



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Modélisation macroscopique de la circulation cycliste et piétonne - bases

**Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs-
grundlagen**

**Macroscopic modelling of bicycle and pedestrian travel -
foundations**

Citec Ingénieurs Conseils, Genève
Philippe Gasser
Cunxiao Zhang
Christine Mortreux
My Hang Nguyen
Jorge Cabrera Delgado

Professeur Michel Bierlaire, Orbe

Micoda Sàarl, Nyon
Michael Flamm

**Projet de recherche SVI 2014/001 sur demande de l'Association suisse
des ingénieurs et experts en transports (SVI)**

Septembre 2017

1614

Der Inhalt dieses Berichtes verpflichtet nur den (die) vom Bundesamt für Strassen unterstützten Autor(en). Dies gilt nicht für das Formular 3 "Projektabschluss", welches die Meinung der Begleitkommission darstellt und deshalb nur diese verpflichtet.

Bezug: Schweizerischer Verband der Strassen- und Verkehrsfachleute (VSS)

Le contenu de ce rapport n'engage que les auteurs ayant obtenu l'appui de l'Office fédéral des routes. Cela ne s'applique pas au formulaire 3 « Clôture du projet », qui représente l'avis de la commission de suivi et qui n'engage que cette dernière.

Diffusion : Association suisse des professionnels de la route et des transports (VSS)

La responsabilità per il contenuto di questo rapporto spetta unicamente agli autori sostenuti dall'Ufficio federale delle strade. Tale indicazione non si applica al modulo 3 "conclusione del progetto", che esprime l'opinione della commissione d'accompagnamento e di cui risponde solo quest'ultima.

Ordinazione: Associazione svizzera dei professionisti della strada e dei trasporti (VSS)

The content of this report engages only the author(s) supported by the Federal Roads Office. This does not apply to Form 3 'Project Conclusion' which presents the view of the monitoring committee.

Distribution: Swiss Association of Road and Transportation Experts (VSS)



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication DETEC
Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni DATEC

Bundesamt für Strassen
Office fédéral des routes
Ufficio federale delle Strade

Modélisation macroscopique de la circulation cycliste et piétonne - bases

**Makroskopische Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs-
Grundlagen**

**Macroscopic modelling of bicycle and pedestrian -
Foundations**

Citec Ingénieurs Conseils, Genève
Philippe Gasser
Cunxiao Zhang
Christine Mortreux
My Hang Nguyen
Jorge Cabrera Delgado

Professeur Michel Bierlaire, Orbe

Micoda Sàarl, Nyon
Michael Flamm

**Projet de recherche SVI 2014/001 sur demande de l'Association suisse
des ingénieurs et experts en transports (SVI)**

Impressum

Instance de recherche et équipe de projet

Direction du projet

Philippe Gasser

Membres

Dr. Jorge Cabrera Delgado

Prof. Michel Bierlaire

Dr. Michael Flamm

Christine Mortreux

My Hang Nguyen

Dr. Cunxiao Zhang

Commission de suivi

Président

Wolfgang Scherr, SBB Personenverkehr

Membres

Damien Cataldi, Etat de Genève, Direction Générale des Transports (DGT)

Urs Eichenberger, Metron Verkehrsplanung AG, Brugg

Roland Frei, Tiefbauamt Stadt Zürich

Carsten Hagedorn, HSR

Andreas Justen, ARE

Heidi Meyer, OFROU

Christian Ordon, Amt für Verkehr Kanton Zürich

Michael Redle, Amt für Mobilität Kanton Basel Stadt

Guido Rindsfuser, Emch + Berger AG Bern

Auteur de la demande

Association suisse des ingénieurs et experts en transports - SVI

Source

Le présent document est téléchargeable gratuitement sur <http://www.mobilityplatform.ch>.

Table des matières

Impressum	4
Résumé	9
Zusammenfassung	15
Summary	21
1 Introduction	25
1.1 Pourquoi un modèle macroscopique pour les piétons et les cyclistes ?	25
1.1.1 Une politique de mobilité qui accorde toujours plus d'importance aux mobilités douces ..	25
1.1.2 Des besoins d'outils de prévision nécessaires pour de nombreux arbitrages concrets ...	26
1.1.3 Un modèle macroscopique pour les piétons et les cyclistes	26
1.2 Objectifs de la recherche	27
1.3 Champ d'application de la recherche.....	27
1.4 Test illustratif à l'aide du modèle multimodal de Genève	28
1.5 Organisation du rapport	28
1.6 <i>A parte</i> : quelle prise en compte des vélos à assistance électrique ?	29
2 Revue de littérature	31
2.1 Facteurs influençant l'usage du vélo comme mode de déplacement.....	31
2.1.1 Environnement bâti, forme urbaine et distances.....	31
2.1.2 Caractéristiques de l'individu et du ménage	32
2.1.3 Caractéristiques du déplacement	33
2.1.4 Facteurs psychologiques	33
2.1.5 Caractéristiques des infrastructures	34
2.1.6 Environnement naturel	36
2.2 Déterminants du choix du chemin pour le vélo	36
2.2.1 Préférences déclarées	36
2.2.2 Préférence révélées : données GPS	37
2.2.3 Perspective d'une étude qualitative menée en Suisse	38
2.2.4 Synthèse des principales variables retenues dans la littérature	39
2.3 Conclusion partielle et recherches ultérieures à approfondir.....	40
2.4 Facteurs influençant la marche	40
2.5 Enseignements à tirer des modèles existants	40
2.6 Conclusions	41
3 Les données de base pour l'affectation	43
3.1 Le microrecensement mobilité et transports (MRMT).....	43
3.1.1 Présentation générale	43
3.1.2 Échantillon	43
3.1.3 Contenu.....	45
3.1.4 Unités de mesure de la mobilité.....	45
3.1.5 Spécificités modes doux	46
3.2 Données pour le réseau.....	46
3.2.1 Géométrie du réseau	46
3.2.2 Aménagements piétons ou cyclables	46
3.2.3 Calcul des pentes : Modèles numériques de terrain, de surface	47
3.3 Données pour la validation de l'affectation	47
3.3.1 Comptages	47
3.3.2 Temps de parcours	48
3.4 Comptages spécifiques sur la ville de Genève	49
3.4.1 Comment compter les modes doux ? Éléments de contexte	49
3.4.2 Organisation	51
3.4.3 Échelle de l'opération :.....	52
3.4.4 Extrapolation des comptages à la journée.....	52
3.5 Enseignements de la collecte de données pour le test genevois	53

3.5.1	Comment et où identifier des sections de comptage représentatives ?	53
3.5.2	Disposer de courbes journalières en fonction du site et du public	53
3.5.3	Identifier quelle est la plage de validité de comptages manuels courts	54
3.5.4	Catégoriser les personnes comptées	54
3.5.5	Identifier l'impact des saisons et de la météo	55
3.6	Perspectives liées aux progrès technologiques	55
3.6.1	Collecte de traces de parcours cyclistes	55
3.6.2	Autres technologies de comptage automatisé	56
3.6.3	Suivi de piétons et cyclistes par WIFI ou Bluetooth	57
4	« Granulométrie » du modèle, spécificités de la modélisation piéton-vélo	59
4.1	Problématique	59
4.2	Centroïdes de Zones : lieux d'origine et de destination des déplacements	61
4.3	Géométrie du réseau	64
4.4	Lien entre zonage et réseau : positionnement des connecteurs de centroïde	66
4.5	Interaction des modes et modélisation multimodale	66
5	Taille des zones	69
5.1	Problématique vélo	69
5.1.1	Taille des zones d'analyse : question des déplacements intrazones	69
5.1.2	Taille des zones d'analyse : question des distances de déplacement	70
5.2	Problématique d'un modèle piéton	72
5.2.1	Importance de l'intermodalité et des étapes à pied	73
5.2.2	Longueur des étapes et taille recommandée des zones	74
5.3	Conclusions partielles	77
6	Positionnement des connecteurs	79
6.1	Connections des zones au réseau	79
6.2	Gestion des piétons en lien avec les transports en commun	80
6.2.1	Les trajets terminaux	80
6.2.2	La gestion des correspondances dans les pôles d'échange	82
7	Codification du réseau	85
7.1	Cas des cyclistes	85
7.1.1	Distance et dessin ou géométrie du réseau	85
7.1.2	Dénivelé et autres attributs relatifs à l'effort	85
7.1.3	Perception positive de la sécurité : Présence d'aménagements cyclables	88
7.1.4	Perception négative de la sécurité : risque d'accident avec les modes motorisés	89
7.1.5	Autres éléments de perception : Agrément ou esthétique	90
7.1.1	Codifier le réseau selon la loi ou l'usage ?	93
7.2	Cas des piétons	94
7.2.1	Importance du maillage du réseau	94
7.2.2	Nécessité d'affiner le réseau piéton	97
7.3	Modélisation des carrefours	99
8	Matrice empirique de déplacements	101
8.1	Quelle représentativité de la matrice de référence ?	101
8.2	Données auxiliaires : quelles méthodes ?	103
8.2.1	Utilisation de données socioéconomiques ou géographiques	103
8.2.2	Utilisation de données de comptages	103
8.3	Expériences dans le cas genevois	103
8.3.1	Matrice vélo	103
8.3.2	Matrice piéton	105
8.3.3	Enseignements des tests sur Genève :	106
9	Affectation	107
9.1	Qu'est-ce que caler un modèle d'affectation ?	107

9.2	Quel algorithme d'affectation pour les modes doux ?.....	108
9.3	Génération des chemins alternatifs et stabilité des comportements	109
9.4	Différentes méthodes de calage de l'affectation selon les données disponibles.....	110
9.4.1	Disponibilité uniquement de données de comptage : calage agrégé	110
9.4.2	Données GPS et estimation de modèles de choix.....	111
9.4.3	Calage des paramètres d'affectation à l'aide d'une méthode heuristique d'optimisation	111
9.5	Structure générale du modèle et paramètres à intégrer dans le calage.....	112
9.5.1	Un modèle de choix de type logit.....	113
9.5.2	Correction de la corrélation du terme aléatoire.....	113
9.5.3	Définition de l'ensemble des chemins possibles.....	114
9.5.4	Représentation schématique de la procédure d'affectation retenue	116
9.6	Définition de l'utilité observable et codification des attributs.....	117
9.7	Synthèse	118
10	Test d'affectation vélo : le cas de Genève.....	119
10.1	Organisation des tests	119
10.1.1	Exploration de l'impact des effets de bord	119
10.1.2	Définition des variables constituant les fonctions d'utilité testées (partie déterministe) .	119
10.1.3	Protocole pour les tests.....	121
10.1.4	Spécifications testées	122
10.2	Résultats de la première série de tests : périmètre complet du MMT	125
10.3	Deuxième série de tests : définition d'un cordon	128
10.4	Une spécification contrainte pour limiter l' <i>overfitting</i>	134
10.5	Bilan	137
10.6	Pistes pour améliorer l'ajustement du modèle d'affectation	140
11	Répartition modale.....	141
11.1	Les facteurs classiques.....	141
11.1.1	Caractéristiques socioéconomiques	141
11.1.2	Caractéristiques du déplacement et des alternatives	141
11.2	Les facteurs d'environnement	142
11.2.1	Environnement naturel	142
11.2.2	Environnement bâti	143
11.3	Les facteurs psychologiques.....	144
11.4	Bilan pour une application pratique.....	144
12	Procédure recommandée pour constituer un modèle macroscopique piéton-vélo	145
12.1	Constitution d'un zonage.....	145
12.2	Constitution de l'offre	146
12.3	Constitution de matrices de demande de préchargement	147
12.4	Calage de l'affectation.....	147
12.5	Calage du choix modal.....	148
13	Conclusions finales et recommandations de recherches ultérieures.....	149
13.1	Bilan de la recherche, les éléments acquis et non acquis	149
13.1.1	Généralités	149
13.1.2	Enseignements pour les modèles vélos	149
13.1.3	Enseignements pour les modèles piétons	150
13.2	Recommandation pour des recherches ultérieures	151
	Annexes	153
	Glossaire	181
	Bibliographie	183
	Clôture du projet	193
	Index des rapports de recherche en matière de route	197
	Liste des publications SVI.....	199

Résumé

Ce travail de recherche montre que la modélisation macroscopique des cyclistes est d'ores et déjà faisable avec les méthodes existantes, à condition toutefois que les données de base nécessaires soient disponibles. Les expérimentations sont très avancées, les méthodes et les attributs à considérer sont reconnus. En général il est aussi possible d'intégrer un modèle vélo dans un modèle multimodal usuel.

Dans le domaine de la modélisation des piétons, d'importants travaux théoriques doivent encore être réalisés avant de passer à la modélisation macroscopique. Le travail de recherche a permis de formuler plusieurs considérations utiles pour la suite.

En général, les données de base font cruellement défaut. Comparativement aux autres modes de transport, les statistiques, comptages, matrices de flux piétons et cyclistes sont très lacunaires. Aucun progrès significatif n'est possible en modélisation sans données statistiques de qualité. Il faut donc rapidement compléter les connaissances dans ces domaines.

Modélisation des cyclistes

Les déplacements à vélo sont courts. Pour être affectés dans un modèle, il faut un déplacement entre deux zones, d'où une taille maximale de zone liée aux longueurs de trajets à vélo. Dans le cas du test sur la ville de Genève, des zones d'une taille d'environ 400 m de côté permettent d'affecter environ 98% des déplacements cyclables. Cette caractéristique a permis d'utiliser le modèle multimodal préexistant sans modification du zonage.

L'utilisation du vélo correspond la plupart du temps à des déplacements à part entière et plus rarement à des étapes d'une chaîne de déplacement intermodale (sauf dans le cas d'un rabattement sur la gare).

Pour la modélisation, il semble nécessaire de définir la totalité du réseau cyclable, soit toutes les voiries et les cheminements spécifiques s'il y en a (traversée d'un parc, cheminement le long d'une voie ferrée, etc.) et des connecteurs courts afin que l'affectation sur le réseau soit proche de la réalité. Dans le cadre de la recherche nous avons testé les attributs suivants : distance, pente positive maximale, pente positive du tronçon, bande cyclable, piste cyclable, contre-sens cyclable, voie bus autorisée pour les vélos, franchissement ou cohabitation d'une voie de tram, parcours avec agrément (beauté du paysage, environnement attrayant, etc.), nuisance ou gêne liée au trafic routier, danger ponctuel.

Par rapport aux autres modes de transport, la définition du réseau pose de nouveaux problèmes et défis. En effet, de multiples paramètres favorables ou défavorables contribuent à qualifier un itinéraire cyclable. Il n'est pas toujours facile de retenir un paramètre unique sur un tronçon pour le qualifier. Parfois il y a aussi un décalage entre les aménagements et l'usage réel (bande cyclable mais flux des cyclistes sur trottoir par exemple), ce qui complique le travail de définition et de qualification du réseau, qui doit refléter cet usage. Compte tenu de l'importance pour les choix d'itinéraires, nous recommandons que l'ensemble des cheminements cyclables soient intégrés dans les modèles de réseau des villes ou cantons.

