonien de la gravité) (McNally 2007). Ces modèles sont de la forme :

$$T_{ijs} = a_{ijs} * E_{is} * A_{js} * f_s(c_{ij})$$

Avec :

- $T_{ijs}$  - le volume de déplacements de la zone  $i$  vers la zone  $j$  pour le segment de demande  $s$  ;
- $E_{is}$  - le volume d'émissions de la zone  $i$  pour le segment de demande  $s$  ;
- $A_{js}$  - le volume d'attractions de la zone  $j$  pour le segment de demande  $s$  ;
- $c_{ij}$  - une expression de coût généralisé d'un déplacement entre les zones  $i$  et  $j$  (distance, temps généralisé...);
- $f_s$  - une fonction décroissante du coût reflétant l'hypothèse qu'une OD longue ou coûteuse attire moins de déplacements ;
- $a_{ijs}$  - un facteur d'échelle permettant d'assurer de conserver le volume d'émissions :  $\sum_j T_{ijs} = E_{is}$ , le volume d'attractions :  $\sum_i T_{ijs} = A_{js}$ , ou les deux. Souvent, seul le volume d'émissions est conservé, le facteur  $A_{js}$  n'est alors utilisé que comme un potentiel d'attraction tel que dans l'équation définissant  $T_{ijs}$  et on a  $a_{ijs} = a_{is} = [\sum_k A_{ks} f(c_{iks})]^{-1}$  (Distribution/Choix modal VISEM combinés s. d.).

Une fois la fonction  $f_s$  spécifiée, ses paramètres sont estimés pour chaque segment de demande, à partir des enquêtes mobilité. Il est indispensable que les motifs et les groupes soient distingués entre eux, la tolérance à la distance étant différente d'un segment de demande à l'autre (p. ex. on parcourt généralement de plus grandes distances pour le motif travail que pour le motif achats).

## Répartition modale

Cette étape répartit, sur chaque paire OD et pour chaque groupe dans la population, les déplacements entre les modes disponibles (McNally 2007). Pour cela, on définit, de manière analogue à la distribution, des fonctions d'utilité (les fonctions de coût de la distribution peuvent être des combinaisons des fonctions d'utilité pour le choix modal). Une telle fonction définit quelle valeur un usager donne à chaque alternative (en l'occurrence, chaque mode) en fonction de certaines de leurs caractéristiques (prix, temps, confort, risque...), afin de pouvoir comparer les différents choix. On effectue cette comparaison à l'aide d'un modèle de choix discret (MCD), dont le fonctionnement sera détaillé en section [2.2](#).

De même que pour la distribution, la valeur de l'utilité d'un mode peut dépendre de la charge du réseau. Elle variera donc à chaque itération avant de converger.

## Affectation

Une fois le nombre de déplacements par OD et par mode déterminé, l'affectation consiste à déterminer le choix d'itinéraire des usagers, en mettant ainsi à jour les temps de parcours. Elle

se base sur l'hypothèse que chaque usager dispose d'une information complète de l'état du réseau de transport et cherche à minimiser son propre temps de parcours (ou une autre variable représentant un coût). Les usagers d'une OD se répartiront sur les itinéraires de sorte que tout changement d'itinéraire d'un usager augmente son temps de trajet. On parle d'équilibre usager (Wardrop 1952).

On remarque dans cette séquence que l'expression du coût généralisé, utilisé dans les trois dernières étapes (distribution, choix modal et affectation), dépend du résultat même de ces étapes : le choix modal et l'affectation déterminent la charge de trafic sur le réseau, influant sur le temps de trajet, généralement pris en compte dans le temps généralisé. Un MQE nécessite donc plusieurs itérations à la suite desquelles les résultats convergeront vers une valeur d'équilibre. A la première itération, on prend en compte le temps de trajet à vide. Les OD et les modes fortement dépendants de la charge tendent donc à y être favorisés par rapport aux observations.

## 2.2 Les modèles de choix discret

### 2.2.1 Introduction

Les modèles de choix discret (MCD) sont des modèles désagrégés, permettant de modéliser chaque individu séparément. Ils permettent d'estimer le choix qu'un **individu** ferait en présence d'un ensemble d'**alternatives** (Ben-Akiva et Bierlaire 1999), ou plus précisément la probabilité de choisir chaque alternative.

Les **individus** dans les MCD sont considérés comme des agents rationnels. Les critères de choix peuvent varier d'un individu à l'autre. Toutefois il est possible de décrire ceux-ci dans une certaine mesure, par des attributs comme des variables socio-économiques (âge, genre, revenus, activité professionnelle...). Les différences entre les individus représentées à travers ces variables peuvent permettre d'expliquer les variations dans les critères de choix des individus (Ben-Akiva et Bierlaire 1999).

Les **alternatives** constituent un ensemble fini appelé *Choice set* (Ben-Akiva et Bierlaire 1999) que nous traduirons par « ensemble d'alternatives ». L'ensemble des alternatives peut être différent d'un individu à l'autre. Par exemple, dans le cas du choix modal, pour un individu ne possédant pas le permis de conduire, la voiture personnelle en tant que conducteur ne fait donc pas partie de l'ensemble des alternatives.

### 2.2.2 Théorie de l'utilité aléatoire

En micro-économie, les individus sont supposés rationnels, cherchant à maximiser l'utilité de leurs choix. Il s'agit d'une grandeur sans unité reflétant un individu considère qu'une alternative lui bénéficie. Toutefois, cette théorie se heurte à la complexité du comportement humain, voire à son imprévisibilité. La théorie de l'utilité aléatoire suppose toutefois que le choix est intrinsèquement déterministe, mais que l'utilité de chaque alternative pour chaque individu est mal connue par le modélisateur. Un terme d'erreur aléatoire est donc ajouté à chaque fonction d'utilité témoignant de l'incertitude sur sa valeur. On note donc :

$$U_{in} = V_{in} + \varepsilon_{in}$$

Avec :

- $U_{in}$  l'utilité de l'alternative  $i$  pour l'individu  $n$

- $V_{in}$  la partie déterministe de l'utilité ;
- $\varepsilon_{in}$  la partie aléatoire de l'utilité ;

La probabilité pour l'individu  $n$  de choisir l'alternative  $i$  sera donc la probabilité que son utilité  $U_{in}$  soit la plus grande dans l'ensemble de ses alternatives que l'on note  $C_n$  :

$$P_n(i) = P\left(\bigcap_{j \in C_n} U_{in} \geq U_{jn}\right) = P\left(U_{in} = \max_{j \in C_n} U_{jn}\right)$$

On remarque à ce niveau que l'alternative choisie ne dépend que de l'ordre des utilités. Appliquer n'importe quelle transformation strictement croissante (c'est-à-dire pour laquelle l'ordre est invariant) à toutes les utilités ne change pas le résultat du modèle :

$$P\left(U_{in} = \max_{j \in C_n} U_{jn}\right) = P\left(f(U_{in}) = \max_{j \in C_n} f(U_{jn})\right)$$

Où  $f$  est une transformation croissante.

En particulier, les utilités peuvent être simultanément multipliées par un facteur d'échelle positif ou se voir ajouter une constante sans changer les probabilités de choix. Cette caractéristique est avantageuse car elle permet notamment de fixer certains paramètres de la distribution du terme aléatoire  $\varepsilon$  (section [2.2.4](#)).

### 2.2.3 Partie déterministe de l'utilité

La partie déterministe de l'utilité d'une alternative  $i$  pour un individu  $n$ , notée  $V_{in}$ , est une fonction des attributs de l'alternative et de l'individu. N'importe quelle forme peut être utilisée, néanmoins on spécifie souvent un modèle linéaire des paramètres de l'alternative, parfois en supposant que les coefficients de ce modèle dépendent en fait des caractéristiques de l'individu, sinon en ajoutant également d'autres termes pour l'individu.

La partie déterministe peut contenir un terme constant. Etant donné qu'il est possible d'ajouter une même constante à toutes les utilités sans changer leur ordre (application croissante pour l'utilité, (section [2.2.2](#)), on peut choisir arbitrairement l'une des alternatives dont la constante sera nulle, ou d'une autre valeur particulière que souhaite le modélisateur, sans contraindre le modèle. Ce qui importe dans la partie déterministe est plus la différence avec la partie déterministe de chaque alternative que sa valeur au sens absolu.

### 2.2.4 Distribution du terme aléatoire

Dans la suite de ce document, nous utiliserons un MCD particulier : le Logit multinomial. On suppose que les termes aléatoires sont indépendants et identiquement distribués, suivant une distribution de Gumbel (Gumbel 1958) dont la fonction de répartition est exprimée par :

$$F(\varepsilon) = \exp(-e^{-\mu(\varepsilon-\eta)})$$

En suivant cette distribution, la probabilité du choix d'une alternative  $i$  vaut :

$$P_n(i) = \frac{e^{\mu V_i}}{\sum_{j \in C_n} (e^{\mu V_j})}$$

Etant donné que multiplier l'utilité par une constante positive ne change pas l'ordre des alternatives (section [2.2.2](#)), on peut choisir arbitrairement une valeur  $\mu'$  pour le facteur d'échelle

dans la fonction de répartition en exprimant  $U' = \frac{\mu}{\mu'} U$ . Il est par exemple possible de choisir  $\mu' = 1$ . On obtient alors :

$$P_n(i) = \frac{e^{V_i}}{\sum_{j \in C_n} (e^{V_j})}$$

### 2.2.5 Application aux modèles de déplacement

Les MCD sont principalement utilisés pour l'étape de choix modal où chaque usager est face à plusieurs alternatives pour un déplacement et choisit celle qui maximise son utilité. Cependant, contrairement aux MCD, les modèles à quatre étapes sont des modèles agrégés : les individus ne sont pas modélisés séparément mais sont rassemblés par groupes et par paires OD. Dans chaque groupe, toutefois, les individus ont un certain nombre de caractéristiques communes qui peuvent constituer des données d'entrée d'un MCD. On suppose donc que tous les individus d'un groupe se distribuent autour de l'individu moyen. A partir des caractéristiques connues d'un individu, il est possible de déterminer la probabilité de choix de chaque alternative. A l'échelle d'un groupe, cette probabilité devient une fréquence : si pour un individu d'un groupe, la probabilité qu'il choisisse le vélo pour une paire OD est de 0,1, alors on considèrera que 10% des individus du groupe sur cette paire OD ont choisi le vélo (Bonnell 2004b).

## 2.3 Le vélo dans les modèles de déplacements des agglomérations lyonnaise et bordelaise

Les calculs de l'utilité de l'alternative vélo dans les modèles de déplacement lyonnais (MODELY) et bordelais, (MMM, pour Modèle Multimodal Métropolitain), sont relativement similaires. Certaines spécificités les font néanmoins se démarquer. Cette section présente un état des lieux de l'utilité du choix modal pour le vélo dans ces deux modèles jusqu'à présent et les limites qui peuvent en émerger. A partir d'ici, la mention « utilité » se réfère à la partie déterministe de l'utilité telle que définie en section [2.2.2](#).

### 2.3.1 L'utilité du choix modal

Pour un groupe dans la population, l'utilité du choix modal est calculée pour chaque mode et par paire OD. Les termes pris en compte dans le calcul de l'utilité d'un mode sont donc propres à la paire OD (en pratique ces termes sont donc sous forme de matrice) et les jeux de coefficients associés aux termes sont propres à chaque groupe et calés sur les résultats des EMC<sup>2</sup>.

Dans le cas des deux modèles de déplacements étudiés, la convention de signe de l'utilité correspond en fait à un coût, c'est à dire que la probabilité de choisir une alternative décroît par rapport à cette fonction. Ce sera donc la convention que nous suivrons dans cette section. Les deux modèles de déplacements intègrent une constante ainsi que le temps généralisé vélo qui dépend d'une vitesse donnée pour chaque catégorie d'aménagement cyclable. Le calcul du temps généralisé sera détaillé en section [2.3.2](#). Ces deux termes sont très couramment utilisés pour le calcul l'utilité du mode vélo dans les modèles de déplacements.

Le MMM intègre en plus la contrainte de stationnement pour les voitures personnelles à l'origine et à la destination ainsi qu'un terme indiquant la traversée de la Garonne sur l'OD. Ces deux matrices sont appliquées au vélo en tant que bonus : une plus forte contrainte de stationnement ou la nécessité de traverser la Garonne font diminuer l'utilité et renforcent la

probabilité du choix du vélo. Ces deux derniers termes ont pour effet principal de favoriser le vélo dans le centre-ville et sur les paires OD où la voiture personnelle est fortement contrainte.

Face à cela, MODEL Y intègre un terme relatif à l'accessibilité des vélos partagés en libre-service (Vélo'V) ainsi qu'un terme relatif à la densité de population, d'emplois et d'effectifs universitaires dans les zones de départ et d'arrivée. Ce second terme semble très artificiel, mais permet là encore de renforcer l'usage du vélo sur les paires OD centrales, afin que les situations de calage correspondent aux données des enquêtes.

### 2.3.2 Le temps généralisé

Le temps généralisé est la somme des temps généralisés sur les connecteurs, sur les tronçons et sur les mouvements aux nœuds (MN) rencontrés sur un itinéraire. Le temps sur les connecteurs inclut le temps d'accès (détacher/attacher son vélo, le descendre/monter dans un immeuble...) ainsi que la circulation dans la zone de départ/d'arrivée entre le dernier nœud du réseau rencontré et l'origine / la destination. Le temps sur les MN correspond au temps perdu dans les intersections par rapport au temps pris si la vitesse sur les tronçons était constante sur les intersections. Les hypothèses prises dépendent essentiellement du type de mouvement (à droite, tout-droit ou à gauche) et du régime de priorités. Il peut être possible de l'assimiler au temps d'arrêt si le temps d'accélération ou de freinage est pris en compte dans le temps sur les tronçons. La figure 2.3 décrit la décomposition de la fonction d'utilité du le mode vélo pour le MMM et pour MODEL Y.

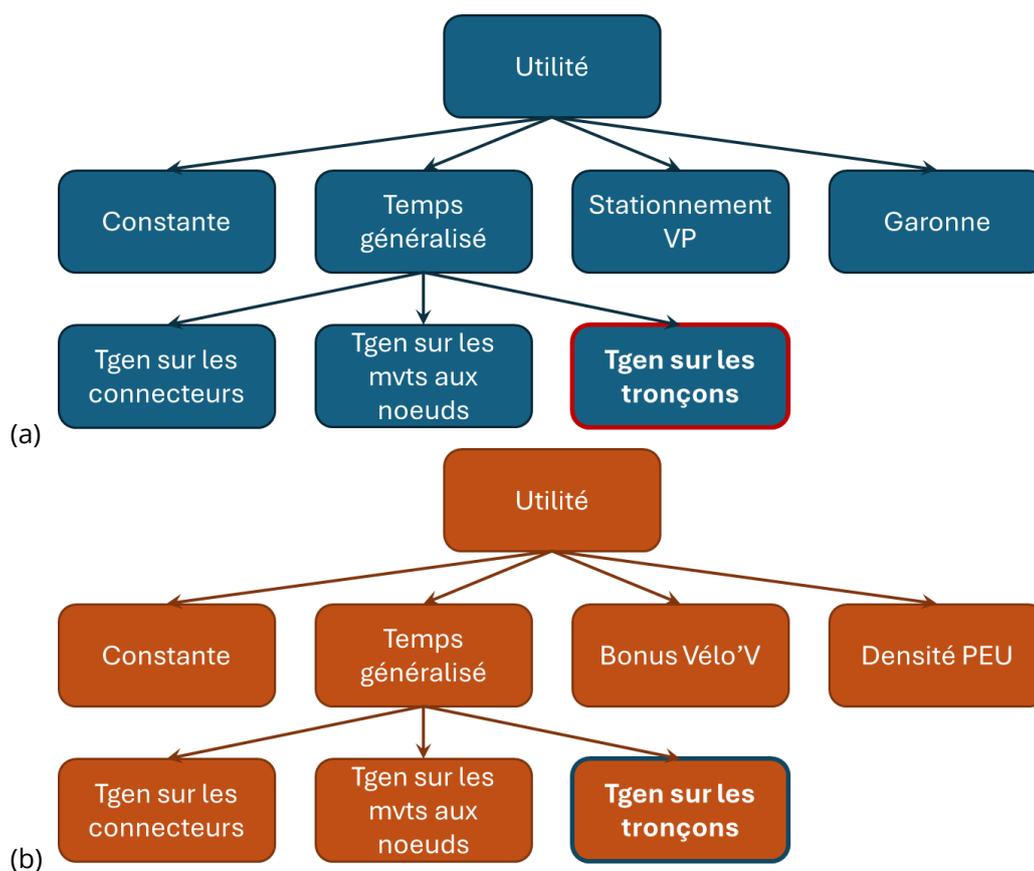


Fig. 2.3 : Décomposition de la fonction d'utilité du choix modal pour le MMM (a) et MODEL Y (b)

Dans cette étude, nous ne nous intéresserons pas au temps sur les connecteurs, et bien qu'une étude des temps perdus aux nœuds puisse être menée à partir de traces GPS (Strauss et

Miranda-Moreno 2017), la nature des commandes et la contrainte temporelle nous a amené à nous intéresser essentiellement au temps généralisé sur les tronçons, excluant donc les temps d'arrêt aux intersections. Bien que le temps perdu aux intersections puisse être important, l'étude des temps de parcours sur les tronçons nous a semblé prioritaire, étant donné qu'elle constitue la majorité du temps de trajet. Ce choix sera toutefois discuté en section [3.6.4](#).

Le temps généralisé sur les tronçons inclut le temps physique, qui constitue un coût pour les usagers mais intègre également un bonus attribué aux aménagements cyclables. En effet, a priori, un aménagement dédié aux vélos, principalement en raison du sentiment de sécurité, doit être plus attractif pour les cyclistes indépendamment du temps de trajet réel. Cette attractivité est donc prise en compte dans la fonction d'utilité à travers du temps généralisé, tant pour le MMM que pour MODEL.Y. Dans les deux cas, le temps généralisé sur les tronçons est calculé pour chaque paire OD de la vitesse définie chaque tronçon de l'itinéraire déterminé pour l'OD. Les paragraphes suivants détailleront donc le calcul de la vitesse sur les tronçons.

Pour le modèle lyonnais, la composante constante de la vitesse est fixée à 14 km/h pour les scénarios actuels et à 16 km/h pour les scénarios futurs. Cette différence existe pour prendre en compte la démocratisation des vélos à assistance électrique (VAE) et l'augmentation de leur part dans le parc roulant. Un bonus de cyclabilité propre à chaque tronçon, allant de 0 à 11 km/h et dépendant de l'aménagement cyclable s'ajoute à cette vitesse.

Pour le modèle bordelais, le calcul est similaire. Cependant, la vitesse ne présente qu'une composante, directement déterminée à partir de l'aménagement du tronçon et non une composante constante à laquelle viendrait s'ajouter un bonus. Le modèle n'intègre pas de différence entre les scénarios actuels et futurs, en revanche, le terme constant de la fonction d'utilité évolue entre les scénarios actuels et futurs, pour suivre l'évolution des représentations sociales liées au vélo, ce qui n'était jusqu'à présent pas le cas pour MODEL.Y.

L'annexe 1 donne la valeur des vitesses vélo en fonction de l'aménagement pour le MMM et pour MODEL.Y.

### 2.3.3 Perspectives d'amélioration

La formulation du temps généralisé de la manière décrite précédemment pose problème par plusieurs aspects. Premièrement, la vitesse physique et le sentiment de sécurité lié aux aménagements ne sont pas clairement distingués dans le calcul de l'utilité. C'est particulièrement vrai dans le cas du MMM, où une seule valeur de vitesse est donnée. On observe d'ailleurs que la vitesse donnée pour les aires piétonnes ou zones de rencontre, 10,5 km/h, est inférieure à la vitesse donnée sur les axes sans aménagement cyclable, 15 km/h. Les vélos circulent en effet moins vite en présence de piétons, (Flügel et al. 2017), cependant le sentiment de sécurité est a priori meilleur. Concernant les routes départementales sans aménagement, pour lesquelles la vitesse est aussi fixée à 10,5 km/h, les écarts sont a priori inversés. La vitesse donnée semble donc mélanger les deux notions (et peut-être d'autres composantes implicites de l'utilité corrélées à l'aménagement cyclable) sans qu'il soit possible de les quantifier distinctement.

Or dès lors que l'on souhaite réaliser une étude en vue réestimer de manière distincte l'un ou l'autre des aspects de la vitesse décrite précédemment, il n'est pas possible de dissocier l'utilité de la sécurité sur laquelle ne porte pas l'étude et qui doit donc rester inchangée.

Par ailleurs, ces valeurs de vitesse constituent des hypothèses critiques pour l'estimation des volumes de trafic vélo, donc pour la définition d'objectifs et de politiques publiques permettant de les atteindre. Ces hypothèses sont, d'une part, très rigides, indépendantes d'indicateurs comme les pentes, qui peuvent jouer un rôle important dans le choix ou non du vélo,

et induire des disparités entre différentes paires OD qui n'apparaissent pas si cet indicateur n'est pas pris en compte. Par ailleurs, elles n'ont pas été basées sur des mesures faites en situation réelle, tant concernant les vitesses physiques que le sentiment de sécurité. Leur crédibilité en est par conséquent limitée.

La première préoccupation émergeant de cette section est donc la fiabilisation de la vitesse physique pratiquée par les cyclistes, qui est actuellement le principal déterminant du temps généralisé. Cette vitesse devra se distinguer d'un bonus attribué aux aménagements. Dans la section suivante, après avoir présenté un état de l'art sur l'estimation de la vitesse des cyclistes, nous détaillerons donc la méthodologie employée pour l'estimation d'un modèle de vitesse des cyclistes dans la Métropole de Lyon puis présenterons les résultats obtenus.

## 3. Fiabilisation des vitesses

### 3.1 Etat de l'art sur l'estimation des vitesses des cyclistes

#### 3.1.1 Des données qui ne correspondent pas au besoin

Comme exposé en section précédente, le temps de trajet est un déterminant important du choix modal. Bien que l'objectif d'un modèle de choix modal au sein d'un MQE soit de déterminer le temps à l'échelle du trajet entier, celui-ci dépend de la vitesse pratiquée sur chaque tronçon traversé, qui peut elle-même dépendre de l'aménagement dudit tronçon. Désagréger la vitesse au niveau du tronçon peut également permettre d'évaluer l'impact du réaménagement d'une partie des tronçons de quelques OD sur le volume de déplacements à vélo. Il est important de noter que de même que la vitesse n'est pas nécessairement constante d'un tronçon à l'autre, elle ne l'est pas nécessairement non plus sur un même tronçon. Les phases d'accélération et de freinage en début et en fin de tronçon, la présence ponctuelle d'obstacles ou de virages sur un tronçon peuvent impacter la vitesse instantanée et en conséquence la vitesse moyenne. Concernant les phases d'accélération et de freinage, en supposant qu'elles n'arrivent qu'en début et en fin de tronçon, leur impact sur la vitesse moyenne peut alors être modélisées par des variables données à l'échelle du tronçon. Plus largement, les modèles étudiés ne découpent pas les tronçons en sous-éléments plus petits. Il n'est donc pas nécessaire dans le cadre d'un MQE, ayant pour objectif de prévoir la demande de transport, de choisir une granularité plus fine que le tronçon.

Les principales sources de données disponibles en France pour le calage des MQE (mises à part les comptages spécifiques aux TC ou au VP) sont les EMC<sup>2</sup> et les recensements INSEE incluant une base de déplacements domicile-travail et domicile-études (Bonnell 2004a), (mobpro 2022), (mobsco 2022). Ces données informent sur les comportements de mobilité des individus. Cependant, elles ne permettent pas d'accéder au détail de leurs itinéraires. En particulier, concernant les vitesses vélo, les EMC<sup>2</sup> ou les bases des mobilités professionnelles et scolaires contiennent comme indication une origine, une destination et un temps de trajet. Ces informations sont basées sur les déclarations des sondés le lendemain de leur déplacement donc approximatives, en plus d'être agrégées à l'échelle d'un déplacement entier. Les informations que l'on pourrait en déduire sur la vitesse sont donc trop imprécises pour être utilisées dans un MQE, et ne sont pas donnée au niveau du tronçon. Il est donc nécessaire recueillir des données supplémentaires pour estimer les vitesses des cyclistes.

#### 3.1.2 Plusieurs méthodes de mesure non équivalentes

Une étude de l'Académie des Mobilités Actives (ADMA) (Balaguier et al. 2022) met en évidence une diversité de définitions pour la vitesse vélo. Elle mentionne

- la vitesse instantanée, valable en un point du trajet, en mouvement ;
- la vitesse moyenne sur un trajet, il s'agit de la distance parcourue entre l'origine et la destination divisée par la durée du trajet, elle prend donc en compte les temps d'arrêt ;
- la vitesse généralisée, tenant compte du temps de déplacement et du temps de travail nécessaire pour payer le déplacement. Cette dernière permet de mettre en perspective les gains de temps permis par la voiture face au coût qu'elle représente pour son utilisateur. Enfin, la vitesse généralisée se rapproche de l'utilité des MCD. Celle-ci permet d'exprimer la valeur du temps et de l'argent pour un utilisateur dans une même unité.

Des différences significatives peuvent être observées entre les vitesses instantanées en mouvement et les vitesses moyennes, la médiane des mesures sur un ensemble d'articles que

l'étude sélectionne atteint 15,8 km/h pour la vitesse instantanée contre 14,6 km/h pour la vitesse moyenne.

L'étude de l'ADMA souligne par ailleurs le fait que la méthode de mesure de la vitesse impacte le résultat. En effet, la vitesse mesurée n'est pas la même suivant la méthode employée. Certaines méthodes comme les radars de vitesse ou les tubes pneumatiques posés au sol permettent de mesurer une vitesse instantanée. Les données de retrait et retour de vélos en libre-service, au contraire, permettent de mesurer une vitesse moyenne sur un trajet. C'est également le cas des temps de trajets déclarés par les sondés dans le cadre des EMC<sup>2</sup>, cependant ceux-ci incluent en plus le temps de marche avant et après avoir accès au vélo. Bien que les vitesses vélo tirées des EMC<sup>2</sup> ne soient pas suffisamment précises pour le calage d'un modèle de vitesse vélo au niveau du tronçon, celles-ci ont tout de même l'avantage de fournir une base de données représentatives de la population et comparables entre plusieurs agglomérations françaises. Enfin, les données GPS, permettent de mesurer une vitesse instantanée ou une vitesse moyenne, en fonction du traitement appliqué.

Cette étude mentionne de nombreux articles mettant en évidence la variabilité des vitesses en fonction de différentes variables :

- le profil du cycliste : les moins de 40 ans roulent en moyenne 2,7 km/h plus vite que les plus de 65 ans (Schleinitz et al. 2017), les hommes, en moyenne 1,3 km/h plus vite que les femmes (Parkin et Rotheram 2010)...
- le motif de déplacement et de la temporalité : les déplacements effectués week-end sont 3,5 km/h plus lents que les déplacements effectués à l'heure de pointe du matin (Jensen et al. 2010), les déplacements effectués pour motif travail sont de 2 à 4,3 km/h plus rapides selon la ville étudiée dans les EMC<sup>2</sup> ;
- l'aménagement local (présence d'aménagement cyclable, mixité avec les voitures, les piétons, proximité d'une intersection...) : les cyclistes circulent en moyenne 2,2 km/h plus vite quand ils circulent avec le trafic automobile que sur des infrastructure dédiées (Bernardi et Rupi 2015) et 3 à 5 km/h plus lentement en présence de piétons (Schleinitz et al. 2017).

Toutefois les mesures mentionnées ici ne sont pas généralisables à toutes les villes et à toutes les situations. En effet, les vitesses mesurées lors des EMC<sup>2</sup> diffèrent fortement d'une agglomération à l'autre (que ce soit la conséquence de caractéristiques de l'agglomération ou de la date de l'enquête). Une mesure effectuée dans une ville ne peut donc pas forcément être appliquée à une autre. Par ailleurs, sur les mesures de vitesse moyenne, pour une même ville, on observe une différence significative en fonction de l'échantillon étudié. Ainsi, dans la Métropole de Lyon, on observe une vitesse moyenne de 13 km/h pour les trajets effectués en Vélo'v contre 15 km/h pour les trajets effectués tous types de vélos confondus, par les utilisateurs de l'application Géovélo (Indicateurs vélo Métropole de Lyon s. d.). Cette différence peut s'expliquer par deux facteurs : la différence de type de vélo, principalement une différence de poids et d'aérodynamisme, mais aussi par une différence de profil entre les utilisateurs du service Vélo'v et les utilisateurs de l'application Géovélo, les premiers étant probablement moins expérimentés et effectuent probablement des trajets moins réguliers donc moins connus. Cet écart met donc en évidence un point de vigilance : la non-représentativité des données recueillies par rapport à la population générale ou à la sous-population peut biaiser significativement les vitesses recueillies.

### 3.1.3 Modéliser la vitesse à partir de données GPS : les méthodes employées dans la recherche

Pour élaborer notre méthodologie et comparer nos résultats avec les résultats communément obtenus dans la recherche, nous nous appuyerons sur trois études menées respectivement à Oslo (Norvège), Montréal (Canada) et Toronto (Canada) : (Flügel et al. 2017), (Strauss et Miranda-Moreno 2017) et (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019). Dans les trois cas, les chercheurs s'intéressent à un échantillon de cyclistes (recruté directement pour l'étude ou utilisateurs d'une application produite par un organisme public) dont ils recueillent les données GPS des déplacements à vélo pendant une période de d'un mois à quatre mois et demi. Après un tri des données, les positions GPS sont ensuite mises en correspondance avec le réseau navigable à vélo.

Les trois articles définissent les vitesses différemment. (Flügel et al. 2017) ainsi que (Strauss et Miranda-Moreno 2017) calculent une vitesse moyenne au niveau du tronçon, toutefois la vitesse calculée au niveau du tronçon dans le second article n'inclut pas le temps d'attente aux intersections. En effet, il distingue les points à proximité d'une intersection (moins de 20 m) des autres et les traite séparément. Toutefois Strauss et Miranda-Moreno ne proposent pas de modèle explicatif pour le temps perdu aux intersections. (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) conserve le point GPS comme point de donnée. Comme expliqué plus haut, nous nous intéresserons essentiellement à la vitesse au niveau du tronçon.

Dans les trois cas, des données GPS provenant de smartphones sont utilisées. L'inconvénient de ce type de données est l'incertitude sur la localisation, en particulier en environnement urbain dense où les bâtiments peuvent limiter la précision de la localisation, ce qui engendre une erreur sur la vitesse. (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) mentionne le fait que les points enregistrés définissent une trajectoire ondulée même sur des tronçons rectilignes. Une vitesse recalculée à partir de la trajectoire, bien que fortement corrélée ( $R^2=0,99$ ) est par conséquent 10% plus élevée que la vitesse fournie par l'application d'enregistrement de traces dans les données de l'article, et ce de manière très consistante. Il demeure toutefois encore une incertitude sur la vitesse fournie directement par l'application, puisqu'elle est également calculée à partir des positions GPS.

Ces enregistrements de traces s'accompagnent également de données concernant le profil du cycliste et les caractéristiques du déplacement. A partir de ces données, les chercheurs sélectionnent des variables qui, hypothétiquement, pourraient avoir une influence sur la vitesse des cyclistes. De manière analogue à la classification faite par (Balaguier et al. 2022), ces variables peuvent donc porter sur le cycliste (genre, âge, fréquence d'utilisation du vélo, expérience...), le déplacement (motif travail/école ou autre, heure de pointe ou non, nuit, week-end...) ou le tronçon.

Sur les variables liées au tronçon, (Strauss et Miranda-Moreno 2017) distingue les grands axes des voies de desserte locale, la présence ou non d'un aménagement cyclable, la présence ou non d'un feu de signalisation au début et à la fin du tronçon, la longueur du tronçon (en supposant que plus un tronçon est court, plus les phases d'accélération et de freinage prennent d'importance dans la vitesse moyenne) ou la présence d'une pente montante ou descendante. (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) définit trois catégories de voie et quatre types d'aménagement cyclable (en incluant l'absence d'aménagement). Il considère la pente comme une variable continue et inclut d'autres caractéristiques liées au trafic automobile, comme la limite de vitesse, le nombre de voies ou encore le volume de trafic. (Flügel et al. 2017) propose de ne pas supposer un effet linéaire de la pente sur la vitesse, en définissant 18 variables binaires pour autant d'intervalles de valeur prises par la pente, ainsi que de prendre également en compte la pente des tronçons situés en amont, et la géométrie des intersections en amont et en aval.

Les caractéristiques des tronçons sont celles qui nous intéressent le plus dans la modélisation quatre étapes. Pour rappel, la principale motivation du présent travail est en effet d'être en capacité d'évaluer l'effet d'une politique d'aménagement sur le volume de déplacements à vélo. De plus, le découpage de la population par groupes ne reflète pas forcément les variables émergeant des questionnaires posés aux cyclistes. Les groupes dans la population ne sont par exemple pas distingués par genre ou par expérience en tant que cycliste. Toutefois les variables individuelles permettent de distinguer l'effet direct de l'aménagement sur la vitesse d'un effet indirect qui serait dû à la propension de certains types de tronçons à dissuader certains profils de cyclistes plus que d'autres qui auraient une vitesse différente. Il devient par exemple possible d'équilibrer la représentation des différentes modalités de variables individuelles sur chaque tronçon.

Enfin, on peut supposer que les vitesses et leur variation en fonction des caractéristiques du cycliste, du déplacement ou de l'aménagement sont différentes entre les usagers de VAE et de vélos sans assistance (VSA). Ainsi (Flügel et al. 2017) calibre deux modèles de vitesse distincts, l'un pour les VSA et l'autre pour les VAE. Le taux de pénétration des VAE dans le parc croissant rapidement, s'intéresser à la différence de comportement entre les utilisateurs de VAE et les utilisateurs de VSA peut permettre d'anticiper une éventuelle croissance des vitesses dans les décennies à venir.

## 3.2 Sources de données

Pour l'estimation des vitesses vélo dans la Métropole de Lyon, les données de vitesse nous ont été fournies par Géovélo (GV) sous la forme de 12 couches de données géographiques de type vecteur. Chaque couche contient des polygones correspondant à des tronçons du réseau OpenStreetMap (OSM) (OpenStreetMap France s. d.). Chaque polygone a donc notamment pour attributs le nombre de cyclistes passés sur le tronçon pendant un mois (fréquentation), le type d'aménagement cyclable (tableau 3.1) et la vitesse moyenne de tous les cyclistes ayant circulé sur ledit tronçon. Ces 12 couches représentent donc chacune un mois entre mars 2023 et février 2024.

Ces données nous ayant été fournies déjà agrégées par un tiers, il n'est pas possible de distinguer chaque cycliste ou chaque déplacement sur un tronçon, ni de distinguer la vitesse pratiquée dans un sens et dans l'autre. Les seules caractéristiques accessibles dans ce cas sont définies au niveau du tronçon. Il ne nous est pas non plus possible de vérifier la qualité de l'association entre les points GPS et le réseau puisque les points originaux ne sont pas accessibles.

Les couches fournies par GV contenant la vitesse ne sont pas exhaustives et ne forment pas un réseau connexe. Nous avons donc utilisé le réseau OSM comme support pour les données fournies. Les tronçons du réseau OSM présentent également comme attributs la catégorie de voie (tableau 3.2), qui peut être déterminante pour la vitesse des cyclistes par le biais du volume et de la vitesse du trafic automobile, ainsi que le type de surface au sol.

Par ailleurs, les pentes ont été déduites des altitudes du RGE ALTI (RGE ALTI® | Géoservices s. d.), le modèle numérique de terrain (MNT) fourni par l'institut national de l'information géographique et forestière (IGN). S'agissant d'un MNT, la donnée disponible est l'altitude au niveau du sol (Zoom sur les produits altimétriques MNT et MNS | Géoservices 2020). Les ouvrages d'art (essentiellement ponts et tunnels) sont donc ignorés, ce qui peut engendrer ponctuellement des pentes très fortement surestimées en valeur absolue. Le RGE ALTI est disponible avec une résolution de 1 m, 5 m et 25 m (BD ALTI dans le dernier cas). Nous avons choisi la résolution de 5 m à cause de la difficulté à traiter de plus grands volumes de données.

## 3.3 Mise en forme des données

### 3.3.1 Importation des indicateurs GéoVélo sur le réseau OSM – « Map-matching »

Trois indicateurs ont dû être importés de l'ensemble de polylignes fournies par GV sur le réseau OSM : la fréquentation, la vitesse et le type d'aménagement (plus de détails en section 3.2). L'ensemble des manipulation décrites dans cette section a été effectué à l'aide du logiciel PTV Visum, dans lequel ont été importés les polylignes fournies par GV et le réseau OSM.

L'aménagement cyclable est pour les deux sens de circulation dans deux attributs séparés. Toutefois, dans les cas où l'aménagement est différent dans un sens et l'autre, il n'est pas possible de distinguer la vitesse pratiquée sur un aménagement et l'autre. N'ont donc été conservés que les tronçons où l'aménagement donné est le même dans les deux sens. Ainsi, l'aménagement emprunté par les cyclistes sur le tronçon est sans ambiguïté.

Les sens interdits forment la seule exception à cette règle : si un tronçon présente l'étiquette « forbidden » dans les deux sens, alors cette étiquette sera retenue et le tronçon ne sera pas pris en compte, même si des passages de cyclistes ont pu y être enregistrés. En revanche, si cette étiquette est présente dans un sens et n'importe quel autre aménagement dans l'autre, alors l'aménagement du sens autorisé sera retenu. Dans les tronçons à sens unique pour les vélos, on suppose en effet que la proportion de cyclistes empruntant le tronçon en sens interdit est négligeable. L'aménagement emprunté est donc, là encore, sans ambiguïté.

La géométrie des polylignes fournies par GV est basée sur le réseau OSM. Or peu de changement peuvent être observés sur une période d'un an, entre la date de la première couche (après mars 2023) et où le réseau utilisé comme support a été téléchargé (avril 2024). La majorité des géométries correspondent donc parfaitement à celle du réseau OSM, ce qui constitue un avantage important dans la procédure de map-matching : l'association des données des différentes couches sur le réseau support.

Sur les tronçons du réseau OSM, un attribut est créé pour chaque indicateur et pour chaque couche GV, soit 36 en tout. Pour chaque mois, on se base ensuite sur la proximité géométrique pour associer les polylignes GV aux tronçons OSM. Autour de chaque polyligne GV est dessinée une zone tampon de largeur  $l = 5 \text{ cm}$ . Chaque tronçon  $t$  peut être partiellement recouvert par la zone tampon d'une ou plusieurs polylignes. On appelle taux de recouvrement du tronçon  $t$  par la polyligne  $p$ , noté  $r_{t,p}$ , la part de longueur du tronçon recouverte par la zone tampon de 5 cm autour de  $p$ . L'aménagement retenu sur le tronçon  $t$  pour chaque mois est l'aménagement noté sur la polyligne présentant le taux de recouvrement maximal parmi celles dont la zone tampon recouvre  $t$ . Les indicateurs quantitatifs, vitesse et fréquentation, sont calculés comme la moyenne pondérée de l'indicateur par le taux de recouvrement, soit :

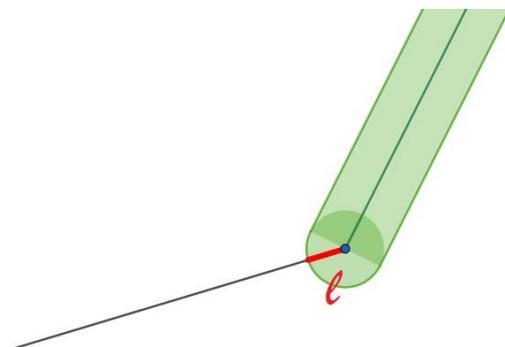
$$x'_t = \frac{\sum_p r_{t,p} * x_p}{\sum_p r_{t,p}}$$

Avec :

- $x_p$  la valeur de l'indicateur notée sur la polyligne  $p$  ;
- $x'_t$  la valeur de l'indicateur calculé pour le tronçon  $t$  ;
- $r_{t,p}$  le taux de recouvrement de  $t$  par  $p$  ;

Le choix de ne pas se contenter de la polyligne au taux de recouvrement maximal pour les indicateurs quantitatifs a été fait en prévision des cas où des tronçons seraient représentés par plusieurs polylignes avec, toutes, un taux de recouvrement du même ordre de grandeur. Toutefois ce choix a pour conséquence que des polylignes ne représentant pas un tronçon (par exemple

une polygline représentant une voie perpendiculaire) le recouvrent quand même, et contribuent donc à la valeur des indicateurs du tronçon. La figure 3.1 décrit l'une de ces situations. Il est donc pour cela nécessaire de réduire la largeur de zone tampon au minimum afin de limiter l'impact de ces recouvrements « parasites ». Le choix de 5 cm est un compromis entre la limitation des recouvrements parasites et l'omission de certaines polyglines dont la géométrie ne correspondrait pas exactement à celle du tronçon qu'elles représentent.