La prise en compte de la pente à partir d'un modèle de terrain nécessite beaucoup de travail et de multiples contrôles à la main (ponts, passages souterrains, etc.). Nous recommandons que les modèles de réseau cantonaux et nationaux soient complétés en intégrant la troisième dimension grâce à l'attribut d'altitude, de manière à tenir compte de l'influence de la pente et du dénivelé sur le choix modal et le choix d'itinéraire. Le dénivelé agit plus sur le choix modal que sur le choix d'itinéraire.

Compte tenu que les données du microrecensement ne comprennent pas un échantillon suffisant et vu l'absence de méthode pour constituer des matrices à partir d'autres données empiriques, les matrices de demande doivent être créées de manière synthétique en s'appuyant sur les méthodes de modélisation macroscopique (génération, choix de destination, choix modal). Il est important de vérifier la validité des matrices ainsi constituées à l'aide de données empiriques (microrecensement, comptages, etc.). Il est en particulier recommandé de positionner les comptages de manière à constituer des écrans qui permettent d'améliorer la qualité des matrices disponibles.

Comme le choix d'itinéraire dépend des caractéristiques des tronçons mais aussi des chemins, soit de l'ensemble du parcours de l'origine à la destination, la construction des chemins est une étape importante de la modélisation. Cette étape peut s'avérer très consommatrice de temps de calcul vu le nombre de paramètres en jeu.

Les tests ont été réalisés à l'aide du modèle MMT existant (logiciel VISUM), sur un périmètre de la ville de Genève comprenant une partie de la rive droite de la ville, dont la gare, et des franchissements du Rhône. Ce périmètre représente environ 2 km² et comprend environ 100 km de voiries ou parcours cyclables. Il a été documenté avec 106 points de comptages piétons et vélos. Dans nos tests, le meilleur résultat d'affectation a été obtenu avec :

- Algorithme stochastique pour le choix d'itinéraire
- Génération des chemins basée uniquement sur la distance
- Construction des chemins avec une variance élevée, de manière à générer un grand nombre d'alternatives de parcours
- Répartition de la demande prenant en compte tous les autres attributs
- Le poids relatif des attributs est présenté dans le tableau ci-dessous.

Numéro (k)	Description (x_k)	Unité	Coefficient (α_k)	Taux de substitution par rapport à la distance	Unité
1	Longueur	[m]	-1.96E-02	1.000	[-]
3	Longueur de piste cyclable	[m]	9.41E-03	-0.480	[-]
4	Longueur de bande cyclable	[m]	1.10E-03	-0.056	[-]
5	Longueur d'infrastructure piétonne autorisée aux vélos	[m]	1.40E-03	-0.071	[-]
6	Longueur de voie de bus autorisée aux vélos	[m]	2.25E-03	-0.115	[-]
7	Longueur de voie de tram autorisée aux vélos	[m]	-4.40E-03	0.224	[-]
8	Longueur de un contre-sens VP autorisé aux vélos	[m]	1.40E-02	-0.715	[-]
10	Longueur d'environnement agréable	[m]	9.40E-03	-0.479	[-]
11	Charge VP * longueur	[uvh * m]	-3.69E-04	0.019	[uvh]
12	Maximum du ratio dénivelé positif / longueur	[-]	-2.64E+00	134.481	[%/m]
13	Longueur des dangers ponctuels	[m]	-4.71E-03	0.240	[-]

Le taux de substitution est la valeur dont doit augmenter/diminuer une variable pour compenser une augmentation/diminution unitaire de la variable de référence.

Une équivalence intuitive est, par exemple, que 100 m de parcours en piste cyclable représentent un effort équivalent à 52 m (100-48m) de parcours sans aménagement ou que 100 m de voie bus correspondent à 88 m de parcours sans aménagement (cf. aussi page 133).

Ces valeurs de paramètres ont été déterminées pour le contexte local genevois et doivent être vérifiées et adaptés en cas d'utilisation pour d'autres agglomérations.

En ce qui concerne le choix modal, la synthèse de la littérature existante permet de dégager les trois éléments principaux suivants :

- L'importance de l'environnement du parcours (pente, météo, contexte positif ou négatif)
- La subjectivité avec laquelle les facteurs d'environnement ci-dessus sont perçus
- D'autres impacts psychologiques, par exemple la mode liée au vélo, une conscience environnementale forte, etc.

Modélisation des piétons

Par rapport au vélo, les déplacements à pied s'effectuent sur des distances encore plus courtes et ils sont souvent associés à d'autres modes de transport. La modélisation doit accorder une grande importance aux étapes et pas seulement aux déplacements, puisque dans le cas de la ville de Genève (et du périmètre test du modèle) les étapes à pied réalisées dans le cadre de déplacements intermodaux représentent 56% du nombre total des étapes piétonnes et 42% de la distance totale réalisée à pied (cf. table ci-dessous). La modélisation doit donc impérativement construire les affectations en considérant aussi les chaînes de déplacement : piéton + TC, piétons + parking. Les distances étant plus courtes, il faut aussi chercher à définir quelle est la taille adaptée des zones pour disposer d'un maximum de déplacement interzones et un minimum de déplacements intrazones, donc non affectables.

	Etapes à pied qui correspondent à des déplacements à part entière		Etapes à pied qui s'insèrent dans des chaînes de déplacement intermodales		Total
Nombre	2'807	44%	3'567	56%	6'374
Distance [km]	2'408	58%	1'725	42%	4'133

Dans le cas de Genève, 90% des distances parcourues par les piétons (somme des étapes) le sont pour des trajets de plus de 200 m à vol d'oiseau. Une taille moyenne de zone de 200 m de côté permet donc de tenir compte de la majorité des distances parcourues à pied.

Dans le cas d'un modèle existant dont on souhaite étendre l'affectation aux piétons, il sera probablement intéressant de décomposer une partie des zones existantes et d'aboutir à un découpage d'environ 200 m de côté. Il faudra peut-être aussi créer des générateurs ponctuels supplémentaires (écoles, commerces alimentaires) pour tenir compte des flux de ces générateurs.

Dans le cas d'un modèle construit de A à Z, l'utilisation d'informations statistiques plus fines est vivement recommandée. En Suisse, les informations statistiques existent à l'hectare pour la population et les emplois. Il semble intéressant de les utiliser car cela permet de simplifier la difficulté de l'hétérogénéité du tissu urbain sous l'angle de la

mobilité piétonne. En effet, les écoles, les supermarchés alimentaires, les services (banque, poste), les arrêts de transports publics constituent autant de générateurs piétons parfois très intenses et concentrés qu'il est plus facile de traiter avec des zones de petite taille (hectare).

Nous recommandons de construire le réseau piéton en intégrant la totalité du réseau de voirie et de le compléter par tous les cheminements significatifs : passage en traversée de gare, passage à travers des centres commerciaux, cheminements informels, etc. Pour les parcs urbains, il faut surtout examiner quels sont les points d'entrées et sorties plutôt que de chercher à reproduire l'ensemble des parcours aménagés. Dans les grandes interfaces de transports (gares, pôles principaux des transports publics, etc.), il suffit en général d'en simplifier les relations internes et de considérer l'interface comme un groupe de nœuds de transport. Il semble superflu de distinguer les deux trottoirs d'une rue, car cela engendre un effort de modélisation et de collecte de données disproportionné par rapport au gain de fiabilité de la modélisation.

Dans le cadre de ce projet de recherche, le choix des attributs du réseau n'a pas pu être confirmé par des tests d'affectations. Cependant, les éléments suivants ont été mis en évidence :

- Plus que pour les autres modes, la distance (ou l'effort, ou le temps de parcours) est déterminante
- La capacité du réseau n'est pas un critère de choix d'itinéraire sauf dans quelques rares cas (abords d'un très gros générateur commercial ou d'une importante halte des transports publics)
- Une définition qualitative du socle actif (soit le type d'affectation et de service des rez-de-chaussée des bâtiments) ainsi que de l'ambiance d'une rue constitue une manière adéquate de combiner l'attrait local du réseau et d'améliorer la prise en compte de certains générateurs ponctuels.
- La gêne du trafic (sentiment de danger, volume sonore, difficultés à traverser la chaussée) est un attribut négatif à considérer, surtout s'il intervient sur une rue aux trottoirs étroits.
- La pente est un facteur à considérer. L'expérience montre que le piéton préfère en général un trajet court avec des escaliers plutôt qu'un trajet long avec des rampes ou des pentes douces.

En Suisse les matrices piétonnes dérivées du microrecensement transport sont plus complètes que pour les cyclistes. Elles semblent donc fournir une meilleure base pour valider l'affectation en milieu urbain, en comparaison du cas du vélo. Il faut aussi tenir compte du fait que certains déplacements n'ont pas de but géographique : promenade (chiens ou personnes), jogging, etc.

En ce qui concerne le choix de mode, les enseignements de la littérature sont identiques à ceux du vélo.

Enseignements concernant la collecte de données

Les domaines qui nécessitent le plus d'améliorations sont :

- Identifier comment et où positionner des comptages piétons pour qu'ils soient représentatifs des flux. Dans une rue les flux comptés peuvent très fortement varier selon la proximité immédiate avec des arrêts de transports en commun, des commerces alimentaires, un distributeur d'argent, une école, etc.
- Améliorer les méthodes pour estimer les flux cyclistes de manière représentative à partir de comptages courts
- Elaborer des méthodes permettant de combiner de manière optimale des comptages manuels de courte durée, des comptages continus automatisés ainsi que le recueil de traces de parcours par GPS

- Établir des courbes de variation journalières caractéristiques de flux piétons et cyclables selon les sites et le contexte
- Améliorer les méthodes de synthèse de matrices O-D pour le vélo en s'appuyant sur la modélisation (choix de destination et choix modal), vu que l'élaboration de matrices empiriques s'avère impraticable

Bilan de la recherche

En prolongement d'une analyse fouillée de la littérature technique existante, le travail de recherche a permis une nette avancée de plusieurs éléments clés de la modélisation macroscopique à 4 étapes pour les modes doux.

Pour le vélo, les questions de la bonne taille des zones, de la densité du réseau, du choix des connecteurs ont été clarifiées. Une avancée remarquable de ce travail de recherche porte sur les attributs à considérer pour l'affectation. Sur la base de plusieurs milliers de tests d'affectation, des recommandations ont pu être élaborées pour les paramètres principaux, leurs pondérations relatives et la méthode d'affectation. D'autres expérimentations, notamment sur des périmètres de modélisation plus étendus, devront encore compléter la connaissance accumulée sur le site test du centre de Genève.

En ce qui concerne les piétons, les avancées portent notamment sur la détermination de la taille des zones, l'importance des étapes (chaînes de déplacement piéton+TC ou piéton+VP) et la manière de définir les connecteurs. Le mandat de recherche a aussi mis en évidence de nombreuses clarifications statistiques à réaliser sur les comptages piétons avant de pouvoir engager des tests d'affectation. Des indications concrètes ont aussi été données sur les attributs qui semblent les plus pertinents pour l'affectation.

Zusammenfassung

Diese Forschungsarbeit zeigt, dass die makroskopische Modellierung des Veloverkehrs mit den bekannten Methoden heute schon machbar ist, nachdem die notwendigen Datengrundlagen erstellt sind. Die Modellierungsversuche sind weit fortgeschritten, geeignete Methoden und die zu berücksichtigenden Attribute sind erkannt. Im Allgemeinen ist es auch möglich, ein Veloverkehrsmodell in einem klassischen multimodalen Verkehrsmodell einzubauen.

Im Bereich der Fussverkehrsmodellierung sind noch wichtige theoretische Untersuchungen vor der Implementierung einer makroskopischen Modellierung notwendig. Dank der Forschungsarbeit konnten mehrere nützliche Hinweise für das weitere Vorgehen formuliert werden.

Im Allgemeinen besteht in Bezug auf die für die Modellierung notwendigen Messdaten ein hohes Wissensdefizit. Im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln sind die Statistiken, die Zählraten und die Nachfragematrizen für Fuss- und Veloverkehr sehr lückenhaft. Ohne zuverlässige Messdaten wird kein bedeutender Fortschritt in der Modellierung möglich sein. In diesen Gebieten müssen die Kenntnisse daher rasch vervollständigt werden.

Modellierung des Veloverkehrs

Mit dem Velo zurückgelegte Wege sind kurz. Für eine Umlegung im Modell muss ein Weg zwischen zwei Modellbezirken (=Zonen) stattfinden, infolgedessen muss die maximale Bezirksgrösse den Veloweglängen angepasst werden. Im Genfer Testmodell konnten mit Bezirken von ungefähr 400 m Seitenlänge etwa 98% der Velofahrten umgelegt werden. Dies erlaubte die Nutzung des existierenden multimodalen Verkehrsmodells, ohne Veränderung der Bezirkseinteilung.

Die Nutzung des Velos entspricht meistens vollständigen Wegen und seltener Wegeappen im Rahmen intermodaler Wege, ausser im Fall von Bahnhofzufahrten.

Für die Modellierung erscheint es unerlässlich, das gesamte Veloverbindungsnetz zu definieren, in dem sämtliche Strassen und sonstige Verbindungswege (Parkdurchquerungen, Wege entlang von Bahngleisen, usw.) berücksichtigt werden und in dem kurze Bezirksanbindungen eine realistische Umlegung auf das Verkehrsnetz sicherstellen. Im Rahmen der Forschungsarbeit wurden folgende Attribute getestet: Weglänge, maximale Wegsteigung, Segmentsteigungen, Radstreifen, Radweg, Radstreifen im Gegenverkehr, für das Velo geöffnete Busspuren, Überquerung oder Mitbenutzung von Tramschienen, landschaftliche Schönheit oder Erholungswert der Strecke, Beeinträchtigung durch den Autoverkehr, Gefahrenstellen.

Im Vergleich zu anderen Verkehrsmitteln führt die Definition des Netzmodells zu neuen Problemen und Herausforderungen. In der Tat tragen mehrere Parameter dazu bei, eine Velostrecke als günstig oder als ungünstig zu beschreiben. Dazu ist es nicht immer einfach, einen eindeutigen Parameterwert für die Attribute eines bestimmten Streckenabschnitts zu definieren. Letztlich gibt es auch Unterschiede zwischen dem regelkonformen Verhalten und tatsächlichem Verhalten (zum Beispiel, wenn Velofahrende das Trottoir anstelle eines Radstreifens bevorzugen). Da das Netz die tatsächliche Nutzung widerspiegeln muss, erschweren diese Unterschiede die Netzdefinition und die nähere Bestimmung der Netzabschnitte noch etwas mehr. Wegen der Bedeutung für die Velo-Routenwahl wird empfohlen, sämtliche Veloverbindungen in Kantons- oder Stadtnetzmodellen zu kodieren.

Die Berücksichtigung des Gefälles durch Integration eines Geländemodelles ist aufwendig und verlangt Kontrollen von Hand (Brücken, Unterführungen, usw.). Es wird empfohlen, die kantonalen und nationalen Strassennetzmodelle mit dem Attribut der dritten Dimension (Höhe) zu erweitern, damit der Einfluss von Steigung und Gefälle auf die Umlegung und die Verkehrsmittelwahl berücksichtigt werden kann. Das Gefälle beeinflusst die Verkehrsmittelwahl stärker als die Routenwahl.