*Fig. 3.1 : Intersection (en rouge) entre un tronçon (en noir) et la zone tampon d'un PDI GV (en vert). La longueur  $l$ , égale à la largeur de zone tampon et représentée en rouge est donc comptée dans le ratio de recouvrement alors qu'intuitivement, le PDI et le tronçon ne sont clairement pas liés.*

Par ailleurs, pour les tronçons pour lesquels la somme des taux de recouvrements  $\sum_p r_{t,p}$  vaut moins de 0,06, on considère que les recouvrements parasites ont potentiellement une grande part dans les recouvrements constatés. Aucune vitesse vélo et aucun aménagement n'est donc associé à ces tronçons pour le mois concerné.

Une fois cette procédure effectuée pour chaque mois, on dispose pour chaque indicateur de 0 à 12 valeurs sur chaque tronçon. La vitesse moyenne sur l'année est calculée comme la moyenne de la vitesse de chaque mois, pondérée par la fréquentation du mois, la fréquentation sur l'année est calculée comme la somme des fréquentations de chaque mois, et l'aménagement cyclable retenu est celui qui apparaît sur le plus grand nombre de mois (il n'a, de toute manière, pas été constaté d'aménagements cyclables différents entre deux mois parmi les tronçons observés).

### 3.3.2 Altitudes et pentes

Les pentes des tronçons ont été calculées à partir du RGE ALTI fourni par l'IGN avec une résolution de 5 m (section 3.2). L'attribut correspond à la pente moyenne, c'est-à-dire le quotient du dénivelé par la longueur du tronçon dans le plan. En raison de la résolution du MNT, seuls les tronçons plus longs que 15 m ont été conservés, l'incertitude sur l'altitude pouvant avoir un effet important sur la pente pour les tronçons les plus courts.

Le RGE ALTI détaillant le niveau du terrain, les pentes les plus fortes peuvent en fait correspondre à des ponts ou des tunnels pour lesquels le terrain au-dessus ou en-dessous duquel ils ont été construits est fortement pentu, mais qui, eux-mêmes, ne le sont pas autant. Les tronçons présentant une pente supérieure à 10% en valeur absolue, valeur au-delà de laquelle de plus en plus de valeurs de pente ne représentent pas correctement le tronçon concerné, ne sont pas pris en compte.

Par ailleurs, les données de vitesse transmises par GéoVélo (GV) ne sont pas orientées. Cela signifie que sur un tronçon pentu, les vitesses données sont la moyenne des cyclistes qui montent et qui descendent, sans possibilité de les distinguer par leur vitesse ou par leur nombre. L'impact de la pente ne peut donc être mesuré correctement que sur les tronçons à sens unique où le sens de circulation des cyclistes est sans ambiguïté. Afin de ne pas fausser les résultats sur l'impact de la pente, on ne conserve comme tronçons à double-sens que ceux sur lesquels la pente est suffisamment faible pour que son impact sur la vitesse soit négligeable.

Or, dans des régressions linéaires menées comme tests uniquement sur les tronçons à sens unique, l'impact de la pente sur la vitesse des cyclistes est proche de 0,5 km/h par % de pente. En ajoutant l'hypothèse que pour un tronçon à double-sens, la fréquentation est comparable entre les deux sens de circulation, on peut supposer que l'impact d'une pente comprise entre -1% et +1% sur la vitesse moyenne des cyclistes dans les deux sens est en général faible devant 1 km/h. On peut donc la négliger.

Les tronçons à double-sens ayant une pente supérieure ou égale à 1% en valeur absolue sont donc supprimés de la base et non-pris en compte dans les régressions. Les tronçons à double-sens conservés se voient ensuite attribuer une pente de 0, afin de s'assurer qu'ils ne faussent pas le coefficient obtenu pour la pente. En effet, bien qu'ils aient une pente faible, ces tronçons restent plus nombreux que les tronçons à sens unique et donc susceptible d'affecter sensiblement le coefficient désignant l'impact de la pente sur la vitesse.

### 3.3.3 Sinuosité

En supposant que les courbes amènent les cyclistes à ralentir, un attribut représentant le niveau de sinuosité de tronçon a été défini par :  $S_t = \frac{L_t}{D_{vo,t}} - 1$  (Flügel et al. 2017)

Où  $S_t$  est la sinuosité du tronçon  $t$ ,  $L_t$  est sa longueur et  $D_{vo,t}$  est la distance à vol d'oiseau entre ses nœuds d'origine et de destination. Il s'agit donc de l'écart relatif entre la distance réseau et la distance à vol d'oiseau : pour un tronçon rectiligne, cette valeur est nulle et elle augmente à mesure que le tronçon s'allonge par des virages.

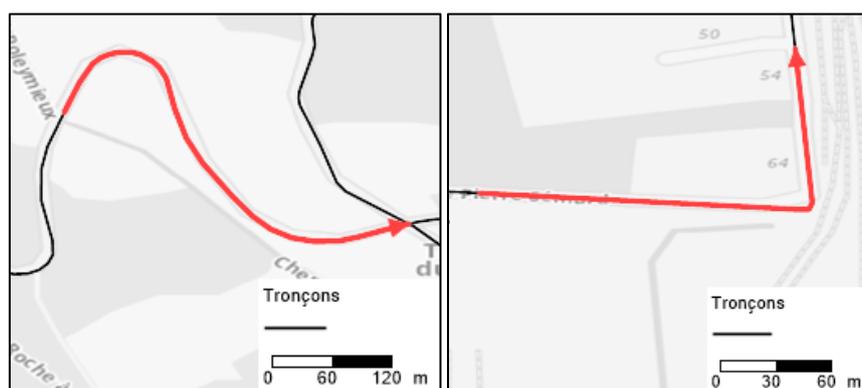


Fig. 3.2 : Deux tronçons du réseau OSM : (a) Rte des Crêtes, Saint-Cyr-au-Mont-d'Or,  $S_t=0,49$ ,  $L_t=470$  m, (b) Rue Pierre Semart, Lyon 7<sup>ème</sup> arrt.  $S_t=0,49$ ,  $L_t=251$  m.

Cependant cette valeur peut mal représenter le rayon de courbure moyen que rencontrera un cycliste sur un tronçon, notamment pour les valeurs les plus élevées. La figure 3.2 décrit deux de ces cas. On remarque qu'une même valeur de sinuosité, cache des tracés très différents : dans un cas des courbes longues et avec un rayon de courbure relativement grand, dans l'autre, deux lignes droites et une seule courbe de rayon très faible. La seconde image illustre le fait que la sinuosité peut dépendre du découpage des tronçons : si le tronçon avait été séparé

en deux dans l'angle, comme c'est le cas quand les angles correspondent à des intersections, alors il aurait formé deux tronçons rectilignes, donc de sinuosité nulle.

Par ailleurs, les valeurs de sinuosité très élevées cachent en fait souvent des tronçons qui forment une boucle ou une quasi-boucle. Une très grande valeur de sinuosité n'est alors pas synonyme d'un tronçon d'autant plus sinueux en réalité, mais simplement que les points de départ et d'arrivée sont très proches, comme l'illustre la figure 3.3. Les tronçons présentant une sinuosité supérieure à 5 seront donc écartés.

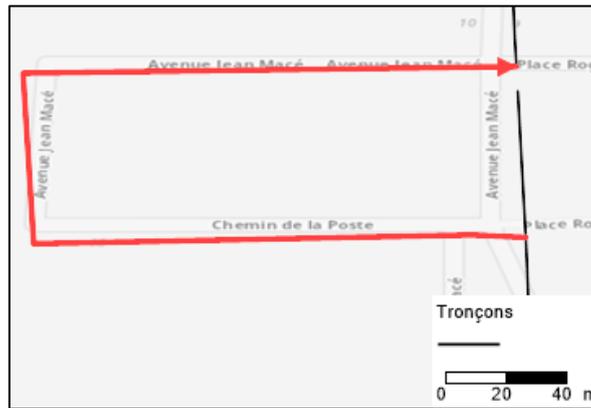


Fig. 3.3 : Chem de la Poste, Décines-Charpieu,  $S_t=4$ ,  $L_t=337$  m.

### 3.3.4 Densité et longueur de tronçon

Deux indicateurs ont été retenus pour traduire l'impact de la complexité de l'environnement urbain sur les conditions de circulation des cyclistes : la densité de population, emplois et effectifs universitaires ainsi que la longueur.

Premièrement, la densité de population, emplois et effectifs universitaires (appelée densité par la suite) est récupérée depuis les zones de Modely. Il s'agit, pour chaque zone, de la somme des trois densités énoncées (population, emplois, effectifs universitaire). Un tronçon situé sur plusieurs zones prendra pour valeur la moyenne de la densité des zones qu'il traverse, pondérée par la part de longueur du tronçon dans chacune des zones. L'hypothèse menant à l'utilisation de cette variable est qu'elle peut indiquer une activité importante donc par exemple des arrêts de véhicules fréquents, des stationnements ou encore la présence de nombreux piétons. Sa contribution à la vitesse devrait donc être négative.

Enfin, la longueur du tronçon (Strauss et Miranda-Moreno 2017), (Flügel et al. 2017) est utilisée pour indiquer la distance à laquelle se trouve les intersections. Puisque les intersections amènent les cyclistes à ralentir voire s'arrêter, on peut s'attendre à ce que les temps d'accélération et de décélération aient un impact sur la vitesse moyenne sur le tronçon d'autant plus fort que celui-ci est court. La nécessité de ralentir fréquemment peut également les amener à diminuer leur vitesse de pointe pour limiter leur effort dans les accélérations.

### 3.3.5 Aménagement cyclable et catégorie de voie

Le type d'aménagement cyclable présente 7 modalités, décrites au tableau 3.1. La catégorie de voie présente 14 modalités. J'ai cependant choisi de les regrouper en 10 modalités, décrites au tableau 3.2.

Catégorie d'aménagement	Description	Nb de tronçons
none	Aucun aménagement	30 328
lane	Bande cyclable (BC)	3 119
sharebusway	Voie de bus partagée	567
mixedfacilities	Trottoir partagé, parfois avec un marquage délimitant une zone cyclable d'une zone piétonne, parfois sans	135
cycleway	Piste cyclable	2426
greenway	Voie verte (VV)	979
other	Autre	1931

*Tableau 3.1 : description des types d'aménagement cyclables*

Catégories de voie regroupées	Catégories de voie originelles	Description	Nb de tronçons
primary	primary	Grands axes, routes primaires	65
secondary	secondary	Routes/rues secondaires	4 808
tertiary_residential	tertiary, residential, unclassified	Rues tertiaires, résidentielles ou non-classifiées (celles-ci sont similaires aux rues tertiaires et résidentielles)	19 675
service	service	Voies d'accès à un bâtiment ou groupe de bâtiments spécifique	2 567
link	secondary_link, tertiary_link	Tronçons courts faisant partie d'un carrefour	71
living_street	living_street	Zones de rencontre	428
pedestrian	pedestrian	Rues piétonnes	953
cycleway	cycleway	Pistes cyclables (PC)	2 274
footway_path	footway, path	Footway : trottoirs, path : chemins piétons	8 108
track	track	Chemins de campagne, parfois pavés et/ou accessibles aux voitures, généralement non	536

*Tableau 3.2 : description de la catégorisation OSM des voies*

Ces deux variables sont parfois fortement corrélées voire redondantes, comme le montre la figure 3.4, à travers la répartition des tronçons par catégorie de voie pour chaque type d'aménagement cyclable. Par ailleurs, il peut y avoir moins de sens à distinguer la catégorie de voie pour certains types d'aménagement cyclable et inversement (par exemple, la présence ou non d'une bande cyclable (BC) dans une zone de rencontre a probablement peu d'impact sur la vitesse, et qu'une voie verte (VV), accessible aux piétons et cyclistes, soit classée cycleway ou footway\_path fait également peu de différence).

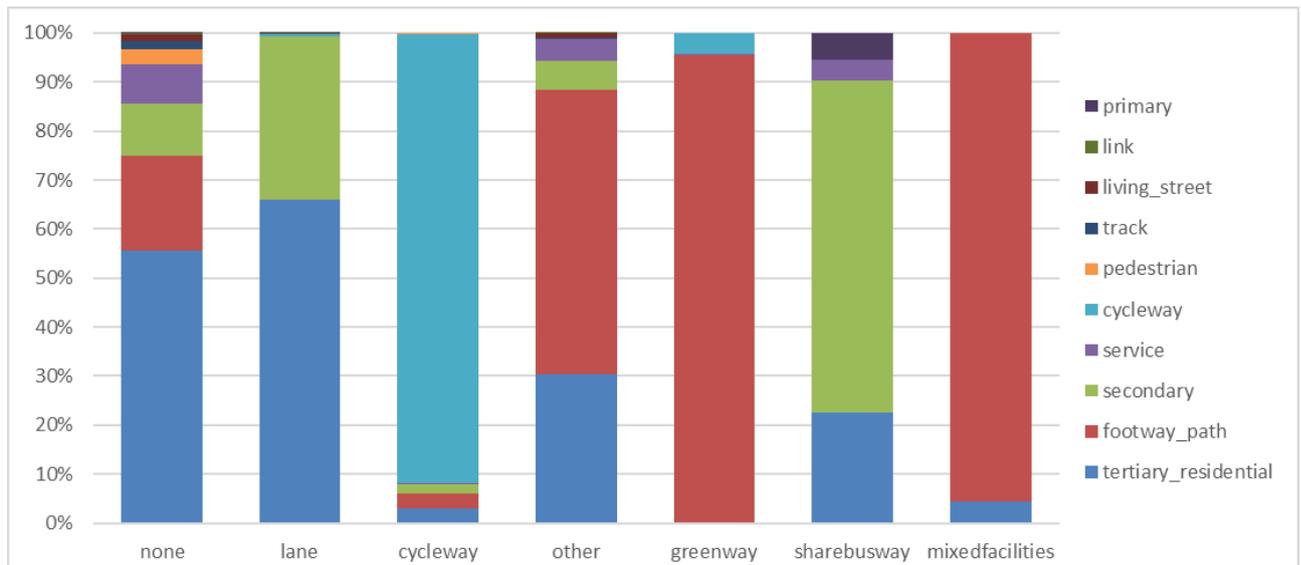


Fig. 3.4 : Répartition par catégorie de voie des tronçons dans chaque catégorie d'aménagement cyclable. Les deux variables ne sont pas indépendantes et sont parfois même redondantes.

Deux possibilités s'offrent alors pour la modélisation : ne pas tenir compte de la catégorie de voie mais uniquement de l'aménagement cyclable ou fusionner les deux variables en une variable croisée, ce qui nécessiterait de fusionner certaines modalités qui contiendraient trop peu de tronçons. Les deux possibilités ont été étudiées. Nous détaillerons ici la seconde solution.

Les variables d'aménagement cyclable et de catégorie de voie sont donc croisées en une variable que nous noterons `am_hwy`. En principe, une modalité est créée pour chaque combinaison de modalités des deux variables. Cependant certaines modalités de `am_hwy` sont fusionnées afin de limiter le nombre de modalités, de conserver un nombre suffisant de tronçons par catégorie et qu'elles aient un impact significatif sur la vitesse. Les fusions sont basées essentiellement sur des vérifications de la similarité des aménagements via Google Street View. Certaines fusions se sont imposées du fait du faible nombre de tronçons dans une catégorie, d'autres ont été décidées a posteriori en constatant que les vitesses pratiquées étaient très proches, comme `cycleway_footway_path`, fusionné avec `cycleway_separated` ainsi que `none_prim` et `none_sec`.

Les choix de regroupements se basent sur la ressemblance a priori des conditions de circulation à vélo entre les catégories fusionnées, après vérification de la manière dont se présente l'aménagement en pratique. Pour d'autres modalités de `am_hwy`, les tronçons sont retirés de la base. C'est le cas des catégories suivantes :

Pour l'aménagement cyclable :

- `other` : représente une trop grande diversité de cas et n'a donc que peu de sens. Pour cette catégorie d'aménagement, les catégories de voie `living_street`, `footway_path` et `track` font exception puisqu'aucune différence n'est faite dans `am_hwy` entre les aménagements cyclables sur ces voies.

Pour la catégorie de voie :

- `service` : voies de desserte très locale (un ou quelques bâtiments), souvent des impasses, généralement non représentées dans MODEL.Y. L'exception des aménagements `greenway` s'explique par le fait qu'aucune différence ne soit faite entre les catégories de voies pour et celle des aménagements `sharebusway`, par des vérifications via Google Street View montrant une similarité avec les voies de bus tertiaires et résidentielles ;

- link : tronçons courts en général peu représentatifs de la vitesse de parcours sur le réseau parce qu'ils font partie d'un carrefour. MODEL Y ne représente pas le réseau de manière aussi détaillée qu'OSM donc ces tronçons ne seront généralement pas représentés par MODEL Y.

Ainsi, en croisant les deux variables ayant respectivement 7 et 10 modalités, on obtient une nouvelle variable à 15 modalités au lieu des 38 attendues (70 desquels on retirerait les 32 modalités sans aucun tronçon). Le tableau 3.3 décrit les valeurs de la variable am\_hwy pour chaque catégorie d'aménagement cyclable et de voie. L'annexe 2 détaille le nombre de tronçons pour chaque catégorie d'aménagement cyclable et de voie, dans la base originale, ainsi que dans la base filtrée sur laquelle ont été calés les modèles.

	none	lane	sharebusway	mixedfacilities	cycleway	greenway	other
primary	none_prim_sec	lane_prim_sec	sharebusw_prim	Vide	Vide	Vide	Vide
secondary	none_prim_sec	lane_prim_sec	sharebusw_sec	Vide	cycleway_sec	Vide	Supprimé
tertiary_residential	none_ter_res	lane_ter_res	sharebusw_ter_res	none_ter_res	cycleway_ter_res	Vide	Supprimé
service	Supprimé	Vide			Supprimé	greenway	Supprimé
link		Supprimé					
living_street		living_street		Vide	Vide	Vide	living_street
pedestrian	pedestrian	Vide	Vide		pedestrian		Vide
cycleway	cycleway_separated	lane_ter_res			cycleway_separated	greenway	Vide
footway_path	footway_path			footway_path			footway_path
track	track	Vide		Vide	track	Vide	track

Tableau 3.3 : modalités de am\_hwy (cœur du tableau) en fonction de la catégorisation OSM des voies (lignes) et du type d'aménagement cyclable (colonnes)

### 3.3.6 Résumé des filtrages

Les filtrages successifs sur les tronçons sont résumés dans la figure 3.5. La base initiale, comprenant des tronçons d'une longueur d'au moins 15 m, autorisés aux vélos et où sont définis l'aménagement cyclable et la vitesse, est composée de 90 789 tronçons.

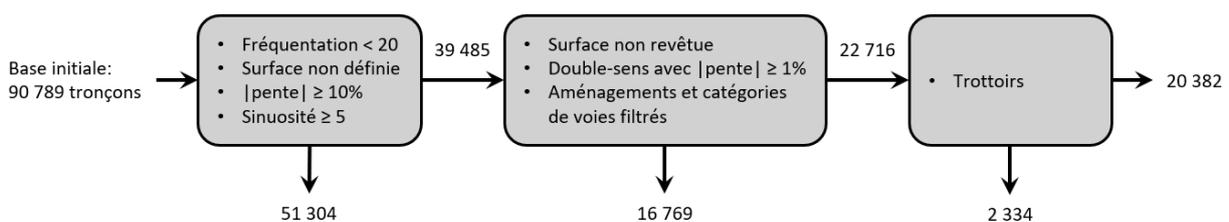


Fig. 3.5 : Résumé des filtrages effectués sur la base des tronçons avant calage d'un modèle de vitesse

Les tronçons supprimés dans le but de simplifier et de fiabiliser les variables explicatives sont les suivants :

- fréquentation : moins de 20 cyclistes ont été enregistrés (significativité statistique de la vitesse moyenne sur le tronçon) ;
- surface au sol : si elle n'est pas définie ;
- pente : non-comprise entre -10% et 10% ;
- sinuosité : supérieure à 5 ;
- pente : tronçons à double-sens n'ayant pas une pente strictement comprise entre -1% et +1% ;

- type d'aménagement et catégorie de voie : suppression de certaines catégories de voies et d'aménagement cyclable (tableau 3.3).

Par ailleurs, le type de surface au sol a été utilisé pour écarter un certain nombre de tronçons : Premièrement, les tronçons sans revêtement (surface en terre, herbe, boue, cailloux, rocher, éclats de bois) sont écartés. Ensuite, il a été constaté que sur certains axes du réseau OSM le trottoir était représenté séparément de la chaussée, sur un tronçon parallèle et très proche, ce qui a dû entraîner des erreurs lors de la mise en correspondance des traces GPS des vélos avec le réseau. Sur certaines voies, la majorité des circulations sont marqués sur le trottoir. J'ai donc décidé de supprimer les tronçons correspondant à des trottoirs. Ces tronçons sont généralement de catégorie footway, sans aménagement cyclable (none). Pour être plus spécifique, j'ai ciblé les tronçons revêtus en asphalt. Après des vérifications manuelles, la majorité des tronçons restants ne sont pas des trottoirs. L'annexe 3 met en évidence les tronçons retirés.

### 3.4 Description de la base des données finale

Après les traitements, on dispose d'une table contenant 20 382 tronçons. Le tableau 3.4 présente des indicateurs sur la distribution des variables quantitatives. La vitesse observée sur les tronçons est distribuée entre 1,3 et 45,8 km/h avec une moyenne de 18,0 km/h. La distribution des valeurs de vitesse est représentée en figure 3.6. On remarque que la distribution des vitesses est asymétrique et est plus étirée en-dessous de la moyenne. En termes de répartition spatiale, les tronçons où la vitesse observée est la plus faible se trouvent en centre-ville et, à l'inverse, les tronçons où la vitesse est la plus élevée se trouvent en périphérie. On peut y voir un effet de la densité, mais aussi de conditions de circulation moins attractives pour les cyclistes peu expérimentés, ce qui tend à biaiser l'échantillonnage sur ces tronçons. La distribution spatiale des vitesses observées dans la Métropole lyonnaise est visible en annexe 4.

	Vitesse (km/h)	Sinuosité	Densité (km <sup>2</sup> )	Longueur (km)	Pente (%)
<i>Moyenne</i>	18,0	0,013	12 211	0,077	0
<i>Ecart type</i>	4,6	0,080	13 627	0,094	1,1
<i>Minimum</i>	1,3	0	0	0,015	-9,9
<i>10<sup>e</sup> centile</i>	11,8	0	1 222	0,019	-0,3
<i>25<sup>e</sup> centile</i>	15,2	0	2 223	0,029	0
<i>Médiane</i>	18,4	0	7 059	0,051	0
<i>75<sup>e</sup> centile</i>	21,1	0,003	16 454	0,092	0
<i>90<sup>e</sup> centile</i>	23,3	0,024	34 881	0,152	0,3
<i>Maximum</i>	45,8	4,234	89 851	2,418	10

Tableau 3.4 : Résumé de la distribution des variables quantitatives dans la base séparée

Par ailleurs la quasi-totalité des variables quantitatives, à l'exception de la pente, ont une distribution fortement asymétrique, avec une médiane inférieure à la moyenne. Ainsi, par exemple, 78% des tronçons de la base ont une sinuosité inférieure à 0,005, valeur pour laquelle la différence avec une ligne droite est difficilement perceptible.

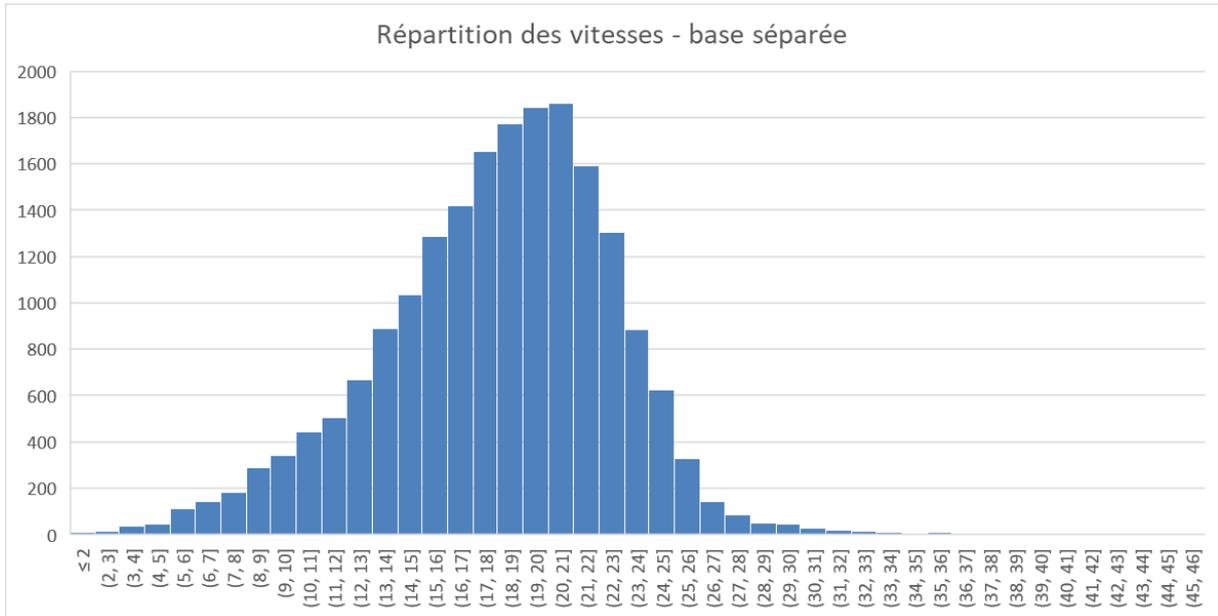


Fig. 3.6 : Répartition des vitesses dans la base séparée

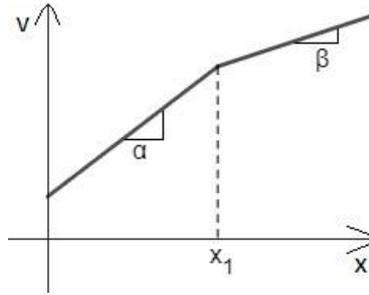
Les tronçons sont également répartis de manière fortement inhomogène entre les types d'aménagements ou les catégories de voies OSM, avec notamment une large majorité de tronçons sans aménagement, comme le décrit la figure 3.7.



Fig. 3.7 : répartition des tronçons par modalité pour la variable am\_hwy

### 3.5 Estimation d'un modèle linéaire par morceaux de la vitesse vélo

Pour tenter d'expliquer et de prévoir les vitesses vélo, j'ai fait le choix d'un modèle linéaire par morceaux. L'objectif est d'être en mesure d'observer des évolutions non linéaires, alors que l'on n'est pas en mesure de présumer une forme pour la fonction reliant les variables explicatives à la vitesse. Pour une variable explicative  $x$ , le modèle estime donc plusieurs coefficients, chacun sur un intervalle. Le découpage des intervalles dépend du choix du modélisateur. Les coefficients donnés correspondent donc à une estimation de la pente de la courbe reliant la variable à expliquer  $v$  vitesse à  $x$ . La figure 3.8 représente un exemple dans lequel  $v$  suit une pente  $\alpha$  sur  $[0, x_1]$  et une pente de  $\beta$  sur  $[x_1, +\infty[$ .



*Fig. 3.8 : exemple de croissance linéaire par morceaux*

La variable `am_hwy` est qualitative et présente 15 modalités. Elle est donc représentée par 14 indicatrices. Pour une variable  $x$ , l'indicatrice de la modalité  $m$  vaut 1 si  $x = m$  et 0 sinon. L'indicatrice pour la modalité `none_prim_sec` (tronçons sans aménagement cyclable, de catégorie primaire ou secondaire) est absente du modèle pour que le système n'ait qu'une solution. Pour chaque modalité, le coefficient exprime donc un différentiel de vitesse par rapport aux tronçons de catégorie `none_prim_sec`, à laquelle se réfère l'expression « catégorie de référence ».

On retient donc comme variables explicatives :

- densité en  $\text{km}^{-2}$  (section [3.3.4](#) et tableau 3.4) ;
- longueur en km (section [3.3.4](#) et tableau 3.4) ;
- pente (section [3.3.2](#) et tableau 3.4), une pente à 1% a une valeur de 0,01 dans le modèle ;
- sinuosité (section [3.3.3](#) et tableau 3.4) ;
- `am_hwy` (section [3.3.5](#), fig. 3.6).

Le tableau 3.5 donne les résultats de l'estimation du modèle de vitesse décrit ci-dessus.

Nombre d'observations 20 382  
R<sup>2</sup> 0,377  
R<sup>2</sup> ajusté 0,376

<i>Intitulé</i>	<i>Modalité/intervalle</i>	<i>Coefficient</i>	<i>Erreur standard</i>	<i>T</i>	<i>p</i>
<i>(Intercept)</i>		21,99	0,10	217	<10 <sup>-3</sup>
<i>Densité</i>	<i>[0 ; 10000]</i>	-2,92*10 <sup>-4</sup>	0,10*10 <sup>-4</sup>	-28	<10 <sup>-3</sup>
<i>Densité</i>	<i>[10000 ; 20000]</i>	-1,04*10 <sup>-4</sup>	0,12*10 <sup>-4</sup>	-8,4	<10 <sup>-3</sup>
<i>Densité</i>	<i>[20000 ; 40000]</i>	-9,3*10 <sup>-5</sup>	0,7*10 <sup>-5</sup>	-12	<10 <sup>-3</sup>
<i>Densité</i>	<i>[40000 ; +∞[</i>	4,3*10 <sup>-5</sup>	1,0*10 <sup>-5</sup>	4,3	<10 <sup>-3</sup>
<i>Longueur</i>	<i>[0 ; 0,4]</i>	7,3	0,5	14	<10 <sup>-3</sup>
<i>Longueur</i>	<i>[0,4 ; 0,8]</i>	6,5	1,1	5,9	<10 <sup>-3</sup>
<i>Longueur</i>	<i>[0,8 ; +∞[</i>	-0,3	1,3	-0,2	0,820
<i>Pente</i>	<i>[-10% ; -5%]</i>	-68	19	-3,6	<10 <sup>-3</sup>
<i>Pente</i>	<i>[-5% ; -2%]</i>	-90	12	-7,7	<10 <sup>-3</sup>
<i>Pente</i>	<i>[-2% ; 2%]</i>	-42	6	-7,2	<10 <sup>-3</sup>
<i>Pente</i>	<i>[2% ; 5%]</i>	-47	11	-4,2	<10 <sup>-3</sup>
<i>Pente</i>	<i>[5% ; 10%]</i>	-7	18	-0,36	0,720
<i>Sinuosité</i>	<i>[0 ; 0,2]</i>	-15,1	1,3	-12	<10 <sup>-3</sup>
<i>Sinuosité</i>	<i>[0,2 ; 0,5]</i>	-9,6	1,6	-5,9	<10 <sup>-3</sup>
<i>Sinuosité</i>	<i>[0,5 ; +∞[</i>	-1,32	0,50	-2,7	0,008
<i>Am_hwy</i>	<i>none_ter_res</i>	-2,51	0,09	-27	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>lane_prim_sec</i>	0,93	0,16	6,0	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>lane_ter_res</i>	0,26	0,13	2,0	0,041
<i>Am_hwy</i>	<i>sharebusw_prim</i>	4,9	0,7	7,4	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>sharebusw_sec</i>	0,59	0,21	2,8	0,005
<i>Am_hwy</i>	<i>sharebusw_ter_res</i>	-0,5	0,3	-1,4	0,153
<i>Am_hwy</i>	<i>living_street</i>	-5,14	0,26	-20	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>pedestrian</i>	-5,33	0,17	-31	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>cycleway_sec</i>	-1,6	0,5	-3,1	0,002
<i>Am_hwy</i>	<i>cycleway_ter_res</i>	-0,9	0,5	-1,7	0,081
<i>Am_hwy</i>	<i>cycleway_separated</i>	-0,97	0,13	-7,7	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>greenway</i>	-2,09	0,18	-12	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>footway_path</i>	-5,50	0,12	-46	<10 <sup>-3</sup>
<i>Am_hwy</i>	<i>track</i>	-5,5	0,3	-18	<10 <sup>-3</sup>

Tableau 3.5 : Résultats de l'estimation du modèle linéaire par morceau de vitesse vélo.

## 3.6 Discussion

### 3.6.1 Discussion des résultats

De manière générale, on observe que l'influence des variables quantitatives (densité, longueur, pente, sinuosité) sur la vitesse est décroissante et tend à être négligeable pour les valeurs les plus fortes des variables retenues.

Dans le cas de la densité, la tendance s'inverse même à partir de 40 000 km<sup>-2</sup>, toutefois avec une pente plus faible en valeur absolue que sur les autres intervalles. Cela peut s'expliquer notamment par le fait que les quais bas du Rhône font partie des tronçons traversant les plus fortes densités avec environ 65 000 km<sup>-2</sup> (fig. 3.9). Or les vitesses sur les quais bas sont relativement élevées parce que ces aménagements sont séparés des autres flux, parallèles ou perpendiculaires, et partiellement épargnés par l'impact de la densité qui peut se traduire par des stationnements, une circulation dense, de nombreux piétons... Ces quais constituent une

exception notable à l'influence négative de la densité et influencent probablement significativement le résultat de l'estimation pour les très fortes densités.

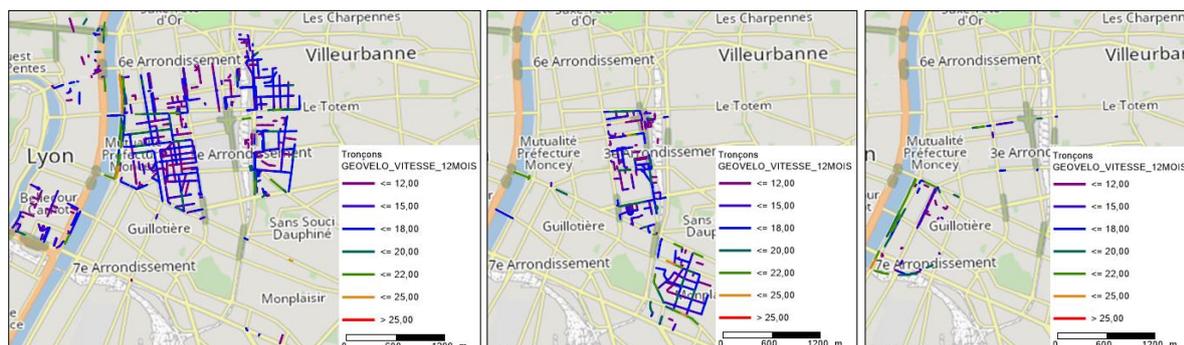


Fig. 3.9 : Localisation des tronçons traversant une zone à densité comprise entre, de gauche à droite 40 000 et 50 000 km<sup>2</sup>, 50 000 et 60 000 km<sup>2</sup>, ou supérieure à 60 000 km<sup>2</sup>

Concernant la longueur du tronçon, son effet est décroissant, puis négligeable au-delà de 800 m. Selon l'hypothèse formulée concernant cette variable, les temps perdus lors de l'accélération et du freinage expliquent une vitesse moyenne plus faible sur les tronçons les plus courts. Pour les tronçons les plus longs, ce temps devient négligeable devant le temps de parcours total, tout comme son impact sur la vitesse moyenne, ce qui correspond effectivement aux observations. A Montréal, (Strauss et Miranda-Moreno 2017) donne un pente de 4,4 (km/h)/km, ce coefficient valant pour toutes les longueurs sans découpage d'intervalles. Toutefois, la vitesse est mesurée en excluant les points situés à moins de 20 m d'une intersection. Leur prise en compte tendrait à accroître l'écart de vitesse moyenne entre les tronçons courts et longs. Les valeurs déduites des données lyonnaises semblent proches des valeurs obtenues dans cet exemple.

Concernant la pente, on observe que les descentes (pentes négatives) sont généralement plus impactantes que les montées. Ce constat va à l'encontre de (Flügel et al. 2017) qui donne des coefficients approximativement symétriques entre les tronçons montants et descendants jusqu'à 3%, puis un impact plus fort des montées que des descentes.

Etant donné qu'il n'est pas possible dans l'échantillon lyonnais, de distinguer les cyclistes sur un tronçon, une différence de fréquentation sur les tronçons montants peut alors expliquer une partie de cet écart. En effet, les montées pourraient décourager les cyclistes débutants ou être à l'origine d'une plus grande part de VAE sur les tronçons concernés, entraînant un biais de sélection sur les cyclistes fréquentant les tronçons le plus pentus.

L'hypothèse selon laquelle aucun cycliste n'emprunterait un sens interdit peut également être à l'origine d'une sous-estimation de leur impact par rapport à celui des descentes (section 3.3.2). En effet, le nombre de cyclistes empruntant un tronçon, sur une paire OD toujours aussi attractive par ailleurs, décroît avec la pente de ce tronçon (la pente dissuade certains usagers d'emprunter cet itinéraire ou d'utiliser le vélo). La proportion de cyclistes en sens interdit pourrait s'en retrouver accrue. De plus, la différence de vitesse entre les deux sens augmentant avec la pente, les cyclistes en sens interdit peuvent avoir un impact important sur la vitesse moyenne donnée pour un tronçon en forte montée. Ces deux biais, probablement d'autant plus forts que la pente est forte, pourrait contribuer à réduire la variation de vitesse due à la pente. Cela signifierait alors que pour un cycliste donné, toutes choses égales par ailleurs, l'impact de la pente sur sa vitesse est sous-estimé. (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) donne également des coefficients plus importants en valeur absolue pour les pentes positives, entre -72 km/h et -120 km/h selon le modèle (valeurs théoriques pour une pente de 100%), ce qui tend à appuyer cette idée.

Pour les pentes négatives, notre régression décrit une influence de la pente de moins en moins forte, comme on peut s'y attendre. En effet, les cyclistes tendent à limiter leur vitesse si elle devient dangereuse selon eux (Flügel et al. 2017). Il existe donc un plafond à l'augmentation de vitesse que peut induire une descente (propre à chaque cycliste dans chaque situation).

En ce qui concerne la sinuosité, (Flügel et al. 2017) donne un coefficient de -0,22. Cet article utilisant un modèle linéaire sur le logarithme de la vitesse et l'échantillon de l'article présentant une vitesse moyenne de 17 km/h, cela se traduit par une variation de -3,7 km/h par unité de sinuosité. Les coefficients trouvés dans ce modèle semblent donc plutôt plus importants, bien qu'il soit difficile de les comparer en raison de la séparation en intervalles.

Enfin, considérant l'impact des aménagements cyclables sur la vitesse, et à catégorie de voie égale, on remarque que les cyclistes tendent à circuler globalement plus vite sur les BC et les couloirs de bus que sur les tronçons sans aménagement, mais moins vite sur les aménagements cyclables dédiés comme les pistes cyclables (PC) et les VV. Il semble donc que les couloirs de bus partagés et BC sont préférables à l'absence d'aménagement, elle-même préférable aux PC, en tout cas si on suppose que le temps de trajet est la seule variable importante pour les usagers. Par ailleurs, conformément à l'intuition, les tronçons où les cyclistes circulent le moins vite sont les tronçons partagés avec les piétons (rues piétonnes, zones de rencontres, chemins).

Les valeurs obtenues semblent contredites par la recherche, en effet d'après (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) et (Flügel et al. 2017), les cyclistes roulent plus vite sur les PC et VV ou équivalents que sur les tronçons sans aménagement. Cependant, la grande majorité des tronçons sans aménagement cyclable sont des voies tertiaires ou résidentielles (*none\_ter\_res*), catégorie qui affiche une vitesse de 2,5 km/h inférieure à la catégorie de référence (*none\_prim\_sec*), là où la majorité des PC dans notre échantillon sont séparées, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas rattachées à une route. Celles-ci, ainsi que les VV, également des tronçons exclusivement réservés aux modes actifs, affichent respectivement une différence de vitesse de -1 km/h et -2,1 km/h par rapport à la catégorie de référence, soit des vitesses plus importantes que les voies tertiaires ou résidentielles (-2.5 km/h) sans aménagement qui représentent la majorité des tronçons sans aménagement. Cette considération permet de se rapprocher des valeurs trouvées dans la recherche, par exemple, sur les BC, (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) donnant respectivement +1,2 et +1,9 km/h sur les BC et les PC par rapport aux tronçons sans aménagement et (Flügel et al. 2017) donnant +1,4 et +1,9 km/h.