Nachfragematrizen müssen mit Methoden der makroskopischen Modellierung synthetisch erzeugt werden (Erzeugung, Zielwahl, Verkehrsmittelwahl), da es keine empirische Methode zur Erhebung von Velo-Matrizen gibt und auch die Daten des Mikrozensus dafür nicht die ausreichende Stichprobe haben. Es ist wichtig, die Matrizenerzeugung mit empirischen Daten wie Mikrozensus und weitere Messdaten zu verifizieren. In diesem Zusammenhang empfiehlt es sich, Zählstellen derart auszurichten, dass dank Bildung von Screenlines die Qualität der verfügbaren Matrizen verbessert werden kann.

Die Routenwahl hängt sowohl von Abschnitts- sowie von Gesamtstreckenmerkmalen ab. Die Routenbestimmung ist ein wichtiger Schritt der Modellierung, der angesichts der Anzahl Parameter viel Rechenzeit in Anspruch nehmen kann.

Die Tests wurden mit Hilfe des existierenden Genfer Modells (MMT / VISUM) durchgeführt, für einen Bereich der Stadt Genf das einen Teil des rechten Seeufers (inkl. Bahnhof) sowie Flussüberquerungen der Rhône umfasst. Dieses Stadtgebiet ist etwa 2 km² gross und umfasst ungefähr 100 km Strassen oder Veloverbindungen. Zur Informationsbeschaffung wurden an 106 Stellen im Gebiet temporäre Fussgänger- und Velozählungen durchgeführt. Bei den Tests erfolgte das beste Umlegungsergebnis mit:

- Stochastischer routen-basierter Algorithmus
- Wegerzeugung, die einzig auf der Distanz basiert
- Konstruktion der Alternativrouten mit einer hohen Varianz, d.h. so dass möglichst viele Alternativrouten generiert werden
- Nachfrageverteilung, die alle anderen Attribute berücksichtigt
- Das relative Gewicht der einzelnen Attribute ist in folgender Tabelle dargestellt.

Nummer (k)	Beschreibung (x_k)	Einheit	Koeffizient (α_k)	Substitutionsrate in Bezug auf die Distanz	Einheit
1	Distanz	[m]	-1.96E-02	1.000	[-]
3	Weglänge mit Radweg	[m]	9.41E-03	-0.480	[-]
4	Weglänge mit Radstreifen	[m]	1.10E-03	-0.056	[-]
5	Weglänge in Mischzonen Velo/Fussgänger	[m]	1.40E-03	-0.071	[-]
6	Weglänge auf für Velos geöffnete Busspuren	[m]	2.25E-03	-0.115	[-]
7	Weglänge in Mitbenutzung von Tramschienen	[m]	-4.40E-03	0.224	[-]
8	Weglänge auf Radstreifen im Gegenverkehr	[m]	1.40E-02	-0.715	[-]
10	Weglänge in angenehmer Umgebung	[m]	9.40E-03	-0.479	[-]
11	Autobelastung * Weglänge	[uvh * m]	-3.69E-04	0.019	[uvh]
12	Maximales Verhältnis Positives Weggefälle / Distanz	[-]	-2.64E+00	134.481	[%/m]
13	Weglänge mit Gefahrenstellen	[m]	-4.71E-03	0.240	[-]

Die Substitutionsrate ist ein Koeffizient, mit dem eine Variable erhöht/reduziert werden muss, um eine Erhöhung/Abnahme der Referenzvariable zu übertragen. Hier handelt es sich um die Weglänge. Zum Beispiel entspricht ein 100m ausgebauter Radweg einer 52m langen Strecke ohne Ausbau (Siehe S. 133).

Diese Parameterwerte wurden für den Genfer lokalspezifischen Kontext errechnet. Im Fall einer Nutzung für andere Agglomerationen müssen die Werte überprüft und gegebenenfalls angepasst werden.

In Bezug auf die Verkehrsmittelwahl können aus der Synthese der existierenden Literatur folgende drei wichtigsten Befunde hervorgehoben werden:

- Die Bedeutung der Wegumgebungsverhältnisse (Steigung, Wetterverhältnisse, positiver oder negativer Kontext)
- Die Subjektivität die bei der Wahrnehmung der eben genannten Umgebungsfaktoren mitspielt
- Andere psychologische Einflüsse, zum Beispiel die Velokultur, ein starkes Umweltbewusstsein, usw.

Fussverkehrsmodellierung

Zu Fuss zurückgelegte Wege sind meistens noch kürzer als Velofahrten und sie erfolgen oft in Kombination mit anderen Verkehrsmitteln. Bei der Umlegung müssen verstärkt Wegetappen und nicht nur eigentliche Fusswege behandelt werden, da in der Stadt Genf (und im Gebiet des Genfer Testmodells) laut Mikrozensus die im Rahmen von intermodalen Wegen realisierten Fussetappen 56% der Gesamtanzahl der Fussetappen und 42% der zu Fuss zurückgelegten Distanzen darstellen (siehe folgende Tabelle). Die Modellierung muss also notwendigerweise eine Umlegung mit Berücksichtigung von intermodalen Wegketten vornehmen (d.h. Fuss + ÖV und Fuss + MIV & Parking). Da die Weglängen kürzer sind, muss man ausserdem überprüfen welche Bezirksgrösse anzustreben ist, damit ein Grossteil der Fussstrecken zwischen zwei Modellbezirken und nur ein minimaler Anteil innerhalb eines Bezirkes stattfindet und somit von der Umlegung ausgeschlossen wird.

	Etappen, die eigentlichen Fusswegen entsprechen		Zu Fuss zurückgelegte Wegetappen im Rahmen intermodaler Wegketten		Total
Anzahl	2'807	44%	3'567	56%	6'374
Distanz [km]	2'408	58%	1'725	42%	4'133

In der Stadt Genf stellen Fussverkehrsetappen von mehr als 200 m Luftlinie etwa 90% der zurückgelegten Distanzen dar. Eine mittlere **Bezirksgrösse mit 200 m Seitenlänge** erlaubt daher einen Grossteil der zu Fuss zurückgelegten Distanzen zu berücksichtigen.

Falls man ein bestehendes Verkehrsmodell mit einer Umlegung des Fussverkehrs erweitern möchte, wird es vermutlich sinnvoll sein, existierende Bezirke auf die angestrebte Seitenlänge von etwa 200 m zu unterteilen. Eventuell müssen dann auch zusätzliche punktuelle Erzeuger (Schulen, Supermärkte) eingebaut werden, damit die ausgelösten Verkehrsflüsse korrekt berücksichtigt werden.

Beim Aufbau eines neuen Verkehrsmodells ist es empfehlenswert, detailliertere statistische Datenquellen heranzuziehen. In der Schweiz sind Strukturdaten über Bevölkerung und Arbeitsplätze in Hektarauflösung vorhanden. Die Verwendung dieser

Daten erscheint sinnvoll, da sie dabei helfen können, die Heterogenität des Stadtgefüges aus Fussgängerperspektive abzubilden. In der Tat stellen Schulen, Supermärkte, Dienste wie Post oder Banken, ÖV-Haltestellen allesamt geografisch konzentrierte und teils intensive Fussverkehrserzeuger dar, die mit **kleinen (hektargrossen) Modellbezirken** leichter zu behandeln sind.

Beim **Aufbau des Modellnetzes** empfehlen wir, das gesamte Strassennetz zu berücksichtigen und zudem sämtliche bedeutenden Fussverkehrsverbindungswege darin zu integrieren: Bahnhofspassagen, Durchgänge in Einkaufszentren, inoffizielle Wege, usw. Bei Stadtparks muss der Fokus auf den Ein- und Ausgängen und nicht in der Gesamtheit der angelegten Wege liegen. Bei grossen intermodalen Verkehrsschnittstellen (Bahnhöfe, wichtige Umsteigehaltestellen des ÖV, usw.) genügt es meist, die internen Verbindungswege zu vereinfachen und die gesamte Schnittstelle als eine Gruppe von Verkehrsknoten zu betrachten. Eine Unterscheidung zwischen den beiden Trottoirs einer Strasse erscheint eher überflüssig, weil der daraus erzeugter Genauigkeitsgewinn einen unangemessenen Aufwand in der Modellierung und in der Datenbeschaffung auslösen würde.

In diesem Projekt konnten **die relevanten Netzattribute** nicht durch Umlegungstests bestätigt werden. Es konnten jedoch folgende Elemente hervorgehoben werden:

- Mehr als bei anderen Verkehrsmodi ist die Weglänge entscheidend (oder der Kraftaufwand, oder die Wegedauer)
- Die Netzkapazität ist kein Routenwahlkriterium, ausser in einigen seltenen Situationen (unmittelbare Umgebung eines sehr grossen Verkehrserzeugers oder einer wichtigen ÖV-Haltestelle)
- Eine qualitative Bestimmung der Sockelnutzung (öffentlich wirksame Erdgeschossnutzung) und der Aufenthaltsqualität stellt eine geeignete Lösung dar, um den lokalen Anreiz des Netzes zu definieren und gleichzeitig eine bessere Berücksichtigung von einzelnen Verkehrserzeugern zu gewährleisten.
- Beeinträchtigungen durch den MIV (Unsicherheitsgefühl, Lärm, Behinderung bei Strassenüberquerungen) sind als negative Eigenschaft zu berücksichtigen, insbesondere dann wenn eine Strasse mit schmalen Trottoirs ausgestattet ist.
- Das Gefälle ist ein zu berücksichtigender Faktor. Fussgänger bevorzugen erfahrungsgemäss eher kurze Treppenwege als längere Wege über Rampen oder sanfte Steigungen.

In der Schweiz sind aus dem Mikrozensus hergeleitete empirische Fussgängerdaten wesentlich umfangreicher als für Velofahrende. Sie scheinen daher im städtischen Raum eher zur Validierung der Umlegung verwendbar zu sein, als im Fall des Veloverkehrs. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass manche Fusswege kein eigentliches geografisches Ziel haben: Spaziergänge (mit Hund oder Personen), Jogging, usw.

In Bezug auf die Verkehrsmittelwahl sind die Befunde aus der Literatur identisch mit denen für das Velo.

Lehren für die Erhebung empirischer Langsamverkehrsdaten

Folgende Bereiche weisen am meisten Verbesserungspotential auf:

- Bestimmung der optimalen Position von Fussgängerzählstellen, so dass sie repräsentative Werte der Verkehrsflüsse liefern. Je nach Lage können die Werte für eine gegebene Strasse sehr stark abweichen, zum Beispiel in unmittelbarer Umgebung einer ÖV-Haltestelle, eines Supermarktes, eines Geldautomaten, einer Schule, usw.
- Verbesserung der Methoden zur Hochrechnung von Veloverkehrsflüssen aus Kurzzeitzählungen (Bestimmung von repräsentativen Tageswerten).

- Erarbeitung von Methoden, damit Messdaten von manuellen Kurzzeitzählungen, von automatischen Zählstellen sowie von GPS-Routenaufzeichnungen optimal kombiniert werden können.
- Ermittlung typischer Tagesganglinien für Fuss- und Veloverkehr, je nach Gegend und lokalem Umfeld.
- Die empirische Ermittlung von Quelle-Ziel-Matrizen für den Veloverkehr ist nicht praktikabel. Daher müssen die Methoden der Modellierung (Zielwahl und Verkehrsmittelwahl) verbessert werden.

Forschungsbilanz

Im Anschluss an eine eingehende Analyse der verfügbaren technischen Literatur ermöglichte die Forschungsarbeit einen deutlichen Fortschritt in mehreren Bereichen der 4-Stufen makroskopischen Modellierung des Fuss- und Veloverkehrs.

Für das Velo konnten die Fragen der optimalen Bezirksgrösse, der Netzdichte und der Anbindungskonfiguration geklärt werden. Eine bedeutende Erkenntnis dieser Forschungsarbeit betrifft die für die Umlegung relevanten Netzattribute. Aufgrund mehrerer tausend Umlegungstests konnte eine Empfehlung für die relevanten Parameter, deren relative Gewichtung und die bevorzugte Umlegungsmethode entwickelt werden. Weitere Modellierungsversuche, insbesondere für grössere Modellgebiete werden die mit dem Testgebiet des Genfer Stadtzentrums gesammelten Erkenntnisse allerdings noch vervollständigen müssen.

In Bezug auf den Fussverkehr konnten Fortschritte bei der Ermittlung der Bezirksgrösse, bei der Berücksichtigung der Etappen (intermodale Wege kombiniert mit ÖV oder Auto) und bei der Anbindungscharakterisierung erzielt werden. Das Forschungsvorhaben hat zudem mehrere statistische Fragestellungen betreffend Fussgängerzählungen identifiziert, die untersucht werden müssen als Basis für Umlegungstests. Ferner konnten konkrete Hinweise bezüglich der für die Umlegung wichtigsten Attributen erarbeitet werden.

Summary

This research shows that the macroscopic modeling of cyclists is already feasible with existing methods, provided that the necessary basic data are available. The experiments are quite advanced, the methods and the attributes to be considered are recognized. In general it is also possible to integrate a bike model in a state-of-practice multimodal model

In the context of pedestrian modeling, important theoretical developments still need to be done before moving on to macroscopic modeling. The research project allowed us to formulate several useful considerations for the future.

In general, there is a serious lack of basic data. Compared to other modes of transport, statistics, counts, matrices of pedestrian and cycling flows are very incomplete. No significant progress is possible in modeling without quality statistical data. Knowledge in these areas must therefore be rapidly supplemented.

Cyclists modeling

Cycling trips are short. In assignment models, only trips between two zones are generated, hence a maximum zone size related to the lengths of bicycle routes. In the case of the experiments on the city of Geneva, **zones with a size of about 400 m** of side allow to affect approximately 98% of the cycling trips. The pre-existing multimodal model could therefore be used without modifying the zoning.

The use of bicycles most often involves genuine trips and, more rarely, stages of an intermodal trip chain (except in the case of access and egress to the train station).

For the model, it seems necessary to **define the totality of the cycle network**, i.e. all roads and specific paths if any (crossing a park, track along a railway, etc.) and short connectors, so that the assignment on the network is realistic. During the research project, we tested the following attributes: distance, maximum positive slope, positive slope of the link, bicycle lane, bicycle path, biking allowed against traffic on one-way streets, bus lane authorized for bicycles, crossing or sharing a tram lane, path with amenities (scenic landscape, attractive environment, etc.), nuisance related to road traffic, danger.

Compared to other modes of transport, the definition of the biking network induces new problems and challenges. Indeed, multiple favorable or unfavorable parameters contribute to characterize a cycling route. It is not always easy to select a single parameter on a link to characterize it. Sometimes there is also a discrepancy between the facilities and the actual use (cyclists using the sidewalk despite the presence of a bike lane, for example), which complicates the modeling of the network, that is supposed to reflect the actual use. Given the importance of route choice, we recommend that all cycling paths be integrated into the network models of cities or cantons.

Taking into account the **slope** from a terrain model requires a lot of work and multiple controls by hand (bridges, underpasses, etc.). We recommend that the cantonal and national network models be supplemented by integrating the altitude as an attribute, in order to take into account the influence of the slope and the difference in height on the mode choice and the route choice. The difference in altitude affects the mode choice rather than the route choice.