### 3.6.2 Prédiction et erreur

Le modèle développé a été évalué en termes de prédictions. En ayant été entraîné sur la totalité des tronçons de la base finale, la racine de l'erreur quadratique moyenne obtenue (RMSE) sur ce même échantillon est de 3,67 km/h. Pour s'assurer que le modèle n'a pas surappris, j'ai choisi de mettre en œuvre une validation croisée, donc de tester sa capacité de prédiction sur des échantillons sur lesquels il n'a pas été entraînés. La base finale a donc été séparée en deux échantillons tirés aléatoirement : un échantillon d'entraînement contenant environ trois quarts des tronçons et un échantillon de test contenant un quart des tronçons. Le modèle a ensuite été recalé en se basant sur l'échantillon d'entraînement. Les coefficients obtenus (légèrement différents de ceux du modèle calé sur l'ensemble de la base) ont ensuite été utilisés pour prédire les vitesses sur l'échantillon de test. On obtient alors une RMSE très similaire de 3,74 km/h, ce qui semble montrer que le modèle conserve une capacité de prédiction identique sur des tronçons sur lesquels il n'est pas entraîné.

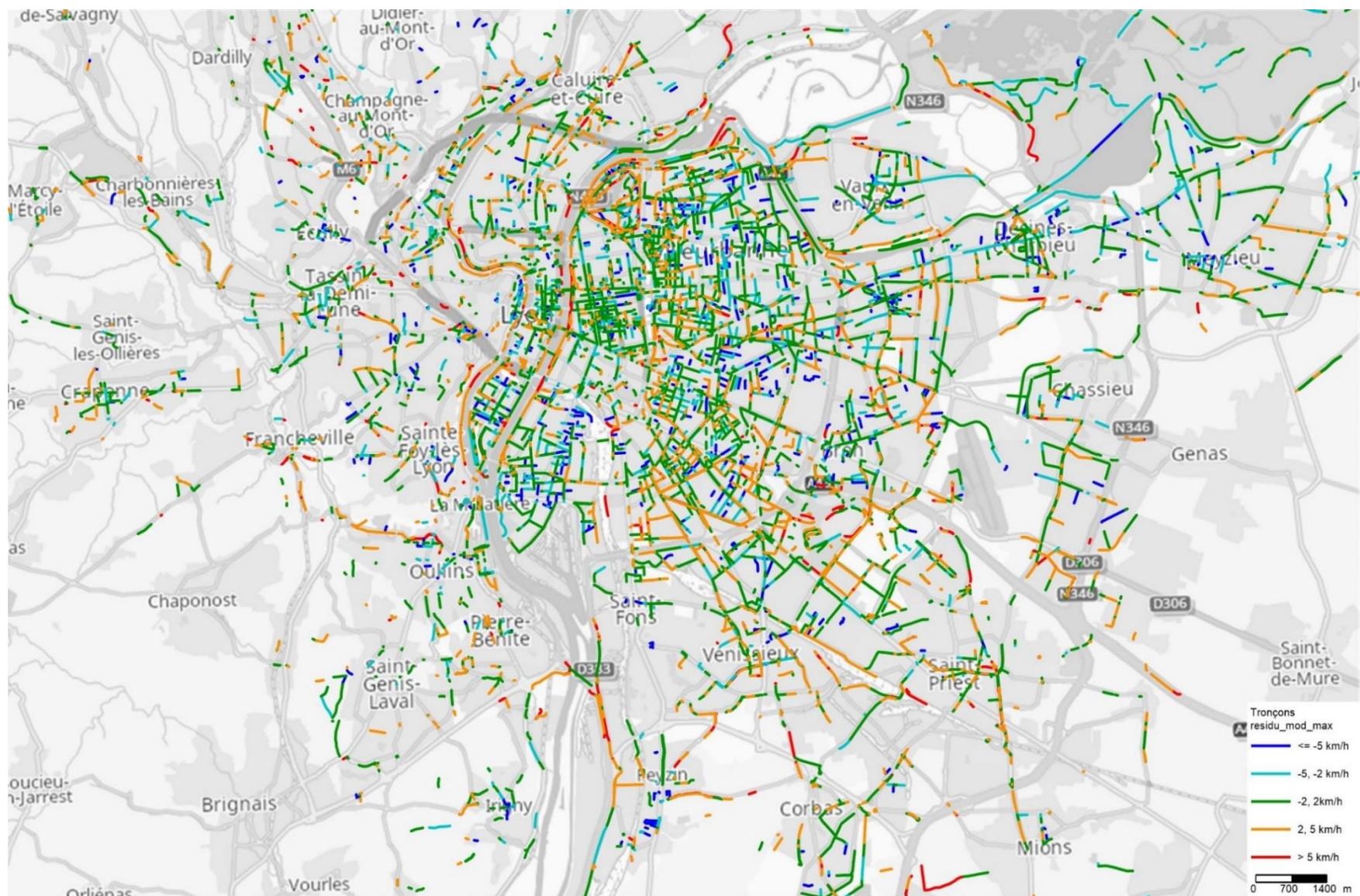


Fig. 3.10 : Résidus des vitesses (vitesse mesurée - vitesse prédite) sur les tronçons de la base sur laquelle a été entraîné le modèle

Cependant, les échantillons de test et d'entraînement contenant un grand nombre de tronçons tirés au hasard, les domaines de valeurs des variables explicatives de la vitesse pour les deux échantillons sont similaires. Ce résultat n'exclut donc pas une plus grande erreur sur des tronçons pour lesquels les variables explicatives prennent des valeurs extrêmes par rapport à la base de tronçons sur laquelle il a été entraîné.

Les sources d'erreur du modèle peuvent être déterminées en analysant la géographie des résidus. La figure 3.10 donne les résidus des vitesses sur chaque tronçon de la base séparée pour les deux modèles. Au contraire, le modèle maximaliste sous-estime assez fortement certains tronçons classés `footway_path` ou `pedestrian`, par exemple dans le parc de la Tête d'Or, dans le sixième arrondissement de Lyon ou sur les quais de Saône. En effet, ces catégories peuvent cacher d'importantes disparités de fréquentation par les piétons et par conséquent d'interactions avec les cyclistes.

On observe par ailleurs que la vitesse est sous-estimée sur les quais bas du Rhône. Dans ce cas, on peut l'expliquer par le fait que ces tronçons sont peu impactés par la densité, car à l'écart de la circulation, des piétons et des stationnements. D'autres tronçons peuvent être dans le même cas, comme particulièrement le tunnel de la Croix-Rousse (d'où aucune vitesse n'a été enregistré du fait de l'absence de signal), pour lequel la densité en surface ne peut pas expliquer la vitesse de circulation dans le tunnel.

De manière plus générale, bien que cette variable permette d'approcher beaucoup mieux les vitesses pratiquées, le lien entre la densité et la vitesse des vélos semble s'expliquer très indirectement : par la circulation de plus de piétons, par plus de stationnement, des rues plus étroites... (section 3.3.4). La pertinence de cette variable comme déterminant de la vitesse des vélos reste donc à questionner, sachant que certaines conditions d'aménagement semblent permettre une décorrélation de la vitesse par rapport à la densité.

Au contraire, certains tronçons partagés avec les piétons, classés `footway_path` ou `pedestrian`, voient leur vitesse largement sous-estimée, par exemple dans le parc de la Tête d'Or, dans le sixième arrondissement de Lyon ou sur les quais de Saône. En effet, ces catégories peuvent cacher d'importantes disparités quant à la largeur ou à la fréquentation par les piétons et par conséquent une diversité de situations d'interaction entre piétons et cyclistes.

### 3.6.3 Application à un modèle à quatre étapes

L'objectif principal de cette étude sur les vitesses vélo est l'amélioration des prévisions du volume de déplacements par OD et par tronçon. Les résultats obtenus doivent donc ensuite être implémentés dans un MQE, en l'occurrence MODEL Y. Or, cette application peut également être une source d'erreur.

En raison de contraintes temporelles et afin que le modèle reste lisible pour les utilisateurs, le modèle de vitesse mis en œuvre est un modèle linéaire plus simple, dont les coefficients sont donnés au tableau 3.6.

En raison de la simplification du réseau routier dans MODEL Y, qui se trouve être une caractéristique fréquente dans les MQE, il n'a pas été possible d'estimer le modèle directement sur le réseau inclus dans le modèle. En effet, les cyclistes peuvent circuler sur des tronçons non-représentés. Il est exclu d'associer une portion de trace au tronçon le plus proche si cette portion n'emprunte pas ce tronçon précisément. Deux tronçons géographiquement très proches peuvent représenter deux environnements très différents pour un cycliste. Il serait alors possible de supprimer les portions de traces enregistrées sur des tronçons non-représentés, à condition de pouvoir les repérer de manière fiable, cependant cela requiert une grande quantité de données pour garantir de conserver un échantillon suffisant pour des analyses statistiques sur les tronçons représentés dans le modèle.

		Nb d'observations	19 706		
		R <sup>2</sup>	0,246		
		R <sup>2</sup> ajusté	0,245		
<i>Intitulé</i>	<i>Modalité</i>	Coefficient	Erreur standard	T	p
<i>(Intercept)</i>		18,63	0,05	375	<10 <sup>-3</sup>
<i>Dens_pop_emp_uni</i>		-1,320*10 <sup>-4</sup>	0,022*10 <sup>-4</sup>	-61	<10 <sup>-3</sup>
<i>Longueur</i>		4,13	0,31	13	<10 <sup>-3</sup>
<i>Pente</i>		-51,3	2,5	20	<10 <sup>-3</sup>
<i>AM lane</i>		3,24	0,09	36	<10 <sup>-3</sup>
<i>AM sharebusway</i>		3,35	0,18	19	<10 <sup>-3</sup>
<i>AM mixedfacilities</i>		-2,97	0,47	-6,3	<10 <sup>-3</sup>
<i>AM cycleway</i>		1,77	0,10	17	<10 <sup>-3</sup>
<i>AM greenway</i>		0,63	0,17	3,7	<10 <sup>-3</sup>

Tableau 3.6 : Estimation du modèle linéaire simplifié mis en œuvre dans MODEL Y (modalité AM de référence : « none » : pas d'aménagement)

Au vu des nombreuses conditions, il a donc été plus simple de réaliser les analyses statistiques sur un réseau plus exhaustif comme le réseau OSM, d'autant plus que la géométrie des données GV suit également le réseau OSM, facilitant le map-matching (section 3.3.1). Les attributs des tronçons ne sont toutefois pas définis exactement de la même manière dans les deux cas.

Pour les aménagements cyclables ou les catégories de voies, un travail de mise en correspondance doit donc être fait entre les modalités définies dans les deux réseaux. Cette mise en correspondance peut représenter une source d'erreurs en raison de définitions différentes d'un organisme à l'autre. Par exemple, Géovélo code en PC certains tronçons codés en VV dans MODEL Y. La différence pratique dans l'aménagement est mince, en revanche, ce changement de classification peut remettre en question les valeurs obtenues à travers le modèle de vitesse vélo.

La longueur des tronçons est une variable plus problématique. En effet, outre le fait que certains nœuds peuvent couper un tronçon en deux sans qu'ils ne représentent une réelle intersection, ce qui limite l'intérêt de cette variable, la non-représentation de certains tronçons, donc de certaines intersections, rend les valeurs de longueur inconsistantes entre les réseaux OSM et MODEL Y. Dans le cas particulier de MODEL Y, le centre de la Métropole de Lyon est représenté de manière quasi-exhaustive. Nous avons donc fait le choix d'utiliser le coefficient donné par le modèle de vitesse.

Afin d'améliorer la fiabilité de la correspondance entre les deux réseaux, il peut être envisagé d'associer un tronçon du réseau du MQE à chaque tronçon OSM représenté dans celui-ci par des algorithmes de map-matching. Il peut ainsi être possible d'analyser les correspondances entre les valeurs des différents attributs et d'estimer des fonctions permettant de d'associer les valeurs des attributs d'un réseau à celles de l'autre. Cette procédure, particulièrement le map-matching, peut toutefois être complexe et chronophage et n'est pas exempte d'erreurs.

En fonction de l'objectif de la démarche d'évaluation des vitesses, certaines variables, comme dans le cas présent, le type d'aménagement cyclable, doivent nécessairement être présentes. Une attention particulière doit tout de même être portée au choix des variables explicatives, pour que celles-ci soient transposables au modèle de déplacements auquel on s'intéresse.

### 3.6.4 Limites des hypothèses de la modélisation

En premier lieu, on peut noter que d'autres déterminants de la vitesse, mis en avant dans la recherche, auraient pu être intégrés à la modélisation. C'est le cas des caractéristiques des

intersections en amont ou en aval comme leur géométrie (Flügel et al. 2017), la présence ou non de feux de circulation (Strauss et Miranda-Moreno 2017), (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) ou de stops (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019), ou encore des caractéristiques du trafic motorisé comme la limite de vitesse (Flügel et al. 2017), (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019) ou le nombre de voies ouvertes au trafic automobile (Clarry, Faghih Imani, et Miller 2019). Toutes ces caractéristiques dépendent de choix d'aménagement faits par les gestionnaires d'infrastructures, peuvent être représentés dans les modèles de déplacement et impactent les conditions de circulation des cyclistes.

Par ailleurs, cette étude exclut le temps perdu aux intersections. Or il peut constituer une part importante du temps de trajet. Dans la Métropole du Grand Paris, on observe par exemple un temps d'arrêt de 49 secondes par km (Balaguier et al. 2022). Avec une vitesse moyenne de 14 km/h, prenant en compte ces temps d'arrêt, celui-ci représente dans ce cas 19% du temps de trajet. Connaître les déterminants du temps d'arrêt aux intersections peut permettre de prendre en compte les évolutions de l'aménagement aux intersections dans la prévision du volume de déplacements à vélo.

Les données utilisées peuvent également présenter quelques faiblesses. Premièrement, il ne nous a pas été possible de vérifier la qualité de l'association des positions GPS avec le réseau routier. Cette association peut générer des erreurs. Certaines peuvent être repérées, comme l'association de nombreuses traces sur le trottoir (section [3.3.6](#)), mais d'autres peuvent ne pas l'être.

L'enregistrement de traces avec d'autres modes que le vélo peut constituer une seconde limite, bien qu'encore une fois, il ne nous a pas été possible de vérifier sa réalité. La restriction à des tronçons où plus de 20 passages ont pu être enregistrés (section [3.3.1](#)) a dû limiter cet impact, mais certaines vitesses parmi les plus élevées ont pu être en fait mesurées à bord d'un véhicule motorisé. Il est également possible que certains tronçons soient fréquentés de manière répétée par un faible nombre de cyclistes très expérimentés, ce qui expliquerait qu'ils dévient de la tendance générale. A l'inverse, une part significative des vitesses les plus lentes ont pu être enregistrées par des piétons, sachant qu'environ 1,9% des tronçons les plus lents présentent une vitesse inférieure à 7 km/h.

Il est également possible que les utilisateurs de Géovélo soient un échantillon peu représentatif des cyclistes en général en termes de comportement. Par ailleurs, comme déjà mentionné aux sections [3.2](#) et [3.6.1](#), les données fournies ne permettent pas d'isoler l'effet direct du tronçon sur la vitesse de celui qu'il peut avoir indirectement sur le profil des cyclistes fréquentant un tronçon ou un autre. Des traces entières, qu'il est possible de relier à l'identifiant du cycliste qui les a parcourues associées cycliste telles que les traces à disposition pour l'étude menée dans la Métropole de Bordeaux peuvent permettre de dissocier ces effets.

L'agrégation des données est d'autant plus problématique qu'elle ne permet pas de distinguer les VAE des VSA, là où les premiers ont une accélération plus forte, donc sont moins impactés par les arrêts et les intersections, mais aussi par les pentes, en plus d'avoir une vitesse moyenne plus élevée (Flügel et al. 2017). La démocratisation des VAE permet donc au vélo d'être pertinent sur certaines paires OD où la distance et les pentes pouvaient décourager les utilisateurs de VSA. La représentation du gain d'importance des VAE accompagnée d'une représentation fidèle de l'attractivité de cette option dans les MQE permettrait également de mieux anticiper l'évolution du volume de déplacements à vélo.

Au vu des résultats obtenus, on peut se poser la question de la pertinence de la vitesse comme mesure de l'attractivité des tronçons. En effet, la vitesse moyenne pratiquée par les cyclistes sur un tronçon semble pouvoir être reliée au risque réel ou apparent à emprunter ce tronçon : les tronçons sans aménagement affichent une vitesse plus grande que les PC pour la

même catégorie de voie et les axes principaux affichent une vitesse plus grande que les voies plus locales, particulièrement sur les tronçons sans aménagement dédié. Ces tronçons présentant un risque apparent plus important, peuvent pousser les cyclistes à fournir un effort supplémentaire pour réduire l'écart de vitesse avec le trafic automobile, un effort auquel ils n'auraient peut-être pas consenti dans des conditions plus apaisées, même pour gagner du temps. Ils peuvent également décourager les cyclistes les moins expérimentés amenant à une plus grande part de cyclistes confirmés, plus rapides. Une vitesse plus importante peut alors être le signe qu'au contraire, un tronçon est peu attractif. Cette faible attractivité ne serait alors pas due à un temps de trajet accru, mais à une insécurité réelle ou ressentie plus importante.

L'étude menée sur la Métropole de Lyon concernant les vitesses des vélos, incluant également une réestimation des paramètres du choix du mode, est en partie motivée par une sous-estimation de la hausse du trafic, et ce, malgré l'ajout de nouveaux aménagements dans le modèle. Cette sous-estimation peut être due à la non-prise en compte de l'évolution des aspects psychologiques ou culturels liés au vélo, qui ne sont pas explicitement exprimés dans les fonctions d'utilité. Cependant elle peut aussi être en partie causée par une sous-estimation de l'importance du sentiment de sécurité pour les nouveaux ou potentiels cyclistes, conduisant à un impact trop faible de la construction d'aménagements cyclables sur les parts modales simulées. Le temps de trajet n'expliquerait donc qu'une partie du gain d'intérêt réel ou potentiel pour le vélo. Dans la partie suivante, nous nous intéresserons donc à l'impact que peuvent avoir les aménagements cyclables sur l'attractivité d'un itinéraire au-delà du temps de trajet.

## 4. Sécurité et confort – préférence pour les aménagements cyclables

### 4.1 Introduction

En plus du temps de trajet, la perception de la sécurité à vélo semble être un déterminant important dans le choix de pratiquer ou non ce mode de transport. Comme mentionné en [introduction](#), les résultats de l'Enquête sur les pratiques environnementales des ménages de 2016 (notre-environnement 2024), (EPEM 2016), indiquent que 25% des français sondés citent des « Pistes cyclables plus nombreuses et plus sécurisées » comme facteur qui pourrait les inciter à utiliser davantage le vélo. D'après une enquête de l'Observatoire du rapport des français au vélo, réalisée en 2022 (Descarrega et Crozet 2023), 61% des non-cyclistes déclarent avoir peur d'utiliser le vélo pour les trajets du quotidien. Il semble donc pertinent de considérer ce facteur dans les prévisions de trafic.

Cette supposition est appuyée également par une étude menée sur des villes italiennes de 0 à 100 000 habitants montrant que le degré d'équipement des villes en infrastructures cyclables permet d'expliquer respectivement 19% et 18% de la variance dans la part modale pour les villes de 10 000 à 50 000 et de 50 000 à 100 000 habitants (Cappelli et al. 2024). Une telle corrélation n'indique pas nécessairement une causalité directe : l'étude considère la ville au sens large et pas les individus. A ce niveau, les infrastructures cyclables ont pu être construites en raison d'une grande part modale du vélo plus que l'inverse. Toutefois, de tels résultats laissent penser que les aménagements cyclables peuvent favoriser cette pratique.

Etant donné que les MQE intègrent des modèles de choix discrets, notamment en ce qui concerne le choix modal (section [2.2.5](#)), les déterminants du choix modal au niveau individuel et la spécification de l'utilité du mode vélo (section [2.2.2](#)) peuvent être à interroger. Dans une étude menée à Barcelone (Braun et al. 2016), des chercheurs ont interrogé 765 individus concernant leur choix modal pour leurs déplacements domicile-travail et leur perception des conditions de circulation à vélo. Ils ont par ailleurs pu comparer les réponses des participants avec les infrastructures disponibles sur un itinéraire rejoignant l'origine à la destination.

La méthode employée dans cette étude s'intéresse donc directement au choix modal, en faisant une hypothèse sur l'itinéraire qui serait emprunté. Les données utilisées dans cette étude sont analogues aux résultats des EMC<sup>2</sup>, en ce qu'elles renseignent sur l'origine, la destination et le choix modal effectué sans mentionner l'itinéraire emprunté ou envisagé lors du choix. Formuler des hypothèses sur le choix d'itinéraire peut donc permettre d'analyser d'autres déterminants du choix modal que le temps de trajet lors du calage d'un modèle de déplacements.

Une autre approche peut consister à analyser les choix d'itinéraires, soit à travers des enquêtes de préférences déclarées (Hunt et Abraham 2007), (Márquez et Soto 2021), soit via des préférences révélées, c'est-à-dire en analysant les choix d'itinéraires effectués par les cyclistes (Chen, Shen, et Childress 2018), (Ton et al. 2017), (Casello et Usyukov 2014), (Huber, Lindemann, et Schröter 2023). L'avantage des enquêtes de préférence déclarées est qu'il est possible de contrôler les conditions d'expérimentation et d'isoler les variables à analyser. Ces enquêtes permettent par ailleurs d'évaluer le comportement d'individus dans des situations dans lesquels il est difficile de les observer (par exemple de proposer des choix d'itinéraires vélo à des non-cyclistes). Cependant, contrairement aux préférences révélées on ne peut être certain que les préférences déclarées correspondent réellement aux choix que feraient les individus s'ils étaient placés dans les situations présentés (Casello et Usyukov 2014).

L'approche par itinéraire est présentée par (Hunt et Abraham 2007) comme avantageuse pour « informer la conception et le développement de politiques publiques afin d'améliorer et d'encourager le vélo comme mode de déplacement alternatif ». Cependant (Ton et al. 2017) rappelle que le choix d'itinéraire est réalisé seulement après le choix modal (section [2.1.2](#)). Les études portant sur le choix d'itinéraire, bien qu'elles permettent de relier plus directement les caractéristiques d'un tronçon à son attractivité, induisent un biais dès l'origine : l'échantillon

analysé ne peut être composé que de cyclistes, surtout s'il s'agit de préférences révélées. La suite de cette étude s'appuie donc sur l'hypothèse que la perception de la sécurité par les cyclistes est similaire à celle de la population générale. Cette hypothèse sera discutée à nouveau par la suite.

Cette seconde étude portera donc sur l'analyse des choix d'itinéraires effectués par 347 cyclistes dans et autour de la Métropole bordelaise afin de déterminer les déterminants de l'attractivité des tronçons pour les cyclistes.

## 4.2 Données à disposition

Les données utilisées pour l'analyse consistent en 3984 traces GPS enregistrées par 347 cyclistes dans le département de la Gironde entre le 5 février et le 10 avril 2024. Chaque trace consiste en une suite de positions espacées en général d'une seconde, accompagnée d'une horodate et d'une vitesse.

Les cyclistes forment en réalité deux sous-ensembles. 87 cyclistes ont été recrutés par Avenir Focus, une entreprise spécialisée dans les études de marché, missionnée par PTV Mobility France. Ces cyclistes ont fourni 1513 traces correspondant à 18% de la distance parcourue. Les 260 autres cyclistes ont été recrutés au sein des équipes de Bordeaux Métropole et ont fourni 2471 traces. Les cyclistes enquêtés se sont également vus poser un questionnaire permettant d'inclure dans l'analyse des variables relatives à l'individu.

Le réseau routier utilisé comme support des données est le réseau OSM (OpenStreetMap France s. d.), mis sous forme de graphe. Le réseau OSM est normalement constitué de nœuds et de voies. Une voie correspond géométriquement à une polyligne en ce qu'elle peut relier un grand nombre de nœuds (plus que deux), ainsi que supporter les deux sens de circulation (Way — OpenStreetMap Wiki 2024). Toutefois pour le traitement des itinéraires, chaque voie a été séparée en tronçons, chaque tronçon reliant seulement deux nœuds et ne représentant qu'un sens de circulation.

Les aménagements cyclables ont été ajoutés à ce réseau à partir de la base nationale des aménagements cyclables (Schéma aménagements cyclables s. d.). Cette base de données répertorie l'ensemble des aménagements cyclables en France en distinguant les deux sens de circulation et les classe en 12 catégories. Le tableau 4.1 détaille les catégories d'aménagements cyclables. La géométrie des tronçons représentés dans la base nationale étant basée sur le réseau OSM, les deux bases de données ont pu être associées par proximité géométrique : une polyligne représentant un aménagement cyclable est associée à un tronçon du réseau OSM si et seulement si les deux conditions suivantes sont respectées :

- l'identifiant de la voie OSM dont le tronçon fait partie correspond à celui de la voie dont fait partie la polyligne représentant l'aménagement cyclable ;
- il existe un sommet de la polyligne, l'un proche (à moins de 5 mm) du nœud d'origine du tronçon et un autre proche du nœud de destination.

Enfin, les pentes des tronçons se basent sur le RGE ALTI (RGE ALTI® | Géoservices s. d.) avec une résolution de 5 mètres.

Catégorie d'aménagement	Description	Nb de tronçons	Longueur cumulée (km)
Aucun		703 590	85 025
PC	Piste cyclable	21 514	2 400
BC	Bande cyclable	10 035	501
MPV	Aménagement mixte piéton-vélo hors voie verte	7 235	491
VV	Voie verte (accessible)	3 562	312
Autre		3 894	243
DSC NM	Double-sens cyclable non matérialisé	2 865	168
CBV	Couloir bus-vélo	1 383	53
DSC bande	Double-sens cyclable – bande	634	32
CVCB / Chaussidou	Chaussée à voie centrale banalisée / « Chaussidou » : une voie centrale pour les deux sens de circulation et deux bandes cyclables. Les automobilistes empruntent la BC à leur droite s'ils doivent croiser un autre véhicule	72	5,4
VR	Vélo-rue : les cyclistes sont prioritaires sur les automobilistes qui ne peuvent pas les dépasser	21	1,6
DSC piste	Double-sens cyclable – piste	14	0,6
<b>Total</b>		<b>754 855</b>	<b>89 232</b>

Tableau 4.1 : Description et fréquence des catégories d'aménagements cyclables dans le réseau girondin (une voie à double-sens est comptée une fois pour chaque sens)

## 4.3 Assemblage des données

### 4.3.1 Définitions

Afin d'assurer la clarté des paragraphes suivants, les termes utilisés par la suite doivent être définis :

- Trace : suite de points géolocalisés, horodatés et associés à une vitesse, idéalement enregistrée d'un seul tenant.
- Chemin : suite de tronçons associés aux points d'une trace reproduisant l'itinéraire suivi lors de l'enregistrement de la trace.
- Élément de chemin : tronçon constitutif d'un chemin. Le choix de nommer un tronçon « élément de chemin » signifie qu'il est considéré pour la place qu'il occupe dans le chemin plutôt que pour la place qu'il occupe dans le réseau. Les éléments de chemin peuvent être associés à d'autres caractéristiques liées à la trace associée comme les variables associées au cycliste ou le temps de parcours.
- Mouvement au nœud (MN) : association du tronçon emprunté pour arriver à un nœud avec le tronçon emprunté pour le quitter. Un MN peut être un mouvement de tourne-à-droite (TAD ou D), tout droit (TD), à gauche (TAG ou G) ou un demi-tour (DT).

### 4.3.2 Filtrages

En premier lieu, les traces ont été anonymisées. L'ensemble des points localisés dans un rayon de 100 m autour du point de départ et du point d'arrivée ont été supprimés limitant ainsi au minimum le nombre de personnes en contact avec des données personnelles telles que le lieu d'habitation ou de travail. Cette anonymisation a amené à la suppression de tous les points des 33 traces les plus courtes.

Un certain nombre de traces considérées comme invalides ont dû être écartées, selon leur vitesse et leur longueur. Pour ce tri, on ne considère que les points de trace en mouvement, c'est-à-dire où la vitesse enregistrée est supérieure à 1 m/s (3,6 km/h). Cela correspond à 88% des points de l'ensemble des traces. Les critères sur la vitesse permettent d'éviter que des itinéraires réalisés dans un autre mode que le vélo perturbent les résultats. Une trace est donc rejetée si :

- la moyenne des vitesses enregistrée sur les points en mouvement est supérieure à 10 m/s (36 km/h) : 4 traces ;
- au moins 10% des points en mouvement affichent une vitesse supérieure à 11 m/s (39,6 km/h) : 4 traces ;
- au moins 90% des points en mouvement affichent une vitesse inférieure à 2 m/s (7,2 km/h) : 27 traces ;
- moins de 60 points en mouvement ont été enregistrés sur la trace (soit moins d'une minute d'enregistrement) : 201 traces

### 4.3.3 Association au réseau – Map-matching

Afin de déterminer les caractéristiques de l'itinéraire emprunté, les points GPS doivent être associés à des tronçons. Le map-matching a été réalisé à l'aide de PTV Visum, un logiciel privé. Les détails de l'algorithme utilisé sont donc inconnus. Toutefois, voici quelques éléments du paramétrage de la procédure et principes déduits du comportement de l'algorithme :

- chaque point doit être associé à un tronçon situé à moins de 50 m de celui-ci ;
- la distance type sur l'ensemble de la trace entre les points et le tronçon qui leur est associé, doit être maintenue inférieure à 40 m ;
- tous les tronçons autorisés aux vélos ou aux piétons sont empruntables (les autoroutes, voies rapides et rails sont quasiment les seules exceptions), en pénalisant toutefois les tronçons autorisés aux seuls piétons d'un facteur 1,3 (le logiciel semble rechercher le chemin le plus court respectant les critères précédemment mentionnés) ;
- le chemin doit former une suite de tronçons consécutifs. Si cette condition ne peut pas être respectée et qu'une discontinuité apparaît dans le chemin, alors il est complété à l'aide d'un algorithme de recherche de chemin afin que le chemin soit navigable du début à la fin. Il reste possible de repérer les éléments de chemin (tronçons) qui n'ont été mis en correspondance avec aucun point de trace et ont été ajoutés pour combler les discontinuités.

Si les conditions de l'algorithme de map-matching ne peuvent pas être respectées, alors la trace n'est pas associée à un chemin. On ne peut alors pas connaître les caractéristiques des tronçons empruntés et la trace n'est pas exploitable. 131 traces se trouvent dans ce cas. Au total, 3585 traces, produites par 341 cyclistes seront incluses dans l'analyse. La figure 4.1 résume l'ensemble des traces exclues de l'analyse.

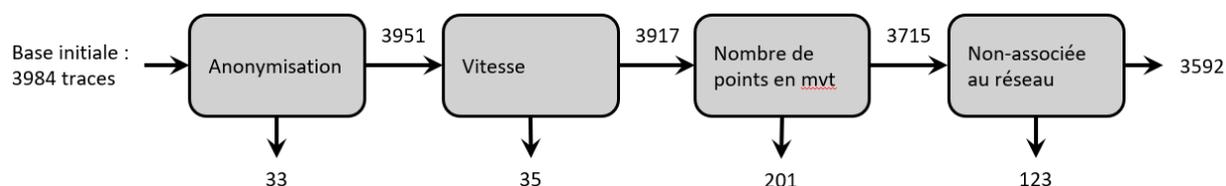


Fig. 4.1 : Résumé des filtrages effectués sur les traces avant analyse des itinéraires

### 4.3.4 Discontinuités

Des discontinuités spatiales ou temporelles peuvent intervenir dans une trace pour diverses raisons. Dans cette section, nous définirons les discontinuités à partir de l'ensemble des

points en mouvement, c'est-à-dire, des points où la vitesse enregistrée vaut au moins 1 m/s, et non de tous les points. On s'intéresse à la différence de position ou d'horodate entre deux points en mouvement consécutifs dans une trace.

On considère que l'écart temporel entre deux points en mouvement consécutifs est une discontinuité temporelle quand il est supérieur à 2 minutes, en considérant qu'une traversée d'intersection ne peut pas nécessiter un arrêt supérieur à cette durée. Un tel arrêt signifie donc que le cycliste s'est arrêté parce qu'il a atteint une destination intermédiaire. Auquel cas le passage par ce point était prévu et l'itinéraire ne peut être analysé qu'en considérant ce point comme une destination puis une origine. Ce cas de figure se présente 472 fois dans les 3585 traces.

On considère que l'écart spatial entre deux points en mouvement consécutifs est une discontinuité spatiale quand il est supérieur à 50 m. Ce décalage peut être dû à un défaut de signal. Il est alors impossible de connaître précisément l'itinéraire du cycliste. Ce seuil correspond également au seuil de tolérance de l'algorithme de map-matching. Rétrospectivement, ce critère aurait pu être ignoré puisqu'il est possible de reconnaître les éléments de chemin reconstruits pour combler les discontinuités dans le chemin. Cette situation se présente 175 fois (en excluant les cas où elle coïncide avec une discontinuité temporelle).

Lors de la procédure de Map-matching, certains éléments de chemins sont reconstruits pour combler les discontinuités dans la séquence des éléments de chemins (section 4.3.3). A partir d'ici, on considère une discontinuité dans le chemin si au moins 3 éléments de chemin consécutifs ne sont associés à aucun point de trace et sont reconstruits. Cette situation se présente 3657 fois, (dont 3371 qui ne coïncident pas avec une discontinuité spatiale ou temporelle).

Un attribut supplémentaire nommé « subtrace » est ajouté aux éléments de chemins. A chaque discontinuité, étant donné que l'itinéraire est inconnu, le chemin est séparé en deux sous-chemins. On analysera donc les choix d'itinéraire des cyclistes sur chaque sous-chemin.

#### 4.3.5 Alternatives

Pour une paire OD donnée, un cycliste choisit son itinéraire parmi un très grand nombre d'alternatives. Toutefois il n'est pas réaliste de vouloir prendre en compte tous les itinéraires possibles. Le modèle de choix doit donc être entraîné sur un ensemble d'alternatives plus restreint. (Ton et al. 2017) propose d'identifier l'ensemble des alternatives pour chaque OD parmi les itinéraires effectivement empruntés par des cyclistes. Cela sous-entend qu'il faut que plusieurs traces aient été enregistrées pour une même OD et qu'au moins deux itinéraires différents aient été suivis. En pratique, cette méthode nécessite un grand nombre de traces sur une zone restreinte. Les origines et destinations sont regroupées par proximité géographique par le biais d'algorithmes de clustering.

En l'occurrence, l'équipe de Ton dispose de 8847 traces viables sur le centre-ville d'Amsterdam. Cependant seules 3045 d'entre elles, respectant les conditions décrites au paragraphe précédent, ont pu être analysées dans son modèle de choix, en rassemblant les OD des traces en 200 clusters. Les origines et destinations rassemblées au sein de chaque cluster sont ensuite toutes assimilées à un seul point afin de pouvoir comparer les itinéraires choisis entre les traces. Cette méthode induit donc une imprécision entre l'origine et la destination réelle et celle qui est utilisée pour le calage du modèle.

Les traces enregistrées sur le territoire girondin sont en l'occurrence moins nombreuses, même en considérant les sous-traces, et réparties sur une aire beaucoup plus large. Une telle approche risque donc de ne pas être viable. Afin d'évaluer les déterminants du choix d'itinéraire, le choix a été donc fait de générer des alternatives pertinentes parmi le grand nombre de chemins possibles. Casello et Usyukov proposent de générer quatre alternatives supplémentaires en plus du chemin réellement emprunté, en supposant que la sécurité et la distance sont les deux aspects

que l'on souhaite confronter. Ils choisissent donc de générer, quand c'est possible, deux chemins plus courts mais moins sûrs et deux chemins plus longs et plus sûrs (Casello et Usyukov 2014).

En s'inspirant de la méthode de Casello et Usyukov, les alternatives sont générées de sorte de confronter les exigences de distance et de sécurité. On applique l'algorithme A\*, un algorithme rapide de recherche de plus court chemin (A\* search algorithm s. d.). La recherche du plus court chemin nécessite l'attribution d'une valeur de coût à chaque tronçon. L'algorithme recherche en fait le chemin de coût minimal en sommant le coût des tronçons. En l'occurrence la fonction de coût est définie comme la longueur du tronçon multipliée par un coefficient dépendant de son aménagement. Quatre grandes catégories d'aménagements ont donc été créées pour simplifier la fonction de coût. A celles-ci s'ajoutent les tronçons interdits aux vélos mais autorisés aux piétons. En plus du chemin réalisé, quatre alternatives sont générées à l'aide d'un jeu de coefficients numéroté de 1 à 4, allant de celui qui priorise le plus la distance (considérant que tous les tronçons sont équivalents) à celui qui priorise le plus les aménagements (en favorisant fortement les tronçons aménagés pour les vélos). Le tableau 4.2 détaille les quatre jeux de coefficients.

Grande catégorie	Aménagements inclus	1	2	3	4
<b>Interdit aux vélos (autorisé aux piétons)</b>		1,3	1,6	2	2,5
<b>Sans aménagement dédié</b>	Aucun, autre, DSC NM	1	1	1	1
<b>Mixte piétons vélos</b>	MPV, rampe	1,1	1,2	1,4	1,7
<b>Aménagement non protégé</b>	BC, CBV, chaussidou, DSC bande, VR	0,95	0,9	0,8	0,5
<b>Aménagement protégé ou séparé</b>	DSC piste, PC, VV	0,9	0,7	0,5	0,2

*Tableau 4.2 : Jeux de coefficients (colonnes) utilisés dans la fonction de coût favorisant (<1) ou pénalisant (>1) les tronçons en fonction de leur aménagement, lors de la génération des alternatives 1 à 4 pour chaque OD*

Si un jeu de coefficients donne lieu à un chemin déjà présent dans l'ensemble d'alternatives, alors ce chemin n'est pas conservé. Enfin, si toutes les alternatives générées pour un sous-chemin sont identiques audit sous-chemin, alors ce choix n'est pas étudié. Ainsi, sur les 7610 sous-chemins étudiés, 6301 se sont vus associer chacun en moyenne 1,1 alternatives générées différentes. Ce sont donc autant de paires OD pour lesquelles des alternatives seront comparées.

#### 4.3.6 Description des données

En plus des pentes et aménagements cyclables, les différents types de MN ont été recensés et ajoutés aux éléments de chemins. Un chemin peut donc être caractérisé par les attributs suivants :

- longueur totale ;
- longueur parcourue pour chaque type d'aménagement (12 attributs) ;
- longueur par catégorie de pente, 5 attributs :
  - longueur parcourue en forte descente : pente  $\leq -5\%$  ;
  - longueur parcourue en descente modérée :  $-5\% < \text{pente} \leq -2\%$  ;
  - longueur parcourue sans pente remarquable :  $-2\% < \text{pente} < +2\%$  ;
  - longueur parcourue en montée modérée :  $2\% \leq \text{pente} < 5\%$  ;
  - longueur parcourue en forte montée : pente  $\geq 5\%$  ;
- nombre de MN par type (4 attributs).

Les chemins parcourus ont une longueur moyenne de 2,7 km avec des quartiles valant 0,85 km, 1,9 km et 3,7 km. La figure 4.2 décrit la distribution des longueurs de chemins.

Le tableau 4.3 décrit la répartition des chemins parcourus par type d'aménagement. Environ la moitié des déplacements enregistrés sont parcourus sur des tronçons sans

aménagement dédié. Les aménagements les plus fréquemment utilisés par l'échantillon sont les pistes et bandes cyclables, ainsi que les couloirs bus-vélo, ce qui ne correspond pas nécessairement à leur fréquence sur le réseau. Certains types d'aménagements comme les CBV sont toutefois sur-représentés en ville, ce qui peut expliquer ces résultats.