Given that the micro-census data do not include a sufficient sample and given the absence of a method for constructing matrices from other empirical data, demand matrices must be created synthetically using macroscopic models (trip generation,

destination choice, mode choice). It is important to verify the validity of the matrices thus constituted using empirical data (microcensus, counts, etc.). In particular, it is advisable to position the counts using screen lines to improve the quality of the available matrices.

As the route choice depends on the characteristics of the links but also of the full paths from the origin to the destination, the generation of the paths is an important step in the modeling. This step can be very time consuming given the number of parameters involved.

The tests were carried out using the existing MMT model (VISUM), on a perimeter of the city of Geneva including part of the right bank of the city, including the station, and crossings of the Rhone. This perimeter represents about 2 km² and includes about 100 km of roads or cycling tracks accessible to cyclists. It has been documented with 106 points of pedestrian and bicycle counts. In our tests, the **best assignment result** was obtained with:

- Stochastic route choice.
- Path generation based only on distance.
- Use of a high variance for the path generation, in order to generate a high number of alternatives for the route choice model.
- Route choice model based on all the attributes.
- The weighting of the attributes is reported in the table below.

Index (k)	Description (x_k)	Unit	Coefficient (α_k)	Substitution rate compared to distance	Unit
1	Length	[m]	-1.96E-02	1.000	[-]
3	Length of cycling track	[m]	9.41E-03	-0.480	[-]
4	Length of cycling lane	[m]	1.10E-03	-0.056	[-]
5	Length of walkways allowed for cyclists	[m]	1.40E-03	-0.071	[-]
6	Length of bus lanes allowed for cyclists	[m]	2.25E-03	-0.115	[-]
7	Length of tram lanes allowed for cyclists	[m]	-4.40E-03	0.224	[-]
8	Length of one-way streets allowed against traffic for cyclists	[m]	1.40E-02	-0.715	[-]
10	Length of paths with amenities	[m]	9.40E-03	-0.479	[-]
11	Car traffic flow * length	[uvh * m]	-3.69E-04	0.019	[uvh]
12	Maximum of ratio positive difference of altitude / length	[-]	-2.64E+00	134.481	[%/m]
13	Length of potentially dangerous sections	[m]	-4.71E-03	0.240	[-]

The substitution rate is the value that a variable must be increased / decreased to compensate for a unit increase / decrease in the reference variable (here, the length of the path). For example, a 1.00 m increase in bicycle tracks corresponds to a 0.52 m (1.00-0.48) increase in the length of the path (see p 133).

These parameter values have been determined for the local context in Geneva and they have to be checked and adapted for use in other agglomerations.

Concerning the mode choice, the synthesis of the existing literature reveals the following three main elements:

- The importance of the environment of the route (slope, weather, positive or negative context)
- The subjectivity with which the above environmental factors are perceived
- Other psychological impacts, such as cycling-related fashion, strong environmental awareness, etc.

Pedestrians modeling

Compared to bicycles, walking is carried out over shorter distances and is often associated with other modes of transport. Modeling must place **great emphasis on the stages of the trip and not just on the trip**. In the case of the city of Geneva (and the test perimeter of the model), walking stages carried out on intermodal trips account for 56% of the total number of trips and 42% of the total walking distance (see table below). The modeling must imperatively generate the assignments considering also the trip chains: walking + public transportation, walking + parking. The distances being shorter, it is also necessary to identify the most appropriate size of the zones in order to have a maximum of interzonal trips and a minimum of intrazonal trips, the latter being ignored by the assignment.

	Walking stages that correspond to trips in their own right		Walking stages belonging to a multimodal trip		Total
Number	2'807	44%	3'567	56%	6'374
Distance [km]	2'408	58%	1'725	42%	4'133

In the case of Geneva, 90% of the distance traveled by pedestrians (sum of all stages) are for trips of more than 200 m as the crow flies. An average **zone size of 200m aside** allows to account for the majority of the walking distance.

In the case of an existing model to be extended for pedestrians, it is probably advantageous to decompose some of the existing zones and to obtain a cut-off of about 200 m. It may also be necessary to create additional centroids (schools, food stores) to account for the flows of these generators.

In the case of a model constructed from scratch, the use of finer statistical information is strongly recommended. In Switzerland, statistical information is available per hectare for population and employment. It seems interesting to use it because it allows to account for the heterogeneity of the urban area in terms of pedestrian mobility. Schools, food supermarkets, services (banking, postal services), public transport stops are sometimes very intense and concentrated pedestrian generators which are easier to deal with in **small zones (hectare)** .

We recommend building the **pedestrian network** by integrating the entire road network and complementing it with all the important paths: crossing a station, passing through shopping centers, informal routes, etc. For urban parks, it is important to examine the points of entry and exit rather than seeking to replicate all physical routes. In large multimodal platforms (stations, main stations of public transport, etc.), it is generally sufficient to simplify the internal relations and to consider the interface as a group of transport nodes. It seems superfluous to distinguish the two sidewalks of a street, because this generates a modeling and data collection effort disproportionate as compared to the corresponding added value to the modeling.

In this research project, the selection of the network attributes could not be confirmed by assignment tests. However, the following elements were highlighted:

- More than for other modes, distance (or effort, or travel time) is decisive.
- The capacity of the network is not a criterion for route choice except in a few cases (near a very large commercial generator or a major stop of public transport)
- A qualitative definition of the land use (the type of assignment and service on the ground floor of buildings) and the atmosphere of a street is an appropriate way of combining the local attractiveness of the network and to improve the role of certain point generators.
- The traffic discomfort (feeling of danger, volume of noise, difficulties to cross the road) is a negative attribute to consider, especially if for streets with narrow sidewalks.
- The slope is a factor to consider. Experience shows that pedestrians generally prefer shorter routes with stairs rather than a longer walk with ramps or light slopes.

In Switzerland the pedestrian OD matrices derived from the transport microcensus are more complete than for cyclists. They therefore appear to provide a better basis for validating urban assignments compared to bicycles. It should also be remembered that some trips do not have a travel purpose: walking (dogs or people), jogging, etc.

Regarding the mode choice, the lessons from the literature are identical to those for the bike.

Lessons learned on data collection

The areas that require the most improvements are:

- Identify how and where to position pedestrian counts so that they are representative of flows. On a street the flows counted can vary significantly depending on the immediate proximity of public transport stops, food shops, cash dispensers, schools, etc.
- Improve methods to estimate cycling flows from short counts.
- Develop methods to optimally combine short-term manual counts, automated continuous counts and GPS tracking
- Establish daily variation curves characterizing pedestrian and bicycle flows depending on the sites and the context
- Improve methods of synthesis of O-D matrices for bicycles based on modeling (destination and mode choice), since the development of empirical matrices seems impractical.

Research conclusions

In addition to a thorough analysis of the existing technical literature, the research work allowed a clear advance of several key elements of the 4-step macroscopic modeling for slow modes.

For the bike, the issues of the correct size of the zones, the density of the network, the choice of connectors have been clarified. A remarkable output of this research is the list of attributes to be considered for assignment. Based on several thousand assignment tests, recommendations could be developed for the main parameters, their relative weights and the assignment method. Other experiments, in particular on wider modeling perimeters, will still have to supplement the knowledge accumulated on the test site of the Geneva center.

As far as pedestrians are concerned, the advances concern in particular the determination of the size of the zones, the importance of the stages (chains of walking + public transportation or walking + private car) and the way of defining the connectors. The research project also highlighted many statistical clarifications to be made on pedestrian counts before assignment tests could be undertaken. Concrete indications were also given on the attributes that seem most relevant to the assignment.

1 Introduction

1.1 Pourquoi un modèle macroscopique pour les piétons et les cyclistes ?

1.1.1 Une politique de mobilité qui accorde toujours plus d'importance aux mobilités douces¹

Dès 2002 avec le plan directeur de la locomotion douce et sa politique des 3 piliers — traiter à égalité les transports individuels motorisés, les transports publics et les mobilités douces — la Confédération a donné un signe clair pour valoriser les mobilités douces (MD-Langsamverkehr). Avec les projets d'agglomération, la stratégie nationale en faveur des agglomérations a constitué une autre preuve de la volonté de rétablir un équilibre entre les modes de déplacement et de privilégier des formes urbaines compactes (principe de ville de proximité, de société à 2000 W ou d'écoquartiers).

Cette revalorisation des mobilités douces se fait dans un contexte international où les limites d'une planification des transports et, plus généralement, d'un mode de vie organisés autour de la voiture [1] sont de plus en plus décriées : congestion, problèmes de stationnement, santé et qualité de vie, pollution de l'air, surconsommation de ressources, changement climatique, accidents de la route... Les modes doux présentent quelques atouts majeurs qui confèrent à leur développement un grand potentiel pour améliorer durablement la qualité de vie dans les espaces urbains. Par exemple, dans le cas du vélo, les bénéfices d'un report modal des déplacements de courte et moyenne distance, sont souvent mis en avant [2], [3] :

- bénéfiques sanitaires liés à la pratique quotidienne d'une activité physique ;
- amélioration de la qualité de l'air et, plus généralement, des standards environnementaux (réduction des émissions de CO₂, bruit ou autres polluants...) ;
- soulagement de la congestion des infrastructures routières et de transport en commun déjà existantes.

La portée de ces avantages est amplifiée par deux facteurs. D'une part, le coût des investissements nécessaires à l'adoption des modes actifs pour les déplacements quotidiens est faible par rapport à ceux des modes motorisés. D'autre part, le potentiel de report modal est important. En Suisse 1/8 des déplacements en voiture font moins de 1 km et 1/3 moins de 3 km et la très grande majorité des déplacements en voiture ou en transports publics impliquent un accès à pied ou à vélo. À titre de comparaison, en Europe, plus de 30% des déplacements réalisés en voiture font moins de 3 km [4], [5]. Aux Etats-Unis, près de 40% des déplacements tous modes dans les aires urbaines font moins de 3 km [6].

À Genève, qui a pourtant la réputation d'être une ville automobile, 41% des ménages en ville sont non-motorisés et, à l'échelle du canton, 42% des déplacements (tous motifs confondus) se font en modes doux en 2010, contre 33% en 2000. Ces chiffres sont à mettre en relation avec 25 ans de politique d'aménagement en faveur du vélo (trafic cycliste multiplié par 5 durant cette période) et un des premiers plans piétons de Suisse. Pourtant tout cela s'est fait pratiquement sans outil prévisionnel. Avec des techniques appropriées, le résultat n'aurait-il pas été encore meilleur ?

¹ Le document utilise indistinctement le terme de « mobilités douces » ou de « mobilités actives » pour parler des déplacements à pied ou à vélo. Ces appellations concernent aussi les étapes de déplacements, c'est-à-dire les tronçons réalisés à pied ou à vélo sur une partie d'un déplacement partiellement en transports publics ou en voiture.

1.1.2 Des besoins d'outils de prévision nécessaires pour de nombreux arbitrages concrets

Malgré l'importance quantitative et qualitative des modes doux, les planificateurs et les décideurs disposent de très peu d'outils pour établir des prévisions de trafic relatives aux piétons ou aux cyclistes alors que les besoins sont réels et ne concernent pas que le monde des transports.

Les besoins pour des applications concrètes d'outils de modélisation capables de prévoir les flux de piétons et de cyclistes peuvent être classés sous quatre grands thèmes.

- 1) Tester le rapport coût-utilité des aménagements pour les modes doux (infrastructure) :
 - Pouvoir juger de l'utilité de certains investissements dans le cadre des projets d'agglomération (franchissement de cours d'eau, d'autoroute, de barrière topographique, de voie de chemin de fer, voie verte, etc.).
- 2) Evaluer les interactions avec le contexte (urbanisme et espace public) :
 - Mesure l'effet des rez-de-chaussée actifs (commerces, services, rapport à la rue), des nuisances sonores liées par exemple à un volume de trafic important, de la pénibilité des traversées sur le choix d'itinéraire, de la mixité d'affectation d'un quartier sur le choix modal, etc.
 - Juger du rapport de force sur l'espace public.
- 3) Estimer l'impact du changement de comportement des usagers :
 - Pouvoir tester de nouveaux équilibres de choix modal dans les parties urbaines et leurs conséquences en termes de planification (acceptabilité de l'extension de zones 30, de zones de rencontres, de zones piétonnes).
 - Tester des mesures sur la sédentarité de la population dans les déplacements quotidiens (enjeu de santé publique)
 - Comprendre comment et où améliorer les modes actifs en périphérie urbaine (itinéraires longs).
 - Comprendre comment décharger les TC dans les parties centrales d'agglomération par un report de déplacements sur les modes actifs (expérience de Londres, besoin à Genève).
 - Étendre l'impact des gares par une accessibilité piétonne et cyclable améliorée et sur un plus grand périmètre en traitant le problème de l'intermodalité
- 4) Evaluer la faisabilité/viabilité économique d'un projet (programmation urbaine, valeur foncière)
 - Disposer de prévisions de flux à l'attention des études urbaines ou commerciales (programmes commerciaux en fonction des flux passants) pour qualifier la valeur du prix du terrain.

1.1.3 Un modèle macroscopique pour les piétons et les cyclistes

Compte tenu des distances de déplacement auxquelles on s'intéresse, la **modélisation des cyclistes** peut se réaliser avec une structure similaire à celle du trafic individuel motorisé — TIM (découpage en zones, réseau). Les principales différences de situation se situent au niveau du choix de l'itinéraire, qui suit des logiques différentes de celle de la modélisation classique. Les motifs de déplacement couvrent un spectre large et la question des flux pendulaires est beaucoup moins déterminante qu'avec le TIM. Le vélo (ainsi que la marche) n'est pas seulement un mode de déplacement ; il peut aussi être une activité en soi, ou encore un accès aux autres modes. Les variations saisonnières sont marquées

mais n'impliquent pas l'abandon du vélo en hiver puisqu'à Genève 78.5% des cyclistes circulent toute l'année.

Pour la **modélisation des piétons**, les distances de déplacement courtes imposent des conditions sur la granulométrie du zonage et des réseaux bien plus fines que pour les modes motorisés. Le concept de réseau pour les piétons correspond moins à la réalité que pour les voitures (est-ce qu'une grande place piétonne doit être représentée par un nœud ou par un ensemble d'arcs ?). Ainsi, la question de l'affectation est encore plus complexe que pour le cycliste. Si l'on sait que le piéton est très sensible au chemin le plus court (voir l'omniprésence des raccourcis dans les parcs urbains), l'agrément du parcours est tout aussi déterminant, pour preuve, la très forte augmentation du nombre de piéton sur les places ou boulevards réaménagés en leur faveur. La notion même d'agrément est à considérer de manière large. Elle intègre l'ensoleillement, l'arborisation, les activités riveraines, le potentiel de rencontre ou de socialisation, l'ambiance du lieu, le cadre sonore, etc.

Si tous ces éléments sont bien connus des concepteurs d'espaces publics, ils sont par contre très peu documentés de manière quantitative. Il faudra donc créer un modèle évolutif qui permette d'intégrer par un paramétrage la quantification des éléments au fur et à mesure de l'amélioration de notre connaissance.