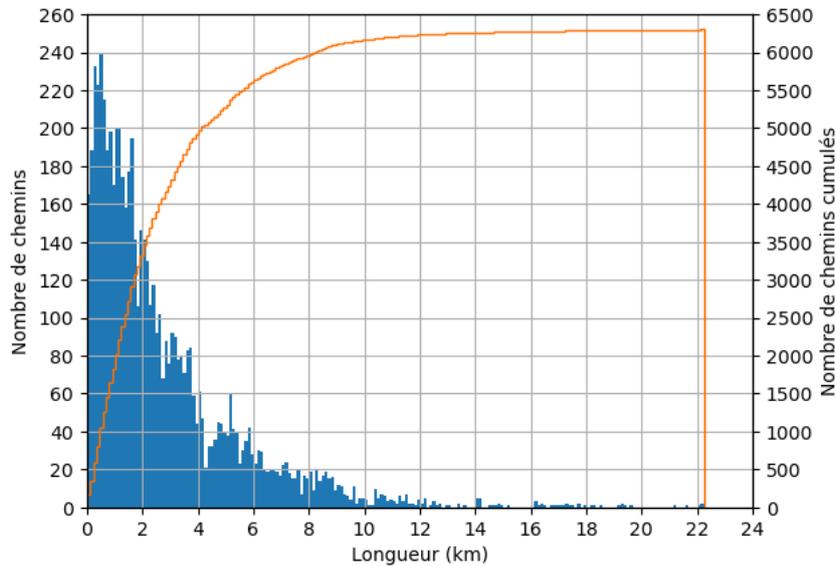


Fig. 4.2 : distribution par longueur des chemins parcourus

Catégorie d'aménagement	Longueur totale parcourue (km)	Part	Grande catégorie	Part
<b>Aucun</b>	7751	45 %	<b>Sans aménagement dédié</b>	50 %
<b>Autre</b>	578	3,4%		
<b>DSC NM</b>	313	1,8 %	<b>Aménagement non-protégé</b>	24 %
<b>BC</b>	2675	15,5 %		
<b>CBV</b>	1 311	7,6%		
<b>DSC bande</b>	80	0,47 %		
<b>VR</b>	29	0,17 %		
<b>Chaussidou</b>	4,8	0,03 %	<b>Aménagement protégé / séparé</b>	23 %
<b>PC</b>	3688	21 %		
<b>VV</b>	323	1,9 %		
<b>MPV</b>	270	1,6 %	<b>Mixte piéton/vélo</b>	2 %
<b>Rampe</b>	0,1	0,0006 %		
<b>Interdit vélos</b>	217	1,3 %	<b>Interdit vélos</b>	1 %
<b>Total</b>	<b>17 239</b>			

Tableau 4.3 : Répartition des éléments de chemin parcourus par type d'aménagement

Quelques tendances peuvent être dégagées de la base de données. Pour 4080 des 6301 OD étudiées, le chemin choisi par le cycliste était le plus court. Pour 2192 d'entre eux, le chemin choisi était le plus long. Enfin, pour 29 d'entre eux, le chemin choisi n'était ni le plus court, ni le plus long. Pour chemin généré, on considère alors l'écart entre la proportion d'un aménagement donné avec cette même proportion sur le chemin choisi. Le tableau 4.4 décrit les résultats obtenus sur l'ensemble des chemins générés et sur les chemins générés plus courts que le chemin choisi. On remarque premièrement que les chemins générés plus courts que le chemin choisi sont effectivement moins favorables à la circulation à vélo. Cet écart est d'ailleurs plus important qu'entre l'ensemble des chemins générés et les chemins choisis. A priori, si un chemin plus court existe et n'est pas emprunté, la part de tronçons interdits aux vélos ainsi que le manque d'aménagements protégés semble être ce qui motive la décision de ne pas l'emprunter.

Grande catégorie d'aménagement	Ecart moyen chemins générés	Ec. moy. chem. générés plus courts que le chem. choisi
Interdit	+5,3	+9,5
Aucun	+4,7	+4,1
Non-protégé	-5,5	-5,9
Protégé	-4,5	-7,4

Tableau 4.4 : moyenne de l'écart en points de pourcentage de chaque grande catégorie d'aménagement entre tous les chemins générés et le chemin choisi pour l'OD (première colonne) et entre les chemins générés plus courts que le chemin choisi et le chemin choisi

## 4.4 Modélisation des choix d'itinéraire

### 4.4.1 Le modèle logit path-size

L'une des caractéristiques principales du modèle Logit Multinominal (section 2.2.4) est son indépendance aux alternatives non-pertinentes : le rapport des probabilités de deux alternatives est constant vis-à-vis de la présence ou non d'une troisième alternative dans l'ensemble d'alternatives ou de sa probabilité. Cette propriété peut mener à des cas résultats aberrants, comme le paradoxe des bus bleus et rouges, illustrant le fait que considérer deux alternatives quasiment équivalentes (les bus bleus et les bus rouges) comme deux alternatives séparées peut fausser les estimations des modèles de choix (Ben-Akiva et Bierlaire 1999).

Dans le cas du choix d'itinéraire, ce paradoxe apparaît lorsque deux chemins se superposent sur une part significative de leur longueur. La figure 4.3 illustre ce cas. Dans l'exemple, trois alternatives sont disponibles pour se déplacer de O à D, les chemins 1, 2a et 2b. En supposant que les trois alternatives ont la même utilité, pour chaque paire d'alternatives  $(i, j)$ , le rapport de leurs probabilités vaut  $\frac{P_i}{P_j} = 1$  donc la probabilité de choix de chaque alternative vaut  $\frac{1}{3}$ , alors qu'intuitivement, elle devrait être répartie approximativement à 50%, 25% et 25% entre 1, 2a et 2b à cause de la quasi-équivalence de 2a et 2b. Le modèle logit path-size (PS) permet alors de prendre en compte la non-indépendance entre les alternatives.

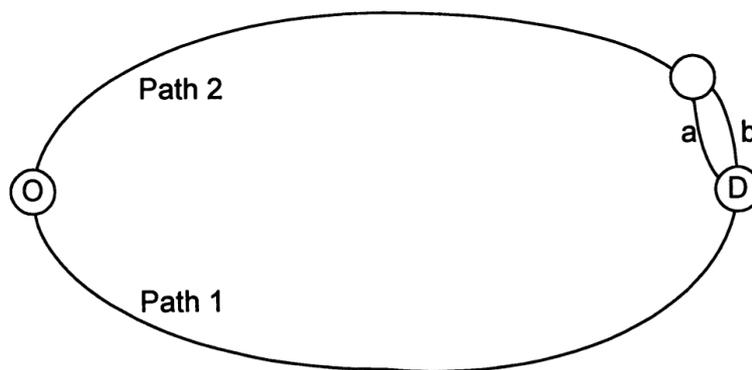


Fig. 4.3 : Choix d'itinéraires et indépendance des alternatives. Source : (Ben-Akiva et Bierlaire 1999)

D'autres méthodes existent pour tenir compte de la dépendance entre les alternatives, cependant l'avantage principal du logit PS est qu'elle conserve la structure du logit multinomial et requiert moins de calculs (Chen, Shen, et Childress 2018), (Dane et al. 2020). Un terme supplémentaire est calculé, nommé path-size. Ce terme représente le fait qu'une alternative

partageant une portion avec une autre n'est pas une alternative totalement distincte des autres. Ben-Akiva et Bierlaire proposent donc pour l'individu  $n$  et l'alternative  $i$  l'expression :

$$PS_{in} = \sum_{a \in \Gamma_i} \frac{l_a}{L_i} \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \delta_{aj} \frac{L^*_{C_n}}{L_j}}$$

Avec :

- $\Gamma_i$  l'ensemble des liens du chemin  $i$
- $l_a$  la longueur du tronçon  $a$
- $L_i, L_j$  la longueur du chemin  $i$  (resp.  $j$ )
- $C_n$  l'ensemble des alternatives disponibles pour l'individu  $n$
- $L^*_{C_n}$  la longueur du plus court chemin dans  $C_n$
- $\delta_{aj}$  l'indicatrice de  $a$  pour  $j$  : vaut 1 si  $j \in a$ , 0 sinon

Dans l'exemple donnée en figure 4.3, en supposant que les trois chemins valent sont de longueur  $L$ , et que la portion commune aux deux chemins 2a et 2b a pour longueur  $L - \delta l$ , alors  $PS_1 = 1$  et  $PS_{2a} = PS_{2b} = \frac{L + \delta l}{2L}$ .

Dans le cas où on observe une faible différence de longueur entre les alternatives (Ton et al. 2017), d'autres études (Chen, Shen, et Childress 2018), (Ton et al. 2017), (Dane et al. 2020) utilisent une expression plus simple :

$$PS_{in} = \sum_{a \in \Gamma_i} \frac{l_a}{L_i} \frac{1}{\sum_{j \in C_n} \delta_{aj}}$$

$\sum_{j \in C_n} \delta_{aj}$  correspond alors au nombre d'alternatives dans  $C_n$  qui contiennent le lien  $a$ .

La formule décrite ci-dessus sera utilisée par la suite, les écarts de longueur entre les alternatives étant faibles.

L'enjeu du modèle de choix est ensuite d'établir les déterminants de l'utilité. On définit le terme déterministe la fonction d'utilité par :

$$V_{in} = \sum_k \beta_k * x_{ink}$$

Avec :

- $x_{ink}$  les caractéristiques de l'alternative  $i$  de  $C_n$
- $\beta_k$  des coefficients à estimer

La probabilité que l'individu  $n$  choisisse l'alternative  $i$  est alors :

$$P_n(i) = \frac{e^{V_i + \beta_{PS} \ln(PS_i)}}{\sum_{j \in C_n} (e^{V_j + \beta_{PS} \ln(PS_j)})}$$

Dans l'expression de la probabilité, la log-PS prend donc la même place qu'un terme de la partie déterministe de l'utilité. Les résultats de l'estimation contiendront donc  $\beta_{PS}$  en tant que coefficient de l'un des termes de l'utilité.

Dans plusieurs articles (Casello et Usyukov 2014), (Ton et al. 2017), (Chen, Shen, et Childress 2018), (Huber, Lindemann, et Schröter 2023), les chercheurs font le choix d'inclure la proportion de chaque type d'aménagement comme variable. Toutefois Hunt et Abraham choisissent d'exprimer l'utilité en fonction de la distance parcourue sur chaque type d'aménagement. Cette approche a l'avantage de simplifier le calcul de l'utilité d'un déplacement vélo dans un MQE. En

effet, le gain d'utilité lié aux aménagements cyclable peut-être directement calculé au niveau du tronçon et sommé sur les chemins.

## 4.5 Résultats

Le tableau 4.4 donne les résultats de l'estimation de l'utilité. On observe un premier résultat contre-intuitif : l'utilité obtenue pour la distance est positive, ce qui semble signifier que les cyclistes cherchent un itinéraire maximisant la distance parcourue. Une telle aberration peut résulter d'un trop faible nombre d'alternatives, en particulier plus longues mais mieux aménagées pour la pratique du vélo que le chemin parcouru.

Nombre d'observations		6 301			
Log-vraisemblance		-2 517,762			
<i>Intitulé</i>	Coefficient	Erreur standard	z	p	
<i>Distance</i>	3,05	0,15	20	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Dist PC</i>	3,22	0,16	20	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Dist BC</i>	0,13	0,26	0,5	0,616	
<i>Dist chaussidou</i>	3	3	0,9	0,394	
<i>Dist CBV</i>	2,7	0,4	7,6	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Dist MPV</i>	0,6	0,5	1,2	0,242	
<i>Dist autre</i>	1,3	0,5	2,7	0,007	
<i>Dist DSC bande</i>	2,2	1,4	1,6	0,105	
<i>Dist DSC NM</i>	0,5	0,4	1,2	0,24	
<i>Dist VV</i>	0,5	0,4	1,3	0,181	
<i>Dist rampe</i>	42	136	0,3	0,755	
<i>Dist VR</i>	0,4	2,5	0,2	0,878	
<i>Dist interdit</i>	-7,3	0,3	-22	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Dist forte descente</i>	11,9	1,8	6,7	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Dist descente modérée</i>	0,5	0,7	0,8	0,438	
<i>Dist montée modérée</i>	-0,3	0,7	-0,5	0,642	
<i>Dist forte montée</i>	-6,6	1,3	-5,0	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Nb MN TAD</i>	-0,257	0,027	-9,6	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Nb MN TD</i>	0,201	0,008	26	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Nb MN TAG</i>	-0,381	0,028	-13	<10 <sup>-3</sup>	
<i>Log-PS</i>	-1,47	0,15	-9,5	<10 <sup>-3</sup>	

Tableau 3.5 : Résultats de l'estimation des coefficients de l'utilité d'un itinéraire vélo

On observe ensuite que les aménagements les plus favorisés sont les pistes cyclables et les couloirs de bus partagés, alors que les bandes cyclables apportent un bénéfice négligeable en termes d'attractivité du point de vue des usagers. Les tronçons interdits aux vélos sont largement défavorisés. Néanmoins cette catégorie regroupe de nombreux cas différents, allant du contre-sens face au trafic automobile dans un carrefour à sens giratoire au chemin piéton dans un parc. Certains tronçons interdits aux vélos pourraient donc être utilisés bien plus facilement par les cyclistes que d'autres.

Le résultat sur les fortes descentes ainsi que les fortes montées ( $\geq 5\%$ ) suit la tendance attendue : les cyclistes fuient les fortes montées et, au contraire, recherchent les fortes descentes. Concernant les montées modérées (de 2 à 5%), si un dénivelé se présente sur le parcours, l'alternative à une montée modérée serait une montée inférieure à 2% mais plus longue, puisque le même dénivelé doit être gravi. L'utilisateur n'est gagnant à éviter les montées modérées sur son itinéraire que si elles sont « inutiles », c'est-à-dire, suivies d'une descente plus tard sur l'itinéraire.

Comme attendu également, les mouvements de tourne-à-droite sont moins redoutés aux mouvements de tourne-à-gauche. L'utilité des mouvements tout-droits est donnée positive. Ce résultat est surprenant, puisque l'on s'attend à ce que les cyclistes cherchent à minimiser le nombre d'intersections traversées, même en allant tout-droit, pendant leur trajet. Le résultat donné pourrait provenir de la corrélation entre le nombre d'intersections traversées et d'autres caractéristiques de l'itinéraire comme la vitesse du trafic automobile.

## 5. Mise en perspective

### 5.1 Expression de l'utilité des itinéraires

De nombreux aspects non-étudiés peuvent entrer en compte dans les déterminants du choix modal vélo. Bien qu'il ait été partiellement pris en compte à travers les pentes, l'effort physique peut être pris en compte plus globalement, notamment pour faire ressortir l'impact que pourraient avoir les arrêts et redémarrages sur l'attractivité d'un itinéraire. L'effort peut d'ailleurs être à la fois vu sous l'angle de la puissance instantanée et de l'énergie dépensée pendant l'ensemble du trajet. Cette prise en compte plus globale de l'effort physique peut permettre de mieux anticiper l'impact que pourrait avoir le développement de la place des VAE dans les déplacements à vélo, notamment dans l'allongement des distances moyenne parcourues par déplacement.

L'avantage principal des aménagements cyclables est de protéger les cyclistes du trafic automobile, pour réduire le risque d'accident, mais aussi l'anxiété liée à l'interaction avec le trafic automobile qui limite son utilisation. Toutefois, cette anxiété peut être très variable en fonction de la situation, même sans aménagement cyclable. Une rue étroite, peu passante et limitée à 30 km/h peut être quasiment aussi rassurante qu'une piste cyclable. Les résultats d'une étude menée à Amsterdam (Ton et al. 2017) ne montrent d'ailleurs aucun lien significatif entre la proportion d'aménagements cyclables sur un itinéraire et son utilité, ce que les chercheurs expliquent par le fait que dans cette ville, quasiment tous les axes non-équipés d'aménagements cyclables sont peu passants et limités à 30 km/h, ce qui fait peu de différence pour un cycliste avec une voie équipée d'un aménagement cyclable.

Bien que les groupes de population dans les MQE ne permettent pas de faire apparaître certaines de ces variables, l'influence que peut avoir une caractéristique d'un chemin sur son utilité peut dépendre de la personne qui l'évalue. Par exemple, un cycliste peu sportif donnera plus d'importance au fait d'éviter les fortes montées qu'un cycliste plus sportif et un cycliste débutant évitera plus les zones à risques qu'un cycliste confirmé. Il est d'autant plus intéressant d'observer les cyclistes débutants que la démarche de cette étude vise à affiner l'utilité du choix modal. Or cette utilité est évaluée par l'ensemble de la population et pas uniquement les cyclistes. Nous avons mené notre étude sur des choix d'itinéraires, donc tous faits par des cyclistes. On peut alors supposer que les plus débutants parmi eux ont une évaluation des itinéraires plus proche de celle que ferait un individu moyen de la population.

Enfin, des aspects culturels, sociaux ou des effets d'habitude peuvent également jouer un rôle dans le choix modal. Il est difficile de modéliser ces causes. Celles-ci sont donc considérées comme stables et représentées notamment à travers la constante ou les différentes valeurs des coefficients entre les groupes au sein de la population. En l'absence de données récentes, il n'est pas possible de recalculer intégralement un MQE qui doit pourtant faire des prédictions pour plusieurs décennies après la récolte des données sur lesquelles il est calé. Cependant, le contexte culturel et social évolue. La marge d'erreur des modèles augmente donc d'autant plus que l'on se situe loin de la date de récolte des données de calage.

## 5.2 Articulation modèle de vitesse - modèle d'utilité

L'un des objectifs initiaux de cette étude a été d'être en mesure de distinguer le gain d'utilité lié à une économie de temps du gain d'utilité lié au confort et à la sécurité lors de la mise en service d'un aménagement cyclable. Les modèles de vitesse et d'utilité des aménagements doivent donc être opérés simultanément. Or, aucun modèle de vitesse n'a été estimé à partir des données girondines précédemment à la spécification du modèle d'utilité. Celui-ci emploie donc la distance parcourue par type d'aménagement. Par conséquent, le gain d'utilité par unité de distance en présence d'un aménagement en comparaison avec son absence inclut également le temps gagné. Les deux ne sont donc pas distingués. Il en est de même dans l'étude des mouvements aux nœuds (MN) : les résultats obtenus ne permettent pas de dire si les mouvements de TAG sont plus évités que les mouvements de TAD au-delà de la perte de temps qu'ils engendrent.

Pour correctement distinguer ces deux notions, la fonction d'utilité devrait donc évacuer le gain de temps, par exemple en comparant entre les alternatives le temps passé sur chaque aménagement au lieu de la distance et en soustrayant du coefficient obtenu pour chaque type de MN l'utilité du temps perdu sur ce type de MN.

## 5.3 Application de l'étude aux MQE

L'une des premières limites à la précision des résultats d'une telle étude lorsqu'ils sont appliqués à un MQE est la non-exhaustivité du réseau (section [2.1.1](#)). Celle-ci peut non seulement fausser les distances, mais aussi les aménagements disponibles pour les cyclistes. Les voies les plus souvent omises dans la représentation d'un réseau routier dans un MQE sont les voies de desserte locale. Le trafic automobile étant en principe plus important, cette qualification se fait surtout sur la base du trafic automobile. Or, les cyclistes pourraient emprunter pour du transit des voies considérées comme étant de desserte locale pour les automobilistes, en particulier si ce sont des voies peu passantes et où le trafic automobile est lent. L'absence de ces voies pourrait impacter sensiblement l'utilité des déplacements à vélo.

Par ailleurs, en observant les traces GPS lors de la seconde étude, il n'est pas rare d'observer des tracés qui ne correspondent à aucun tronçon, même sur le réseau OSM supposé exhaustif. Les cyclistes peuvent par exemple traverser des places, des parcs, traverser des parkings sans suivre le tracé des allées ou encore circuler sur la chaussée sur une partie de tronçon puis monter sur le trottoir ou rejoindre un aménagement cyclable en un lieu où aucun tronçon ne le permet théoriquement. La flexibilité accrue des cyclistes, qui peut se rapprocher de celle des piétons, offre au vélo un avantage qu'il n'est pas possible de modéliser sans démultiplier les coûts de conception, de calage et d'exécution des modèles.

La représentation par zones limite également la précision de la modélisation des déplacements à vélo. En effet, il est difficile d'attribuer des caractéristiques comme l'aménagement cyclable sur des connecteurs ou de connaître les caractéristiques de l'itinéraire suivi pour un déplacement intra-zonal (section [2.1.1](#)).

## 5.4 Elargissement

Ce travail porte sur l'évaluation de l'utilité d'un choix de mode du point de vue de l'utilisateur en vue de prévoir les volumes de déplacements par mode. Les externalités des déplacements, particulièrement en voiture particulière (congestion, entretien des infrastructures, bruit, pollution atmosphérique ou changement climatique) ne sont pas supportés par l'utilisateur. Dans ce contexte, les éléments soulevés tout au long de ce travail concernant l'utilité pour l'utilisateur ont pour objectif d'éclairer les politiques cyclables afin de faire se rapprocher les intérêts individuels de l'intérêt collectif dans les comportements de mobilité.

## 6. Conclusion

Alors que la place du vélo en tant que mode de transport est de plus en plus importante et que les pouvoirs publics cherchent à encourager et accompagner plus efficacement le développement de ce mode de transport, des prévisions de trafic plus fiables sont nécessaires. Dans ce contexte, et alors qu'il est de plus en plus facile de récolter des données GPS, l'exploitation de ces données peut permettre de mettre en lumière les déterminants de la vitesse des cyclistes. Les traces GPS constituent des données de préférences révélées permettant également d'observer directement les choix d'itinéraires effectués au regard des aménagements rencontrés et ainsi d'en induire la préférence des cyclistes pour certains aménagements.

Des modèles plus affinés pourraient permettre de distinguer plus clairement l'utilité du temps de celle du confort ou de la sécurité liés à l'aménagement.