La marche intervient dans la plupart des déplacements, soit comme déplacement à part entière, soit comme mode d'accès. Une stricte analyse quantitative des flux sur les trottoirs ou sur certains itinéraires implique une proportion élevée mais difficile à estimer de déplacements d'accès aux TP ou aux TIM.

1.2 Objectifs de la recherche

La modélisation des modes doux pose des problématiques en partie différentes de la modélisation des modes motorisés. Le mandat de recherche se donne pour objectif de répondre notamment aux questions suivantes :

- Quels paramètres sont à considérer pour le choix modal et pour le choix d'itinéraire ?
- Comment décrire la qualité des espaces publics liés aux modes doux (types et valeurs d'attributs de réseau) ?
- Quel niveau de finesse faut-il avoir pour obtenir une description simple mais suffisante du réseau ?
- Quelle taille de zone est-elle adaptée aux besoins spécifiques de la modélisation des piétons et des cyclistes ?
- Quelles sources d'informations sont-elles disponibles et comment collecter les données permettant de caler un modèle ?
- Faut-il construire un modèle de A à Z pour la modélisation piéton vélo ou est-il possible d'adapter et d'étendre un modèle routier/TC préexistant ?

Pour s'assurer de la pertinence des préconisations faites un modèle modes doux de test est réalisé en parallèle sur une partie de la ville de Genève.

Au fur et à mesure de l'avancement de la recherche, il a été décidé en accord avec la commission de suivi de se concentrer sur les tests pratiques relatifs à la modélisation des cyclistes.

1.3 Champ d'application de la recherche

Les contours de la présente recherche sont les suivants :

- On considère **les modèles agrégés à 4 étapes**. Ce choix découle de la visée opérationnelle de ce travail, et de la place privilégiée que ces modèles occupent encore dans la pratique de la planification [7], [8].

- On s'intéresse essentiellement à **l'extension de modèles existants aux modes doux** et non à la création d'un nouveau modèle à partir de rien. Il s'agit bien d'intégrer la modélisation des modes doux dans une approche multimodale.
- On adopte une **approche pragmatique**, en l'état actuel des connaissances dans le domaine.

1.4 Test illustratif à l'aide du modèle multimodal de Genève

Afin d'illustrer par un exemple concret les principes de modélisation spécifiques aux piétons et cyclistes, un test est réalisé avec le Modèle Multimodal de Genève (MMT).

Le test porte sur une aire géographique délimitée (approximativement la rive droite de Genève sans le quartier des Pâquis). Le territoire, d'une taille de 2 km par 2,5 km, comporte l'ensemble des problématiques à tester :

- Centre-ville ;
- Accès à la gare
- Franchissement de coupures (Rhône, voies ferrés)
- Pente
- Rues commerçantes ou centralité des quartiers
- Écoles
- Parcs...

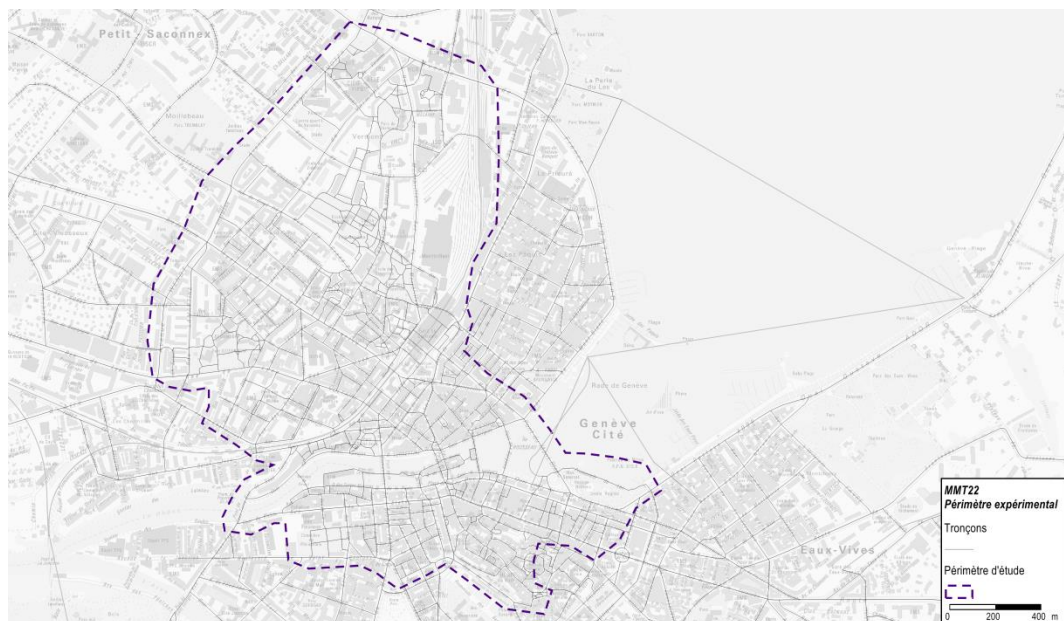


Fig. 1 Périètre expérimental sur Genève : MMT2.2

1.5 Organisation du rapport

Le présent rapport est organisé comme il suit.

- La section 2 est une revue de la littérature relative à la modélisation des modes doux. Elle décrit les différents facteurs explicatifs de la mobilité douce, ainsi que les détails techniques de formulation des modèles de choix d'itinéraire. Elle décrit également les expériences pratiques de modélisation.
- La section 3 décrit les sources de données disponibles en Suisse pour la modélisation et explique les techniques de comptages de vélos / piétons. Elle examine également

les perspectives ouvertes par le développement des technologies de l'information et de la communication et la disponibilité croissante des traces numériques (*digital footprint*).

- La section 4 présente des éléments méthodologiques sur les difficultés liées à la première étape d'un processus de modélisation : le choix de la finesse du zonage et de la représentation des infrastructures.
- Les sections 5, 6, 7 examinent les questions évoquées dans la section 4 de manière plus détaillée en référence spécifique aux piétons et aux cyclistes.
- La section 8 examine les méthodes pour établir une matrice OD observée permettant de faire le calage du réseau.
- La section 9 est consacrée à l'affectation. Elle formule les principes généraux à considérer pour les cyclistes (et par similitude pour les piétons).
- La section 10 passe en revue quelques tests d'affectations pour les cyclistes sur le périmètre d'expérimentation de Genève. Cette section donne des valeurs empiriques et des combinaisons de paramètres représentatifs avec les résultats correspondants, comparés aux comptages.
- La section 11 décrit les principales variables à intégrer dans un modèle de choix modal intégrant les modes doux.
- La section 12 donne des recommandations pratiques sur la mise en place d'une modélisation modes doux.
- La section 13 est la conclusion générale.

1.6 **A parte : quelle prise en compte des vélos à assistance électrique ?**

En raison du manque de données de base disponibles pour les utilisateurs de vélos à assistance électrique (VAE), ce mode de déplacement spécifique n'a pas été pris en compte dans nos exercices pratiques de modélisation. Cela dit, nous mentionnons dans les chapitres pertinents de ce rapport en quoi la modélisation des utilisateurs de VAE se distinguerait de celle des cyclistes. D'une manière générale, il ne faut pas sous-estimer l'effort lié à la prise en compte du VAE, car celui-ci comporte plusieurs caractéristiques propres par rapport au vélo, qui influencent à la fois

- le choix modal (choix du VAE pour des distances nettement plus longues, amenant principalement à une substitution de déplacements en automobile, impact négligeable de la pente),
- le choix d'itinéraire (les dénivelés ne représentent pas un frein significatif, la gêne liée au trafic est moindre grâce à une vitesse plus proche du flux automobile)
- ainsi que la vitesse moyenne de déplacement (19 km/h en milieu urbain voire plus, contre 15 km/h pour le vélo) [9].

2 Revue de littérature

Cette section cherche à dresser un panorama de l'état des connaissances et des pratiques en matière de modélisation des modes doux.

La littérature « quantitative » des déterminants de l'usage du vélo s'est considérablement développée ces dernières années. Elle peut être associée à deux axes principaux de recherche.

- Le premier concerne les différentes disciplines organisées autour de la planification des transports et l'aménagement urbain (génie civil, géographie, économie, urbanisme...).
- Le deuxième regroupe les disciplines de ce qu'on pourrait appeler sciences de la santé.

Dans un premier temps, on présente les différents déterminants de la mobilité douce, pour ensuite décrire les différents travaux sur la formalisation de ces déterminants au sein des étapes de choix de mode et de choix de destination. On présente également les partis pris dans certains modèles opérationnels. Cette revue de littérature emprunte grandement à d'autres efforts précédents de synthèse, notamment [3], [5], [10], [11].

2.1 Facteurs influençant l'usage du vélo comme mode de déplacement

Il est possible de trouver des synthèses très complètes des déterminants de l'usage des modes doux, notamment du vélo, comme mode transport (voir [3], [12]–[15], entre autres). À l'image de ces travaux, on fera référence essentiellement à des recherches empiriques publiées dans des revues consacrées aux comportements de déplacement, à la planification des transports, à la psychologie et aux sciences de la santé.

Les déterminants du choix du vélo peuvent être classés dans six groupes :

- Environnement bâti, forme urbaine et distances ;
- Caractéristiques de l'individu et du ménage ;
- Caractéristiques du déplacement ;
- Facteurs psychologiques ;
- Caractéristiques des infrastructures ;
- Environnement naturel

2.1.1 Environnement bâti, forme urbaine et distances

Compte tenu de l'effort physique inhérent aux déplacements modes doux, **la distance à parcourir est un élément fondamental**. Elle détermine la possibilité de réaliser un déplacement à pied ou à vélo. La distance de parcours est elle-même déterminée par l'organisation spatiale des lieux dans lesquels se tiennent les différentes activités des individus. Comme noté par [16], l'influence de la forme urbaine sur la demande de déplacement est un sujet souvent discuté dans la littérature. Il est maintenant usuel de l'appréhender à partir du concept des 3 D [17] — densité, diversité, design —, étendu depuis à d'autres aspects. L'analyse des 3 D originaux est suffisante ici.

La notion de **densité** est liée à celle de ville compacte : il est souvent mis en avant qu'**une densité plus importante est associée à une part plus importante des modes doux** [18], [19]. Il est ainsi commun d'opposer les centres denses des villes européennes, comme Paris, aux formes urbaines étalées, à l'image d'Atlanta aux États-

Unis. Au sein d'un même ensemble urbain, il faut faire la distinction entre centre et périphérie. Les habitants du centre utilisent plus fréquemment le vélo pour des déplacements utilitaires [20]. La densité est également associée à un niveau de motorisation plus faible.

La densité est un indicateur agrégé, au même titre qu'une moyenne. Elle peut, cacher différents niveaux de concentration spatiale ou de fonctions du bâti. Le rôle du deuxième D, la **diversité**, est d'évaluer la composition d'une unité d'espace donnée (souvent petite, comme le quartier). La littérature suggère qu'**une mixité de fonctions est associée à une part modale des modes doux plus élevée** [19], [21].

Le **design** fait référence à la densité et au maillage des infrastructures routières. Dans le contexte de modes doux, il fait aussi référence aux trottoirs, à leur largeur, à la largeur moyenne des rues, au nombre de passages piétons, à la qualité des aménagements cyclables, etc. Cet élément sera analysé plus en détail dans la section 2.1.5.

2.1.2 Caractéristiques de l'individu et du ménage

Les caractéristiques de l'individu et du ménage ont une grande importance dans la décision de se déplacer à vélo.

L'**âge** joue un rôle important. L'usage du vélo décroît avec celui-ci [20], [22]–[24]. Il y a une grande proportion de personnes dont l'âge est entre 16 et 29 ans parmi celles qui se déplacent à vélo [25], les étudiants étant une population avec une propension particulièrement élevée à utiliser le vélo [26]. Certains auteurs remarquent l'existence d'un pic pour les personnes ayant entre 20 et 25 ans [27]. L'usage du vélo est beaucoup moins fréquent après 45 ans, même si les derniers travaux montrent une augmentation de l'usage du vélo chez les seniors [23]. Cette augmentation est observable tant aux États-Unis, où le vélo n'est que rarement utilisé par les personnes de plus de 45 ans, qu'en Europe et au Canada, où l'utilisation du vélo était un peu plus fréquente [11]. Dans les pays avec une part modale élevée pour le vélo, la corrélation négative entre âge et niveau d'usage de celui-ci est moins marquée [5].

Le **sexe** du cycliste a un impact important puisque dans la plupart des études, les hommes ont tendance à prendre le vélo plus fréquemment que les femmes [2], [20], [22], [23], [27]–[30]. Cependant, dans les pays où la part du vélo est très importante, comme les Pays Bas ou le Danemark, les femmes ont tendance à utiliser le vélo plus fréquemment [31].

Le **revenu** semble avoir un impact, mais celui-ci est corrélé avec d'autres facteurs (niveau d'études, équipement en vélos, taux de motorisation...), ce qui complique l'interprétation de la relation [3]. Au niveau agrégé, le revenu est corrélé négativement avec l'usage du vélo [19], [22]. Au niveau désagrégé, certains auteurs ont trouvé une corrélation positive entre niveau de revenu et propension à utiliser le vélo. Ainsi, en Angleterre et au pays de Galles, un lien a été établi entre faible revenu et faible usage du vélo [18]. L'explication avancée par les auteurs est que le revenu peut servir de *proxy*² aux variables d'environnement (risque de vol du vélo, problèmes d'image...). D'autres études mettent en évidence une corrélation positive entre revenu et usage du vélo [20], [22], [32] [33]. Ceci est à rapprocher des études qui trouvent une corrélation positive entre niveau d'études et usage du vélo [26], [34].

De même manière que pour les modes motorisés, l'usage du vélo est plus fréquent lorsque les **ménages sont équipés d'un ou plusieurs vélos** [20]. Et, inversement, l'usage du vélo est moins fréquent selon le niveau de **motorisation** et la **taille du**

² Une variable *proxy* est une variable intermédiaire, qui est utilisée à la place d'une autre variable. En statistique, on utilise généralement une variable *proxy* pour tenir compte d'une variable non observable ou non mesurable. Pour qu'une variable soit un bon *proxy*, elle doit avoir une corrélation avec la variable qu'elle remplace. Par extension, le mot *proxy* est utilisé ici pour faire référence au fait que le revenu est corrélé avec d'autres variables explicatives non utilisées dans les analyses.

ménage [34]. Il convient de noter que l'équipement en vélos et voitures est corrélé avec le niveau de revenu.

Le **niveau d'expérience** du cycliste joue également un rôle important [35].

2.1.3 Caractéristiques du déplacement

Les différentes caractéristiques du déplacement ont un impact sur le choix du mode et donc sur l'usage du vélo. D'après [33], qui modélisent le choix du mode pour les déplacements courts, le motif travail a une corrélation positive avec la probabilité de choisir le vélo, mais la relation n'est pas statistiquement significative. Deux motifs ont un impact négatif sur la probabilité d'utiliser le vélo : les achats et l'accompagnement.

Ce résultat correspond assez bien à l'intuition puisque :

- Dans le cas des achats, il faut porter des sacs de courses...
- Dans le cas de l'accompagnement, il faut pouvoir se déplacer à plusieurs avec le même mode et éventuellement porter des bagages...

Si ces tâches peuvent être accomplies avec un équipement cyclable spécifique (biporteur ou « vélo brouette »), elles sont peu commodes avec un équipement standard.

Par extension, lorsque l'enchaînement des activités journalières inclut ces motifs, la probabilité d'utiliser le vélo est plus faible.

2.1.4 Facteurs psychologiques

Image du vélo

En Amérique, l'attitude des personnes à l'égard de la voiture est plus positive que celle à l'égard du vélo [20]. Avoir une attitude positive à l'égard du vélo augmente la probabilité de choisir ce mode pour les déplacements pendulaires, ce qui est valable même pour les personnes qui n'utilisent pas encore le vélo. [36].

Préoccupations environnementales et de bien être

L'importance que les personnes accordent aux bénéfices de santé associés à la pratique du vélo a un impact positif sur la probabilité de l'utiliser pour les déplacements quotidiens [36]. De la même manière, avoir une perception négative des conséquences de l'utilisation de la voiture a un impact favorable sur la probabilité d'utiliser le vélo [32].

Habitude

L'existence d'effets d'habitude fait que le choix du mode peut être différent de celui qui résulterait d'une évaluation rationnelle. Ils se manifestent par une recherche moindre d'information qui conduit à la non-prise en compte de toutes les options. Concrètement, si une personne est habituée à utiliser un mode de transport pour un certain trajet, elle aura moins tendance à chercher des alternatives. Cependant, si une personne utilise le vélo pour des trajets de loisir, elle aura plus tendance à considérer aussi ce mode pour les trajets pendulaires [2].

Il semble que le choix du mode de transport régulier se fait lors de ruptures dans le cycle de vie (mariage/divorce, déménagement, nouveau travail, etc.) et que les décisions se prennent à long terme [37].

Normes et usages

Les normes prennent la forme d'un contrôle informel. En effet, les individus adaptent leur comportement pour être en accord avec les usages d'un certain groupe. Ainsi, par

exemple, la probabilité de se rendre à vélo à son lieu de travail est plus élevée si des collègues en font autant [20]

Sécurité

Le vélo est généralement perçu comme étant le mode le plus dangereux pour se rendre à son lieu de travail [5], [38]. La perception de la sécurité est fortement liée à la préférence pour les infrastructures avec des aménagements. En distinguant dans son analyse la perception de la probabilité d'avoir un accident et la perception de la sévérité de l'accident, [38] a trouvé que la probabilité d'avoir un accident est peu significative dans le choix modal, alors que la perception de la sévérité de l'accident est significative. **Les améliorations de sécurité perçues ont une élasticité supérieure à un, ce qui indique qu'elles attirent proportionnellement plus de cyclistes** [5], [38].

La sécurité est un facteur important dans la promotion de l'usage du vélo. Les auteurs favorables à un développement similaire à celui des Pays Bas ou du Danemark, à l'aide d'infrastructures dédiées aux cyclistes, mettent en avant le fait que la perception de sécurité attirera de nouveaux cyclistes [39]. À l'opposé, les positions du courant *vehicular cycling* avancent que développer des infrastructures dédiées promeut l'image que les cyclistes ne sont pas des usagers légitimes des infrastructures routières [40], ce qui, à terme, serait un détriment au développement du vélo.

Facteurs psychologiques et modélisation

Dans un contexte de modélisation, il existe des techniques pour prendre en compte les facteurs psychologiques [41], [42]. La particularité de ces facteurs réside dans leur caractère non mesurable, qualitatif.

Une première stratégie consiste à définir les facteurs psychologiques à partir d'attributs observables. Certains travaux développent l'idée qu'il y a plusieurs types de cyclistes, avec des attitudes, des perceptions et des préférences différentes à l'égard des aménagements cyclables [35], [43]–[45]. Les attributs revenu, âge, niveau d'expérience et motif du déplacement, entre autres, ont été proposés pour définir des catégorisations permettant de différencier les types de cyclistes [10].

Une deuxième stratégie consiste à faire appel à des modèles à variables latentes. En effet, les modèles de choix discrets classiques représentent le processus de décision des agents économiques en faisant interagir des attributs mesurables des alternatives et les sensibilités du décideur à ces attributs (préférences). Les attitudes sont intégrées dans des modèles hybrides sous forme de variables latentes. Des variables auxiliaires sont utilisées pour modéliser les variables non observables, c'est-à-dire les indicateurs de perception. [41], [42]. L'utilisation de variables latentes implique l'identification préalable, au niveau de l'enquête, des facteurs qui peuvent permettre de construire des indicateurs de perception.

2.1.5 Caractéristiques des infrastructures

Voiries et aménagements cyclables

L'analyse des aménagements cyclables et de leur qualité a été discutée assez longuement dans la littérature. **Les utilisateurs potentiels du vélo préfèrent les itinéraires comportant des aménagements limitant l'interaction avec les voitures** [14], [18], [32], [46]–[49].

Dans les analyses sur des données agrégées, les pays qui ont la plus grande densité d'aménagements cyclables sont ceux où le vélo a des parts modales plus élevées [50]. En particulier, la présence **d'itinéraires cyclables dédiés**, semble avoir une forte importance [19]. Selon [20], les personnes enquêtées ont tendance à déclarer qu'elles utiliseraient le vélo plus fréquemment s'il y avait plus d'infrastructures dédiées, d'accès facile et desservant des destinations utiles ou intéressantes. De manière

complémentaire, l'absence d'aménagements cyclables est souvent mentionnée dans les enquêtes comme une raison de ne pas utiliser le vélo [6].

La **continuité des aménagements cyclables** a un impact positif sur l'usage du vélo. Plus particulièrement, l'existence d'un segment « non-protégé » sur un itinéraire peut décourager certains cyclistes [32], [43]. La fin abrupte d'un aménagement cyclable est très mal perçue, notamment par les cyclistes les moins expérimentés.

Un autre élément important de cette interaction entre cyclistes et autres véhicules est la **disposition des places de stationnement**. Les cyclistes jugent que les voiries sans places de stationnement adjacentes pour les voitures ont un risque plus faible d'accidents [32], [43]. En effet, en l'absence de places de stationnement adjacentes, les conflits entre les cyclistes et les automobilistes qui se garent sont moins fréquents. Par ailleurs, le stationnement des voitures présente le risque de portières qui s'ouvrent et coupent la route du cycliste (parfois sans que celui-ci ait le temps de réagir) [5].

En ce qui concerne les **intersections**, les cyclistes ont tendance à éviter les itinéraires avec trop d'arrêts car l'effort de freinage et de reprise est coûteux [43], [51], [52]. Ces arrêts sont liés à la présence de grands carrefours où la traversée est rendue plus difficile par la signalétique (feux, arrêts obligatoires) ou tout simplement par l'importance du trafic routier. Il y a moins de personnes qui prennent le vélo dans les villes où les arrêts sont nombreux [50], [53]. Cependant, tous les cyclistes n'accordent pas la même évaluation négative selon le type de signalisation aux carrefours, puisque les cyclistes avec plus d'expérience sont plus à l'aise en contact du flux véhiculaire.

En ce qui concerne la qualité du revêtement de la route, peu de recherches ont été consacrées à ce sujet. Les quelques travaux existants suggèrent que les cyclistes favorisent généralement les itinéraires où la surface est la moins accidentée [3], [43], [43], [54].

Aménagements à l'origine ou à destination

Plusieurs travaux mettent évidence l'importance accordée par les cyclistes à disposer d'**emplacements pour garer leurs vélos en sécurité** [2], [3], [14], [47], [55]. La présence de ces équipements à proximité de son lieu de travail augmente la probabilité de s'y rendre à vélo [2]. De manière similaire, la disponibilité de ces équipements à proximité des gares et autres pôles intermodaux augmente l'attractivité du vélo comme mode de rabattement vers les transports publics [46]. L'importance accordée à ces équipements s'accroît selon le prix d'achat du vélo ou sa valeur perçue [14].

D'autres équipements auxquels les cyclistes accordent une importance, dans le contexte de déplacements pendulaires, sont les douches ou vestiaires. Les résultats de travaux testant leur impact n'est cependant pas sans ambiguïté. Certains travaux trouvent un impact positif pour les douches [14], [47], [56], alors que d'autres, trouvent que leur impact n'est pas significatif [2], [46].

S'ils doivent choisir entre les deux types d'équipement, le stationnement sécurisé est privilégié [14], [57].

Type d'usage du sol

L'esthétique de l'environnement bâti a un impact sur l'utilisation des modes doux [58]. **Être dans un environnement attractif est cité comme étant l'un des aspects les plus positifs du déplacement à vélo** [36].

2.1.6 Environnement naturel

Pente ou dénivelé

À la différence des modes motorisés, la topographie du territoire a un impact fort sur le choix du vélo en tant que mode de déplacement. Plusieurs études ont mis en évidence une corrélation négative forte entre la présence de dénivelés positifs et la part modale du vélo [18], [21], [29], [53], [59]. L'expérience montre aussi que des tronçons à « forte pente » incitent certains cyclistes à contourner l'obstacle et à choisir d'autres itinéraires même s'ils sont plus longs [60]–[62].

L'importance du dénivelé est cependant nuancée par certains travaux qui suggèrent que les facteurs individuels ont une importance plus élevée que les facteurs environnementaux [27], ou qu'il peut exister des effets de compensation où le dénivelé positif serait compensé par le dénivelé négatif (aller et retour) [32]. La présence de dénivelés ne rend pas impossible l'utilisation du vélo, comme le montre la part modale de celui-ci à Bâle [5] ou à Berne.

Par ailleurs, le motif du déplacement peut conduire à une préférence pour les pentes (sortie loisirs, sportive) [32]

Conditions météorologiques

La littérature appréhende l'influence des conditions météorologiques sur l'utilisation des modes doux en distinguant des périodes longues — les saisons — ainsi que des périodes courtes — la journée. Parmi les éléments météorologiques les plus souvent analysés se trouvent la température (chaud ou froid extrêmes), les précipitations et la lumière.

En ce qui concerne la température, l'usage du vélo est plus fréquent pendant les saisons chaudes et moins pendant les saisons froides [2], [5], [63] mais les courbes saisonnières montrent que si les cyclistes sont moins nombreux en hiver, leur nombre est quand même de 50% des flux d'un jour moyen (moyenne annuelle). Les régions avec des hivers plus froids connaissent une chute plus importante de la fréquence des déplacements à vélo ainsi que des distances parcourues [26], [54].

En ce qui concerne les précipitations, elles sont décrites comme des obstacles très importants dans la décision quotidienne de se déplacer à vélo [54], [63]. Cependant, lorsque l'on prend en compte ce facteur dans un modèle, il faut faire attention au type d'indicateur retenu. Certains indicateurs n'ont pas d'impact significatif [21].

2.2 Déterminants du choix du chemin pour le vélo

La plupart des études centrées sur les comportements de choix d'itinéraire peuvent être classées selon la méthode de collecte de données qu'elles utilisent : préférences déclarées ou préférences révélées [15]. Les premières sont plus abondantes que les secondes, ce qui peut s'expliquer par la difficulté (coût) d'enregistrement et de traitement des données d'itinéraires réalisés avant la mise au point des systèmes GPS peu onéreux. Les avantages et inconvénients des données de préférences sont décrits plus en détail dans [61].

2.2.1 Préférences déclarées

Distance et temps de parcours

Les résultats des études de préférences déclarées sur les choix d'itinéraires suggèrent que le **facteur le plus important est la distance** (ou le temps de déplacement) [43]. Plus récemment, l'analyse d'une enquête par internet destinée aux cyclistes du Texas, États-Unis [10], montre que les cyclistes pendulaires sont plus sensibles au temps de parcours que le cycliste moyen.

Aménagements cyclables et niveau de trafic automobile

Concernant la préférence pour les aménagements cyclables, elle a été mise en évidence par plusieurs travaux [14], [43], [64], [65].

Selon [14], étude faite à Edmonton au Canada, une minute de vélo sur une voie à trafic important est équivalente à 4,1 minutes sur une piste cyclable, la sensibilité dépend cependant du niveau d'expérience du cycliste.

Les femmes ont une probabilité plus forte de choisir les itinéraires offrant un niveau de sécurité plus élevé [66].

2.2.2 Préférence révélées : données GPS

La littérature sur le choix du chemin à partir d'enquêtes de préférences révélées est un champ en croissance ces dernières années. L'ubiquité des smartphones ainsi que la possibilité d'équiper les enquêtés de systèmes GPS peu onéreux pour l'enregistrement des itinéraires en est certainement à l'origine [15], [60]–[62], [67].

Le premier modèle de choix d'itinéraires créé à partir de données GPS (enquête à préférences relevées) a été réalisé par [60] pour Zürich. Une importante enquête a permis de récupérer les données GPS de 2'436 résidents. Les itinéraires ont pu être recomposés et reconstitués sur un réseau vélo dense. **L'étude montre l'importance d'offrir des chemins directs pourvus d'infrastructures dédiées aux cyclistes.** Les détours sont acceptés, pour autant que le déplacement soit court.

Une étude similaire basée sur le recueil de données GPS à San Francisco, Californie, États-Unis [62] permet d'introduire des variables autres que celles communément utilisées pour expliquer le choix de l'utilisation du vélo telle que la distance. Ainsi, l'étude a démontré que les cyclistes pendulaires ont une préférence pour les axes pourvus de pistes cyclables. Les cyclistes recherchent toutefois des itinéraires qui se rapprochent du plus-court chemin. Cette étude est particulièrement intéressante car elle donne des taux marginaux de substitution en utilisant des « unités intuitives » (**Tab. 1**). Le taux marginal de substitution est une mesure de la façon dont on peut substituer (à la marge) un produit par un autre, à satisfaction constante du consommateur. La lecture des coefficients en **Tab. 1** se fait de la manière suivante (donnée par [62]) : Le cycliste moyen évitera un mouvement tournant si cela ne rajoute pas plus de 0,17 km à son parcours. Il évitera d'emprunter une voie avec un dénivelé de 10 m si le détour est de moins de 0,59 km. Pour les aménagements cyclables, les unités de longueur s'annulent, laissant simplement un coefficient de proportionnalité. Le cycliste n'empruntera pas une rue à contresens si la distance de parcours sur celle-ci n'est pas 4 fois inférieure à la distance d'un parcours alternatif sur une voie normale.

Tab. 1 Taux marginaux de substitution à San Francisco. Choix du chemin. Source [62]

Taux marginaux de substitution de la longueur	Coefficient	Unité
Mouvements tournants	0,17	Km /mouvement tournant
Longueur de contresens	4,02	Aucune
Longueur de voies exclusivement cyclables ou piétonnes	0,57	Aucune
Longueur de pistes cyclables	0,49	Aucune
Longueur de route balisée vélo mais partagée avec les voitures	0,92	Aucune
Dénivelé positif	0,59	Km / 10 m

A Portland, Oregon, États-Unis, des données GPS enregistrées par 164 cyclistes réguliers ont également été explorées [61]. Il s'avère **que pour les déplacements liés au travail, les cyclistes sont beaucoup plus sensibles à la distance que toute autre**

variable, même s'ils sont prêts à parcourir plus de distance afin d'éviter les pentes de plus de 2%. Les caractéristiques des carrefours sont aussi des facteurs influençant le choix des itinéraires. En effet, les cyclistes évitent les stops ou toute régulation de trafic, excepté lorsqu'ils ont besoin de réaliser des mouvements de tourne-à-gauche au niveau des carrefours où le niveau de trafic est élevé, pour des questions de sécurité. Le modèle développé dans le cadre de cette étude a été introduit par Portland Metro dans leur modèle multimodal de demande de déplacements.