Toutefois ces données ne se substituent pas aux enquêtes mobilité qui permettent d'étudier les choix modaux d'un échantillon représentatif de la population, sans l'introduction de biais de sélection.

## 7. Références

- « A\* Search Algorithm ». *Ada Computer Science*.  
[https://adacomputerscience.org/concepts/path\\_a\\_star](https://adacomputerscience.org/concepts/path_a_star) (31 août 2024).
- Balaguier, Olivier, Clément Dusong, Jean-Baptiste Gernet, et Maxime Pier. 2022. *Les vitesses du vélo : Pour une prise en compte de la diversité des pratiques cyclistes*. Académie des mobilités actives. <https://www.mobilites-actives.fr/etudes-techniques/3> (25 août 2024).
- Ben-Akiva, Moshe, et Michel Bierlaire. 1999. « Discrete Choice Methods and Their Applications to Short Term Travel Decisions ». In *Handbook of Transportation Science*, éd. Randolph W. Hall. Boston, MA: Springer US, 5-33. doi:10.1007/978-1-4615-5203-1\_2.
- Bernardi, Silvia, et Federico Rupi. 2015. « An Analysis of Bicycle Travel Speed and Disturbances on Off-street and On-street Facilities ». *Transportation Research Procedia* 5: 82-94. doi:10.1016/j.trpro.2015.01.004.
- Bonnel, Patrick. 2004a. « Chapitre 4 - Production de données ». In *Prévoir la Demande de Transport*,  
[https://www.researchgate.net/publication/5086964\\_Prevoir\\_la\\_Demande\\_de\\_Transport](https://www.researchgate.net/publication/5086964_Prevoir_la_Demande_de_Transport)  
(19 août 2024).
- Bonnel, Patrick. 2004b. « Chapitre 8 - Répartition modale - approche agrégée ». In *Prévoir la Demande de Transport*,  
[https://www.researchgate.net/publication/5086964\\_Prevoir\\_la\\_Demande\\_de\\_Transport](https://www.researchgate.net/publication/5086964_Prevoir_la_Demande_de_Transport)  
(19 août 2024).
- Bonnel, Patrick. 2004c. « Chapitre 10 - Affectation, zonage et codification des réseaux ». In *Prévoir la Demande de Transport*,  
[https://www.researchgate.net/publication/5086964\\_Prevoir\\_la\\_Demande\\_de\\_Transport](https://www.researchgate.net/publication/5086964_Prevoir_la_Demande_de_Transport)  
(19 août 2024).
- Borré, Carolina. 2024. « +37 % de passages de vélos entre 2019 et 2023, un palier d'après-COVID semble atteint ». *Vélo & Territoires*. <https://www.velo-territoires.org/actualite/2024/05/21/37-de-passages-de-velos-entre-2019-et-2023-un-palier-dapres-covid-semble-atteint/> (14 août 2024).
- Bouleau, Mireille, Valérie Diaz, Elodie Maury, et Sylvain Tastet. 2023. *Enquête mobilité Gironde 2021, principaux résultats*. Agence d'urbanisme Bordeaux Aquitaine.  
[https://www.cerema.fr/system/files/inline-files/2023\\_aurb\\_principaux\\_resultats\\_emc2\\_2021.pdf](https://www.cerema.fr/system/files/inline-files/2023_aurb_principaux_resultats_emc2_2021.pdf) (13 août 2024).
- Braun, Lindsay M., Daniel A. Rodriguez, Tom Cole-Hunter, Albert Ambros, David Donaire-Gonzalez, Michael Jerrett, Michelle A. Mendez, Mark J. Nieuwenhuijsen, et Audrey de Nazelle. 2016. « Short-term planning and policy interventions to promote cycling in urban centers: Findings from a commute mode choice analysis in Barcelona, Spain ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 89: 164-83. doi:10.1016/j.tra.2016.05.007.
- Cappelli, Giuseppe, Mauro D'Apuzzo, Sofia Nardoiani, et Vittorio Nicolosi. 2024. « Exploring the Influences of Safety and Energy Expenditure Parameters on Cycling ». *Sustainability* 16(7): 2739. doi:10.3390/su16072739.

- Casello, Jeffrey M., et Vladimir Usyukov. 2014. « Modeling Cyclists' Route Choice Based on GPS Data ». *Transportation Research Record* 2430(1): 155-61. doi:10.3141/2430-16.
- Chen, Peng, Qing Shen, et Suzanne Childress. 2018. « A GPS data-based analysis of built environment influences on bicyclist route preferences ». *International Journal of Sustainable Transportation* 12(3): 218-31. doi:10.1080/15568318.2017.1349222.
- Clarry, Andrew, Ahmadreza Faghieh Imani, et Eric J. Miller. 2019. « Where we ride faster? Examining cycling speed using smartphone GPS data ». *Sustainable Cities and Society* 49: 101594. doi:10.1016/j.scs.2019.101594.
- Dane, Gamze, Tao Feng, Floor Luub, et Theo Arentze. 2020. « Route Choice Decisions of E-Bike Users: Analysis of GPS Tracking Data in the Netherlands ». In *Geospatial Technologies for Local and Regional Development*, éd. Phaedon Kyriakidis, Diofantos Hadjimitsis, Dimitrios Skarlatos, et Ali Mansourian. Cham: Springer International Publishing, 109-24. doi:10.1007/978-3-030-14745-7\_7.
- Descarrega, Boris, et Agnès Crozet. 2023. *La France à vélo*. [https://lobsoco.com/wp-content/uploads/2023/04/LObSoCo\\_La-France-a-Velo\\_Principaux-enseignements.pdf](https://lobsoco.com/wp-content/uploads/2023/04/LObSoCo_La-France-a-Velo_Principaux-enseignements.pdf) (23 juillet 2024).
- « Distribution/Choix modal VISEM combinés ». [https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM\\_2021\\_FRA/Content/1\\_Nachfragemodell/1\\_3\\_Kombinierte\\_VISEM-Verkehrsverteilung\\_Moduswahl.htm](https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM_2021_FRA/Content/1_Nachfragemodell/1_3_Kombinierte_VISEM-Verkehrsverteilung_Moduswahl.htm) (18 juillet 2024).
- Enquête déplacements 2015 de l'aire métropolitaine lyonnaise Résultats sur le Scot de l'agglomération lyonnaise*. 2016. Sytral. [https://www.sytral.fr/include/viewFile.php?idtf=5872&path=e2%2F5872\\_964\\_M-EMD-Aggl-loyonnaise-16-12-2016-WEB.pdf](https://www.sytral.fr/include/viewFile.php?idtf=5872&path=e2%2F5872_964_M-EMD-Aggl-loyonnaise-16-12-2016-WEB.pdf) (7 août 2024).
- « Enquête sur les pratiques environnementales des ménages (EPEM 2016) | Données et études statistiques ». 2016. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-les-pratiques-environnementales-des-menages-epem-2016> (23 juillet 2024).
- Florian, Michael, Marc Gaudry, et Christian Lardinois. 1988. « A two-dimensional framework for the understanding of transportation planning models ». *Transportation Research Part B: Methodological* 22(6): 411-19. doi:10.1016/0191-2615(88)90022-7.
- Flügel, Stefan, Nina Hulleberg, Aslak Fyhri, Christian Weber, et Gretar Ævarsson. 2017. « Empirical Speed Models for Cycling in the Oslo Road Network ». *Transportation* 46(4): 1395-1419. doi:10.1007/s11116-017-9841-8.
- « Génération des déplacements VISEM ». [https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM\\_2021\\_FRA/Content/1\\_Nachfragemodell/1\\_3\\_VISEM-Verkehrserzeugung.htm](https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM_2021_FRA/Content/1_Nachfragemodell/1_3_VISEM-Verkehrserzeugung.htm) (19 juillet 2024).
- Gumbel, E. J. 1958. *Statistics of Extremes*. New York Chichester, West Sussex: Columbia University Press. doi:doi:10.7312/gumb92958.
- Huber, Stefan, Paul Lindemann, et Bettina Schröter. 2023. « Understanding the influence of accident risk and perceived safety on bicycle route choice ». *Transportation Research Procedia* 72: 367-74. doi:10.1016/j.trpro.2023.11.416.
- Hunt, John, et John Abraham. 2007. « Influences on bicycle use ». *Transportation* 34: 453-70. doi:10.1007/s11116-006-9109-1.

- « Indicateurs vélo Métropole de Lyon ». *Comment ça roule ?*  
<https://commentcaroule.fr/villes/M%C3%A9tropole%20de%20Lyon> (26 août 2024).
- Jensen, Pablo, Jean-Baptiste Rouquier, Nicolas Ovtracht, et Céline Robardet. 2010.  
 « Characterizing the speed and paths of shared bicycle use in Lyon ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15(8): 522-24. doi:10.1016/j.trd.2010.07.002.
- « Les Enquêtes Mobilité Certifiées Cerema : la méthodologie | Cerema ». 2023. *cerema.fr*.  
<http://www.cerema.fr/fr/actualites/enquetes-mobilite-certifiees-cerema-methodologie> (18 juillet 2024).
- Manheim, Marvin L. 1979. Volume 1: basic concepts *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*. MIT Press. <https://trid.trb.org/View/1180992> (19 juillet 2024).
- Márquez, Luis, et Jose J. Soto. 2021. « Integrating perceptions of safety and bicycle theft risk in the analysis of cycling infrastructure preferences ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 150: 285-301. doi:10.1016/j.tra.2021.06.017.
- McNally, Michael G. 2007. « The Four-Step Model ». In *Handbook of Transport Modelling*, éd. David A. Hensher et Kenneth J. Button. Emerald Group Publishing Limited, 35-53. doi:10.1108/9780857245670-003.
- « Mobilités professionnelles des individus : déplacements commune de résidence / commune de travail en 2020 ». 2022. *insee.fr*.  
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/7637844?sommaire=7637890> (23 août 2024).
- « Mobilités scolaires des individus : déplacements commune de résidence / commune de scolarisation en 2020 ». 2022. *insee.fr*.  
<https://www.insee.fr/fr/statistiques/7637665?sommaire=7637890> (23 août 2024).
- « Modèle de données VISEM ». [https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM\\_2021\\_FRA/Content/1\\_Nachfragemodell/1\\_3\\_VISEM-Datenmodell.htm](https://cgi.ptvgroup.com/vision-help/VISUM_2021_FRA/Content/1_Nachfragemodell/1_3_VISEM-Datenmodell.htm) (19 juillet 2024).
- notre-environnement. 2024. « Les Français et le vélo en 2022 ». *notre-environnement*.  
<https://www.notre-environnement.gouv.fr/> (23 juillet 2024).
- « OpenStreetMap France ». *OpenStreetMap France*. <https://www.openstreetmap.fr/> (27 août 2024).
- Parkin, John, et Jonathon Rotheram. 2010. « Design speeds and acceleration characteristics of bicycle traffic for use in planning, design and appraisal ». *Transport Policy* 17(5): 335-41. doi:10.1016/j.tranpol.2010.03.001.
- « RGE ALTI® | Géoservices ». <https://geoservices.ign.fr/rgealti> (1 juillet 2024).
- « Schéma de données des aménagements cyclables ». *schema.data.gouv.fr*.  
<https://schema.data.gouv.fr/etalab/schema-amenagements-cyclables/0.3.4/> (30 août 2024).
- Schleinitz, K., T. Petzoldt, L. Franke-Bartholdt, J. Krems, et T. Gehlert. 2017. « The German Naturalistic Cycling Study – Comparing cycling speed of riders of different e-bikes and conventional bicycles ». *Safety Science* 92: 290-97. doi:10.1016/j.ssci.2015.07.027.

- Strauss, Jillian, et Luis F. Miranda-Moreno. 2017. « Speed, travel time and delay for intersections and road segments in the Montreal network using cyclist Smartphone GPS data ». *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 57: 155-71. doi:10.1016/j.trd.2017.09.001.
- Ton, Danique, Oded Cats, Dorine Duives, et Serge Hoogendoorn. 2017. « How Do People Cycle in Amsterdam, Netherlands?: Estimating Cyclists' Route Choice Determinants with GPS Data from an Urban Area ». *Transportation Research Record* 2662(1): 75-82. doi:10.3141/2662-09.
- Wardrop, J G. 1952. « Road paper. some theoretical aspects of road traffic research. » *Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 1(3): 325-62. doi:10.1680/ipeds.1952.11259.
- « Way — OpenStreetMap Wiki ». 2024. <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Way> (30 août 2024).
- « Zoom sur les produits altimétriques MNT et MNS | Géoservices ». 2020. <https://geoservices.ign.fr/actualites/2020-12-10-MNT-MNS> (1 juillet 2024).

# Annexes

Annexe 1: Vitesse vélo en fonction de l'aménagement dans les versions courantes du MMM (premier tableau) et de MODEL Y (second tableau)

Catégorie d'aménagement	Vitesse (km/h)
<b>Sans aménagement, pas aux normes, double-sens cyclable</b>	15
<b>Piste à contresens, chaussée dégradée, tronçon peu attractif</b>	13
<b>Aire piétonne, passage piéton, zone de rencontre, route départementale sans aménagement</b>	10,5
<b>Bande cyclable, couloir de bus</b>	17,5
<b>Zone 30, double-sens cyclable en zone 30, piste cyclable, allée de parc</b>	20
<b>Pistes séparées de la voirie, voie verte</b>	22

Catégorie d'aménagement	Bonus (km/h)	Vitesse totale sc. 2018 (km/h)	Vitesse totale sc. 2030/2040 (km/h)
<b>Aucun</b>	0	14	16
<b>Mixité</b>	1	15	17
<b>Double-sens cyclable</b>	2	16	18
<b>Couloir bus non-élargi</b>	4	18	20
<b>Bande cyclable</b>	5	19	21
<b>Couloir bus élargi</b>	6	20	22
<b>Piste cyclable</b>	6	20	22
<b>Voie verte</b>	10	24	26
<b>Voies lyonnaises</b>	11	25 (absentes des sc. 2018)	27

*sc. : scénarios*

Annexe 2 : Répartition des tronçons par catégorie d'aménagement cyclable et de voie

- Avant suppression des tronçons à double-sens présentant une pente supérieure à 1% en valeur absolue et des tronçons non-revêtus (premier tableau)
- Dans la base filtrée, sur laquelle a été calé le modèle de vitesse (second tableau)

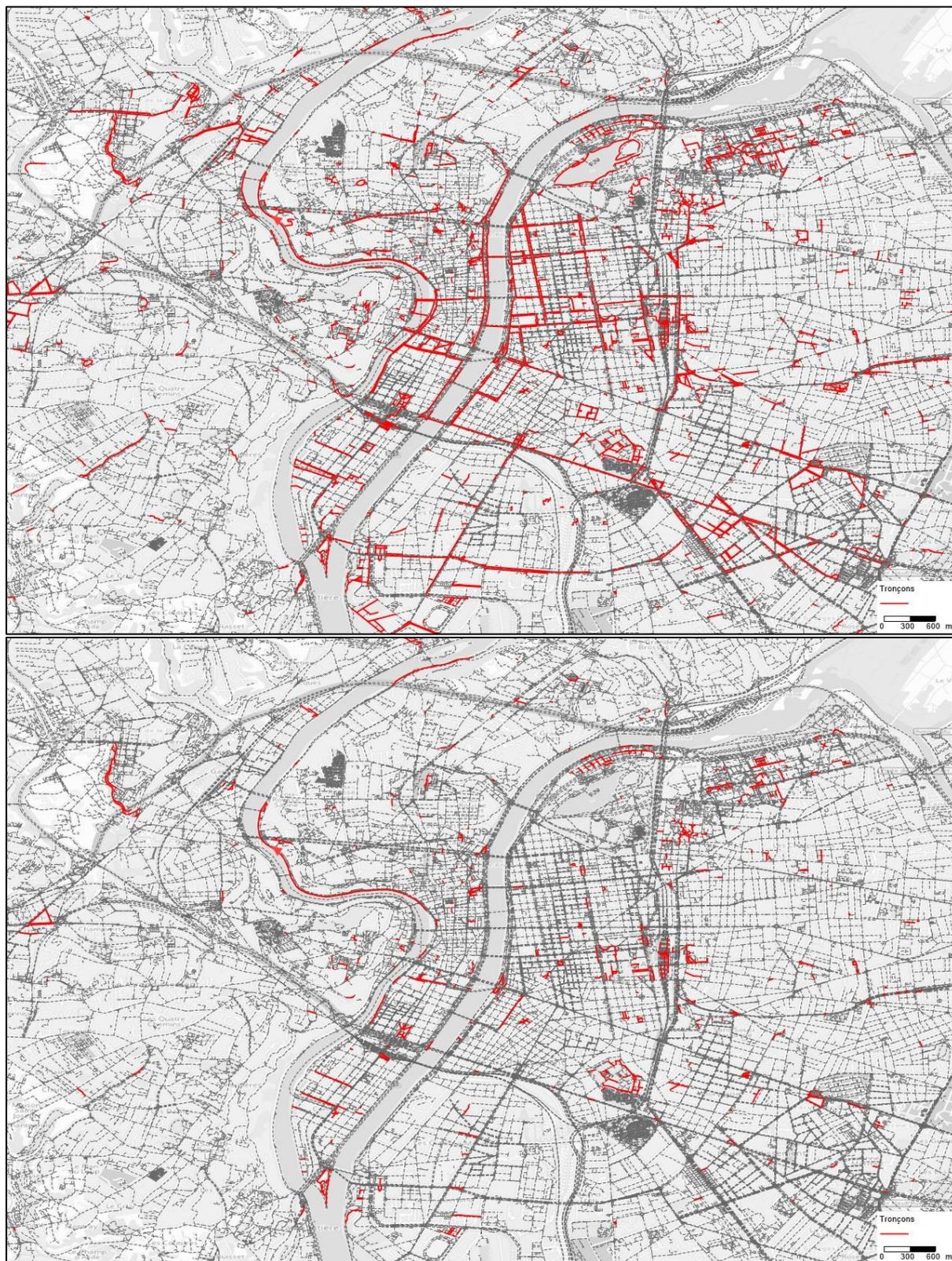
	<i>none</i>	<i>lane</i>	<i>sharebusway</i>	<i>mixedfacilities</i>	<i>cycleway</i>	<i>greenway</i>	<i>other</i>	<b>Total</b>
<i>primary</i>	33	1	31					<b>65</b>
<i>secondary</i>	3219	1041	385		49		114	<b>4808</b>
<i>tertiary_residential</i>	16822	2058	127	6	73		589	<b>19675</b>
<i>service</i>	2453		24		2	2	86	<b>2567</b>
<i>living_street</i>	406	6					16	<b>428</b>
<i>pedestrian</i>	947				6			<b>953</b>
<i>cycleway</i>		8			2224	42		<b>2274</b>
<i>footway_path</i>	5856			129	72	935	1116	<b>8108</b>
<i>track</i>	528						8	<b>536</b>
<i>link</i>	64	5					2	<b>71</b>
<b>Total général</b>	<b>30328</b>	<b>3119</b>	<b>567</b>	<b>135</b>	<b>2426</b>	<b>979</b>	<b>1931</b>	<b>39485</b>

*Base partiellement filtrée*

	<i>none</i>	<i>lane</i>	<i>sharebusway</i>	<i>mixedfacilities</i>	<i>cycleway</i>	<i>greenway</i>	<i>other</i>	<b>Total</b>
<i>primary</i>	33	1	31					<b>65</b>
<i>secondary</i>	1881	803	371		49			<b>3104</b>
<i>tertiary_residential</i>	10010	1606	125		53			<b>11794</b>
<i>service</i>			<b>16</b>					<b>16</b>
<i>living_street</i>	206	4					<b>12</b>	<b>222</b>
<i>pedestrian</i>	663				6			<b>669</b>
<i>cycleway</i>		6			1536	32		<b>1574</b>
<i>footway_path</i>	1456			73	56	553	<b>642</b>	<b>2780</b>
<i>track</i>	152						<b>6</b>	<b>158</b>
<b>Total</b>	<b>14401</b>	<b>2420</b>	<b>543</b>	<b>73</b>	<b>1700</b>	<b>585</b>	<b>660</b>	<b>20382</b>

*Base filtrée*

Annexe 3 : Extrait du réseau de Lyon et Villeurbanne avec, en rouge, les tronçons de catégorie footway, sans aménagement (none). Dans la seconde image, les tronçons avec ces caractéristiques et un revêtement en asphalté ont été retirés. On peut vérifier que la grande majorité des tronçons restants ne sont pas des trottoirs.



Annexe 4: Carte des vitesses pratiquées sur les tronçons (Métropole de Lyon, base de tronçons sans filtre sur les catégories de voie et d'aménagement cyclable).