2.2.3 Perspective d'une étude qualitative menée en Suisse

L'étude qualitative réalisée récemment auprès de 30 cyclistes genevois pour mieux comprendre leurs choix d'itinéraires livre plusieurs conclusions intéressantes [68] :

- Les préférences individuelles sont principalement déterminées par **deux logiques fondamentales de choix d'itinéraire**, l'une étant orientée vers la « **rapidité** » et l'autre vers la « **sécurité** ». Les cyclistes accordant davantage d'importance à cette deuxième logique privilégient des chemins sur lesquels ils se sentent en sécurité sur toute la longueur de leur itinéraire, quitte à faire des détours importants par rapport au parcours le plus direct.
- Les cyclistes orientés « sécurité » valorisent d'une part les itinéraires qui disposent d'aménagements cyclables continus et, d'autre part, les rues de quartier à moindre trafic. Les pistes cyclables sont souvent considérées comme étant nettement plus sûres que des bandes cyclables tracées sur la chaussée.
- D'une manière générale, les facteurs d'agrément jouent plutôt un rôle secondaire dans les choix d'itinéraires du cycliste urbain. En ville, la réalité est telle qu'il est difficile d'éviter les nuisances du trafic motorisé et, sur les parcours quotidiens, il s'agit plutôt d'en limiter les désagréments, voire le cas échéant de profiter de « petits moments de plaisir » qu'on parvient à trouver en cours de route, en privilégiant une variante d'itinéraire qui permet de longer le lac ou un fleuve, ou encore de traverser un parc.
- **Les choix d'itinéraires des cyclistes sont fortement conditionnés par des habitudes de parcours.** En pratique, cela signifie que les cyclistes privilégient très nettement des tronçons de parcours connus plutôt que de s'aventurer sur des itinéraires qu'ils n'ont pas encore pratiqués et cela limite les processus d'optimisation des choix d'itinéraires.

2.2.4 Synthèse des principales variables retenues dans la littérature

La **Tab. 2** présente une synthèse des différents facteurs explicatifs du choix du chemin. Elle regroupe des informations données dans [14], [15].

Tab. 2 Facteurs explicatifs du choix de chemin pour le vélo. Source : [14], [15]

Facteur	Références
Caractéristiques de l'infrastructure	
Type d'infrastructure (circulation mixte avec les voitures ou aménagement cyclable)	[35], [46], [49], [67], [69]–[81]
Nature de la voirie partagée (catégorie de route, distance de visibilité, rayon des virages, configuration des voies)	[44], [45], [67], [71], [72], [78], [80], [82]–[85]
Présence de voitures garées sur les côtés	[44], [80], [82]
Type et qualité du revêtement routier	[35], [44], [69], [70], [78], [82]
Dénivelé de la route	[2], [35], [69], [82]
Présence et configuration des intersections	[44], [67], [82], [86]
Priorité accordée aux cyclistes aux intersections à feux	[72]
Complétude, continuité et absence de « détours » de l'infrastructure cyclable	[2], [72], [81], [87]
Douches à l'origine et à la destination	[46], [74], [81]
Disponibilité de parkings vélos sûrs à l'origine et à la destination	[46], [71], [72], [74], [80], [81], [83], [88]
Caractéristiques du trafic non-cycliste	
Vitesse des voitures et comportement des conducteurs	[44], [45], [69], [78], [80], [82], [85]
Volume du trafic et part de poids lourds	[35], [44], [45], [69]–[71], [78], [80], [82]
Interaction avec les piétons	[80]
Caractéristiques individuelles et du déplacement	
Âge	[46], [67], [69], [81]
Sexe	[46], [67], [69], [81]
Revenu	[46]
Niveau d'expérience à vélo	[35], [45], [69]
Voiture à disposition	[2], [81]
Considérations relatives à la sécurité (risques d'accidents)	[69], [76], [77], [79], [80]
Considérations relatives à la sûreté (risques d'agressions)	[81]
Flexibilité des horaires de travail	[81], [83]
Type de vélo (ville, VTT)	[46], [69]
Prix d'achat du vélo	[89], [90]
Temps, distance de parcours	[2], [14], [70], [71], [74], [89], [90]
Caractéristiques de l'environnement/situation	
Météo	[71]
Déneigement	[72]
Nature de l'usage du sol adjacent	[35], [44], [78], [82]
Esthétique le long de la route	[69], [81]
Degré de support politique et public	[72], [83], [88]
Éducation et mise en application des normes relatives aux cyclistes	[69], [83], [88]
Existence d'une offre de transport en commun	[83], [88]
Coût et autres facteurs rendant les autres modes moins attractifs	[46], [81], [88]

2.3 Conclusion partielle et recherches ultérieures à approfondir

Dans la littérature, on trouve un grand nombre d'études permettant de mettre en évidence l'incidence de plusieurs facteurs sur l'usage du vélo :

- L'environnement bâti et la forme urbaine
- Les caractéristiques de l'individu
- Les caractéristiques du déplacement
- L'environnement naturel

Malgré cette abondance d'études, peu d'analyses sont consacrées à la formalisation de ces relations causales au sein d'un modèle, et aucune n'est consacrée directement à la modélisation macroscopique. Par ailleurs, l'impact de certains facteurs n'est pas consistant selon les études.

La littérature relative aux modèles de choix discrets appliqués aux comportements de déplacement est celle qui comporte le plus d'information utile pour le cas présent. De manière générale, ce sont les mêmes facteurs explicatifs qui conditionnent le choix de mode et le choix d'itinéraire. Cependant, la manière de les formaliser (soit au niveau des itinéraires, des zones, des individus) peut également avoir un impact sur leur incidence au sein d'un modèle particulier.

En ce qui concerne spécifiquement le choix d'itinéraire, il y a plusieurs manières de formaliser les attributs relatifs à l'environnement naturel et bâti (présence d'arbres, cours d'eau, pistes cyclables). Les résultats des différentes études ne sont donc pas directement comparables. **Il s'agit d'une divergence dans les spécifications des modèles.**

Par ailleurs, la définition des itinéraires alternatifs entre lesquels l'individu fait son choix a un impact sur les coefficients estimés.

2.4 Facteurs influençant la marche

La littérature relative à la marche à pied est moins développée que celle portant sur le vélo. Une étude qui est importante pour le cas Suisse est [94]. Elle analyse les déterminants spatiaux et sociologiques de la marche urbaine. Les auteurs de cette étude cherchent à répondre à plusieurs questions qui sont également des questions au cœur de la modélisation, à savoir qui sont les marcheurs et en quoi l'urbanisation alentours joue sur la pratique de la marche ? Pour répondre à ces questions, les comportements dans cinq grandes agglomérations Suisses (Zurich, Genève, Bâle, Berne et Lausanne) ont été étudiés. Cette étude a notamment mis en évidence que Genève est la ville où l'on marche le plus en Suisse.

2.5 Enseignements à tirer des modèles existants

En Suisse, la plupart des modèles des cantons, basés essentiellement sur le logiciel VISUM (modèle de Berne ou du Tessin), considèrent également les modes doux seulement dans le choix modal. Certains modèles sont accompagnés par un module d'affectation vélo sous VISUM (Zürich, Solothurn). Ces affectations vélo sont encore expérimentales, sans prise en compte et codification profonde des attributs qui influencent le choix des itinéraires vélos. Le nouveau modèle de Bâle prend en compte un découpage très fin des zones en origine et destination des déplacements non-motorisés (zone de 1 ha en partie centrale). L'affectation vélo intègre aussi l'utilisation du vélo comme mode d'accès vers le train.

En France, la plupart des modèles multimodaux intègre un choix de mode prenant en compte les modes doux. MODEOS, le Modèle multimodal de Métropole Savoie, va plus loin en proposant une affectation des cyclistes sur le réseau. D'autres études concrètes existent et sont de plus en plus menées par les autorités pour comprendre les enjeux des modes doux dans leur planification des déplacements. Ainsi, le SMTC (Agglomération de Grenoble) a étudié l'impact de la modification des vitesses pratiquées en vélo dans son modèle multimodal sur le choix modal des usagers.

La modélisation macroscopique de la marche à pied est un sujet encore peu développé pour lequel il existe peu de modélisation concrète. Un exemple concret concerne toutefois la ville de Londres, Royaume-Uni et plus particulièrement le quartier de Vauxhall Nine Elms Battersea, à travers ce qui est appelé *walking strategy*. Les principaux écueils méthodologiques pour la modélisation macroscopique des piétons ont été mis en évidence par [95], prenant en compte des facteurs comme la distance, les détours, l'attente aux feux, les escaliers, etc. Les recherches à ce sujet tendent à s'intensifier. Des pistes pour la modélisation macroscopique des piétons sont également données par [96] à l'aide d'un modèle basé sur les activités. Cette recherche fournit aussi des indications précises sur l'exploitation d'un *tracking wifi* pour disposer d'une base de données de flux piéton. Ils proposent une méthodologie détaillée pour passer de l'identification Wifi à une transcription en séquences d'activités réalisées par des piétons. La complexité des motifs de déplacement du piéton nécessite de prendre des précautions à prendre dans la modélisation. Ces dernières sont détaillées par [97].

2.6 Conclusions

Cette revue de littérature a permis de mettre en évidence une large gamme de variables explicatives selon les études. On constate qu'il n'y a pas de réel consensus sur les paramètres clés.

En vue de construire un modèle, on peut distinguer :

- les variables qui peuvent être intégrées dans un modèle macroscopique : il s'agit des variables mesurables et pour lesquelles des bases de données exploitables existent :
 - Environnement bâti, forme urbaine et distances : la distance est intégrée par la codification du réseau.
 - Caractéristiques de l'individu et du ménage : il s'agit des variables classiques : âge, sexe, niveau de revenu, équipement en voitures, équipement en vélos ; possession du permis de conduire, etc.
 - Caractéristiques du déplacement : le motif est une variable importante
 - Caractéristiques des infrastructures : aménagements cyclables.
 - Environnement naturel : la pente a une incidence importante
- les variables que l'on ne peut pas intégrer pour des raisons pratiques (indisponibilité de bases de données pour la calibration du modèle) : conditions de stationnement, présence de certains équipements comme les douches à la destination, santé, etc.
- les variables pour lesquelles il faut d'abord des recherches spécifiques : facteurs psychologiques (variables latentes).

3 Les données de base pour l'affectation

De manière schématique, pour élargir un modèle macroscopique aux modes piétons et vélos, les données suivantes sont utilisées :

- Données socio-économiques :
- Données permettant d'établir les matrices OD de référence :
 - enquêtes ménages déplacements (*household travel surveys, Haushaltsbefragung zum Mobilitätsverhalten*) ;
 - enquêtes de circulation routière ou enquêtes cordon (*driver roadside interviews, Straßenbefragungen*) ;
 - enquêtes origine-destination (notamment pour les TC et la prise en compte des étapes piétonnes d'accès aux TC)
 - données de recensement et autres données socioéconomiques zonales
- Données permettant de codifier le réseau et définir les différents attributs du celui-ci nécessaires à l'affectation :
 - Données pour les systèmes de navigation
 - Données SIG avec les caractéristiques du secteur étudié
 - Données avec les tracés des lignes les horaires des lignes TC
- Données permettant de valider les résultats d'affectation
 - Comptages
 - Temps de parcours

Dans ce qui suit, la disponibilité et la forme de ces données dans le contexte suisse est présentée, avec une attention particulière à un focus sur les besoins d'une modèle d'affectation avec une matrice fixée.

3.1 Le microrecensement mobilité et transports (MRMT)

3.1.1 Présentation générale

Le microrecensement mobilité et transports (MRMT) est aujourd'hui la principale source de données permettant d'établir des connaissances sur le comportement de la population suisse en matière de mobilité et transports. Il s'agit d'une enquête appartenant à la catégorie des enquêtes ménages déplacements (ou *household travel surveys*) [98], [99]. Les données récoltées concernent principalement la mobilité quotidienne, les véhicules, les abonnements, les permis, mais également les voyages (avec ou sans nuitées) et les opinions des individus sur la politique des transports [100]. À ces données s'ajoutent des caractéristiques socioéconomiques de la population.

La première enquête sur le comportement de la population en matière de mobilité et transports à l'échelle nationale a été menée en 1974. Elle a depuis été répétée selon un rythme quinquennal. Elle s'appuie sur le mandat du Conseil fédéral, stipulé dans l'Ordonnance concernant l'exécution des relevés statistiques fédéraux (RS 431.012.1). En 1994, un changement majeur intervient, facilitant l'analyse des modes doux : l'inclusion des étapes de déplacement (**Tab. 3**).

3.1.2 Échantillon

La taille de l'échantillon, les méthodes de relevé et les contenus de l'enquête ont évolué depuis 1974, pour tenir compte des progrès dans les méthodes de relevé et de traitement des données, ainsi que des évolutions dans les besoins politiques et scientifiques. La **Tab. 3** synthétise les évolutions en matière de méthodes de collecte des données.

Dans ce qui suit, les principales caractéristiques du MRMT sont données, en empruntant à [100], [101].

Tab. 3 Historique des enquêtes auprès des ménages sur le comportement en matière de transports en Suisse. Source [101]

Année	Échantillon	Moment	Méthode	Point fort
1974	2'114 ménages, toutes les personnes à partir de 6 ans	1 jour de référence, en automne	Combinaison d'enquête écrite et orale	Étude du budget temps et relevé de toutes les activités journalières
1979	2'000 ménages, toutes les personnes à partir de 14 ans	2 jours de référence, en automne		
1984	3'513 ménages, toutes les personnes à partir de 10 ans	1 jour de référence, au printemps	Enquête écrite	Concept des déplacements sur le modèle du relevé allemand KONTIV
1989	20'472 ménages, toutes les personnes à partir de 10 ans			
1994	16'570 ménages, 18'020 personnes à partir de 6 ans	1 jour de référence réparti sur toute l'année	Enquête téléphonique assistée par ordinateur (technique CATI)	Relevé sur la base du concept des étapes
2000	27'918 ménages, 29'407 personnes à partir de 6 ans			
2005	31'950 ménages, 33'390 personnes à partir de 6 ans	1 jour de référence réparti sur toute l'année	Enquête téléphonique assistée par ordinateur (technique CATI)	Concept des étapes inchangé, mais avec géocodage pendant l'interview
2010	59'971 ménages, 62'868 personnes à partir de 6 ans	1 jour de référence réparti sur toute l'année	Enquête téléphonique assistée par ordinateur (technique CATI)	Concept des étapes inchangé, mais avec géocodage et saisie des itinéraires (étapes > 3 km) pendant l'interview

Les personnes enquêtées sont des résidents en Suisse de plus de 6 ans. L'enquêté doit décrire, lors d'un entretien téléphonique, l'ensemble des déplacements effectués lors d'une journée spécifique (en général, la veille) avec leurs origines et destinations, ainsi que les raisons de ces déplacements, les heures de départ et d'arrivée, les modes de transport utilisés, entre autres. Des questions sont également posées sur l'équipement en véhicules et places de stationnement du ménage d'appartenance de la personne interrogée.

La sélection de l'échantillon au niveau fédéral fait appel, en priorité, à des critères géographiques de sorte que :

- les 31 grandes agglomérations comptent au moins 600 enquêtés hors suréchantillonnage ;
- les 19 agglomérations de taille moyenne comptent au moins 250 enquêtés ;
- la répartition globale de l'échantillon par cantons est proportionnelle à leur population.

L'échantillon ainsi établi a ensuite été pondéré pour correspondre aux caractéristiques de la population résidente suisse en termes de :

- Nationalité ;
- Âge ;
- Sexe ;
- État civil.

Suivant la pratique des MRMT précédents, des suréchantillonnages ont également été effectués, sur demande, à l'échelle des cantons, certains d'entre eux n'ayant toutefois pas fait cette démarche lors des recensements antérieurs. Cette situation explique les écarts parfois très importants en termes de nombre de personnes interrogées d'une année à l'autre dans certains cantons (par exemple dans le cas du canton du Jura au sein des cantons romands)

3.1.3 Contenu

Les données du MRMT 2010 sont similaires à celles collectées lors des deux MRMT précédents, réalisés en 2005 et 2000. L'effectif de personnes enquêtées est toutefois significativement plus important en 2010 : quasiment deux fois plus d'individus ont été interrogés au niveau national par rapport aux enquêtes de 2000 et 2005.

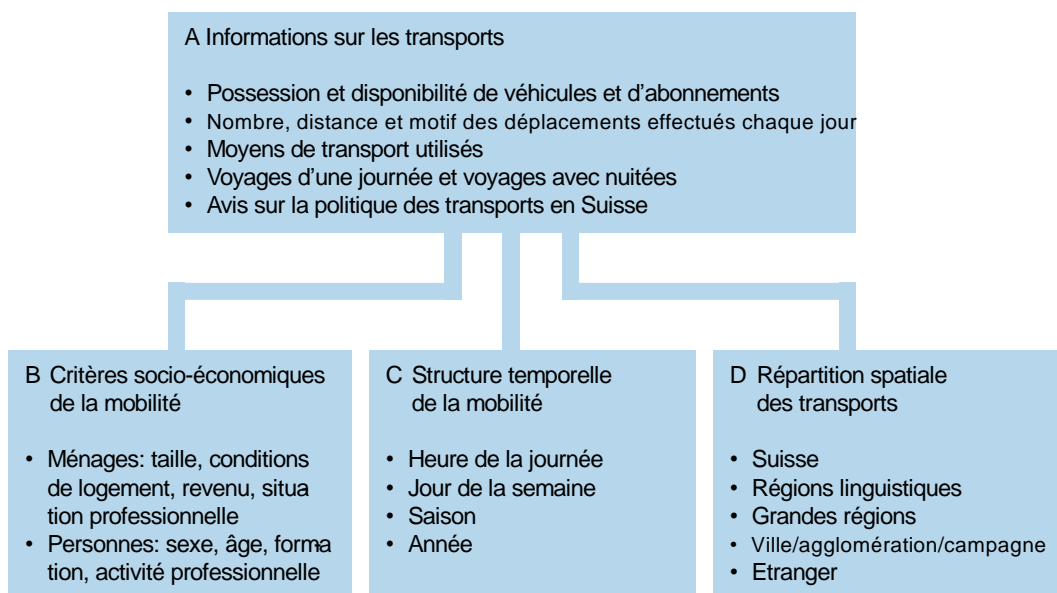


Fig. 2 Représentation schématique du contenu du MRMT. Source [101].

3.1.4 Unités de mesure de la mobilité

Les données MRMT sont organisées de façon à rendre compte de la mobilité quotidienne des personnes interrogées selon trois unités de mesure de la mobilité. Un **déplacement** commence au moment où une personne se met en mouvement (plus de 25 m sur la voie publique) dans un certain but (par exemple, se rendre à son lieu de travail) ou avec une certaine intention (par exemple, se promener). Il se termine lorsque la destination est atteinte, lorsque le motif change ou encore lorsque la personne reste au même endroit pendant une heure au moins.

Chaque déplacement est constitué d'une ou de plusieurs **étapes**. Une étape est une partie d'un déplacement qui est parcourue avec le même moyen de transport (la marche étant considérée comme un moyen de transport). Chaque changement de moyen de transport (même s'il s'agit du même type de moyen) marque le début d'une nouvelle étape. La distance minimale d'une étape est de 25 m.

Une **boucle** concerne une série de déplacements à partir du moment où la personne quitte son domicile jusqu'au moment où elle y retourne.

3.1.5 Spécificités modes doux

En ce qui concerne spécifiquement la modélisation des modes doux, le MRMT intègre les moyens de déplacement suivants : la marche et le vélo.

Dans le MRMT 2010, une des principales évolutions techniques de collecte de données concerne les distances de déplacement. En effet, pendant l'entretien, les personnes enquêtées sont interrogées sur l'itinéraire choisi lors de leurs déplacements (questions sur les lieux de passage intermédiaires). Ceci permet de déterminer *a posteriori* une distance de déplacement avec une grande précision. Cette amélioration n'a cependant été prise en compte que pour les modes motorisés. Les distances associées aux différentes étapes des déplacements modes doux sont encore déterminées selon des estimations fournies par les personnes enquêtées.

Des analyses approfondies ont permis de montrer que la digitalisation des réseaux de transport n'était pas encore assez précise pour les parcours piétons et les trajets à vélo et ne permettait pas d'utiliser un programme de calcul pour ces moyens de transport. Ainsi, souvent, les sentiers pris comme raccourcis ou les petits chemins à travers les terrains et les places ne sont pas représentés dans les réseaux de transports digitalisés.

De plus, dans le cadre de l'actualisation, certaines questions ont été ajoutées ou d'autres approfondies lors des interviews. Désormais, le module 2 du MRMT 2010 (mobilité douce) intègre par exemple des indications permettant de calculer l'indice (IMC) de masse corporelle des personnes interrogées. C'est un complément précieux pour les analyses de la mobilité douce du point de vue de la promotion de la santé.

3.2 Données pour le réseau

3.2.1 Géométrie du réseau

La géométrie des arcs et des nœuds, support de la représentation de l'offre, est rarement définie « à la main ». En général, la construction du graphe se fait par des opérations SIG plus ou moins complexes sur des couches vectorielles (polylignes). Les caractéristiques des infrastructures sont souvent vérifiées à partir de photos aériennes. Il existe plusieurs producteurs de ces données. En Suisse, pour les couches vectorielles, il y a des sources publiques (Swisstopo, base Vector 25), collaboratives (Openstreetmap) et des revendeurs privés (Navteq, TOMTOM /TeleAtlas).

Dans le cas des modes motorisés, les graphes produits par les sociétés privées pour la navigation GPS sont les plus utilisés car ils contiennent le plus grand nombre d'attributs utiles pour la modélisation (pour les tronçons, les nœuds et, notamment, les mouvements tournants).

Pour la modélisation des modes doux, la codification de la géométrie est plus difficile car la production de données pour la navigation spécifique des piétons et des cyclistes est plus rare. L'utilisation des données de navigation automobile peut être faite pour construire une base de travail, qui doit ensuite être complétée selon les objectifs opérationnels du modèle (qui conditionneront les choix de granulométrie, voir chapitre 4).

La base de données Openstreetmap introduit beaucoup de tronçons spécifiques à la mobilité des piétons et cyclistes, cependant son utilisation est confrontée habituellement à l'impossibilité d'évaluer son homogénéité.

3.2.2 Aménagements piétons ou cyclables

A la connaissance des auteurs, les données disponibles sous un format facilement exploitable pour la modélisation sont plutôt lacunaires et/ou faiblement intégrées avec les autres données de réseau.

À titre d'exemple, à Genève, le SITG propose deux couches vectorielles (source <http://ge.ch/sitg/>) :

- `gmo_mobilite_douce` : Le graphe de la mobilité est un regroupement des graphes qui donnent la forme géométrique des tronçons, et des différentes jonctions (carrefours, arrêts, gares, débarcadères) qui sont les points de connexions, de transferts entre les différents graphes. Parmi les graphes proposés un concerne les voies dédiées aux modes doux
- `otc_amenag_2roues` : La couche des aménagements cyclables recense tous les éléments construits ou matérialisés délimitant l'espace réservé aux cyclistes sur la voie publique. Elle est constituée des : pistes cyclables (séparées physiquement de la chaussée), bandes cyclables (marquages sur la chaussée), sas cyclistes aux feux rouges, contresens cyclables, etc. La plupart des modifications de ces aménagements font l'objet d'une approbation d'un plan de marquage, qui sert également à la mise à jour des données. La ville de Genève fournit certains aménagements spécifiques, échappant à cette règle.

Ces données présentent quelques limites pour une modélisation des modes doux :

- Le graphe de la mobilité douce ne comprend qu'un nombre très limité de voies piétonnes ou cyclables dans des parcs, ainsi que quelques passages couverts au centre-ville.
- Le codage par tracés polygones distincts du graphe de la mobilité complique considérablement une prise en compte automatisée de ces données dans la constitution de graphes de modélisation ou de calculs d'itinéraire.

Ces limites soulignent que des efforts supplémentaires des administrations suisses seraient utiles sur ce point.

3.2.3 Calcul des pentes : Modèles numériques de terrain, de surface

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation 3D de la surface d'un terrain, créée à partir des données d'altitude du terrain. Le MNT ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels les plantes et les bâtiments. Un Modèle Numérique de surface (MNS) est une représentation des élévations sur un terrain comprenant les plantes et les bâtiments.

En Suisse, la production, par chaque canton, d'un modèle numérique de terrain fait partie des outils requis par la politique publique en matière de représentation territoriale, définie par l'Office fédéral de topographie – Swisstopo (art.6 al.2 OMO et Art.22 OTEMO). Les données sont régulièrement mises à jour. Environ tous les quatre ans, les cantons procèdent à un relevé topographique Laser appelé « LiDAR » (*Light Detection And Ranging*) par voie aérienne. Le dernier relevé de ce type effectué sur le canton de Genève date de 2009.

Il s'agit de données d'une extrême précision. Le MNT 2013 a une précision altimétrique de 15 cm environ sur surface dure et une précision planimétrique de 1 pixel soit 50 cm.

3.3 Données pour la validation de l'affectation

3.3.1 Comptages

Le rapport de recherche SVI 2001/503 [184] fournit des indications concrètes pour la réalisation de comptages et d'enquêtes pour les piétons et cyclistes mais les résultats publiés sont peu nombreux.

En Suisse, plusieurs agglomérations réalisent des comptages vélo pour suivre l'évolution de ce mode. Cependant, on ne dispose pas d'une densité comparable à celle des voitures. En général, les recueils sont faits à des lieux de passage majeurs ou sur des lignes écrans (c'est le cas à Genève et à Lausanne). Il y a des comptages faits à certaines périodes de la journée, et quelques comptages 24h permettant de faire le redressement.

Pour les piétons, les comptages ont souvent été réalisés au cas par cas (souvent pour des grands projets d'aménagement urbain). Leur réalisation systématique dans le cadre d'un suivi de la mobilité (relevés réguliers) commence à peine à se développer. Il existe quelques expériences comme celle de Lucerne, qui a effectué des comptages en combinant diverses méthodologies : comptages manuels (compteurs mécaniques), infrarouge passif et observations. Les compteurs ont été placés pour une durée d'une semaine ou plus selon les cas, ce qui permet de différencier les flux moyens des jours de semaine de ceux des week-ends. Les comptages ont permis de confirmer que les heures de midi et en début de soirée, les samedis, et en particulier les samedis à midi, sont les périodes les plus fréquentées. La ville de St. Gall a par exemple compté un trafic journalier moyen (TJM) de 11'000 personnes sur la Vadianstrasse (zone piétonne) en novembre 2011. A Zurich, un TJM d 17'000 personnes a été recensé sur le Quaibrücke en avril de la même année (source Ville de Zurich), et de 38'000 sur le Bahnhofbrücke en mars. Les pics de fréquentation y atteignent respectivement 3'000 et 5'000 personnes / h (source Daniel Sauter, Urban Mobility Research). Les comptages piétons effectués sur le Seebrücke à Lucerne aboutissent à des valeurs du même ordre de grandeur que ceux des ponts très fréquentés de Zurich.

Citec a aussi eu l'occasion de procéder à des comptages piétons sur des grands périmètres, par exemple en 2006 et 2008 pour observer le suivi des flux piétonniers dans les rues commerçantes de Marseille (84 sections de comptage) ou encore pour le projet de développement du quartier de la Part-Dieu à Lyon (40 sections). Ces enquêtes ont notamment permis de constater :

- l'existence de courbes journalières très différentes selon les configurations
- la forte variabilité des flux lors de comptages à la minute
- le champ de validité de comptages courts (5, 7.5, 10, 15 minutes) lorsqu'ils sont réalisés plusieurs fois dans la journée
- une relativement faible variation des flux piétons entre les saisons (comptages février ou juin)
- des valeurs maximales observées soit le matin (zones pendulaires ou accès aux transports en commun), soit à midi (forte proportion de cafés-restaurants), soit le soir (combinaison de commerces et de transports publics)

3.3.2 Temps de parcours

Les techniques de collecte de données usuellement utilisées pour les TIM [102] ne sont pas adaptées aux modes doux. Les principales techniques utilisées reposent sur des systèmes automatiques (système GPS ou système de reconnaissance des plaques d'immatriculation, boucles de détection sur les routes, entre autres). Ces techniques permettent de connaître des temps de parcours sur une OD pour un ensemble représentatif de véhicules. Et ces données sont distribuées commercialement.

Pour les vélos et les piétons, des difficultés rendent l'application d'une démarche similaire plus compliquée :

- Les cyclistes et les piétons ne sont pas toujours équipés de systèmes GPS autres que leurs téléphones.
- La condition physique, le type de vélo, et d'autres caractéristiques individuelles et environnementales donnent une plus grande variabilité aux temps de parcours pour les vélos

3.4 Comptages spécifiques sur la ville de Genève

Dans le cadre du mandat de recherche, un recueil spécifique de données de comptage a été mené. L'objectif de ce recueil est double. Il permet de se procurer les données nécessaires au calage des réseaux pour les affectations vélo et marche à pied. Mais il permet également d'identifier les difficultés spécifiques liées à ce type de recueil, répandu pour les TIM, mais beaucoup moins pour les modes doux.

3.4.1 Comment compter les modes doux ? Éléments de contexte

À Genève, malgré des comptages cyclistes réguliers depuis plus de 20 ans, trop peu d'informations sont disponibles pour un calibrage du modèle vélo (**Fig. 3**) et pratiquement aucune n'est disponible pour les piétons. Le groupement de recherche a donc effectué, hors mandat de recherche, une série d'essais pour définir une méthode de comptages simple et adaptée aux besoins. L'objectif consistait à disposer à moindre coût d'un nombre important de points de comptages. Ces comptages devaient distinguer les sens de circulation aussi bien pour les piétons que pour les cyclistes.

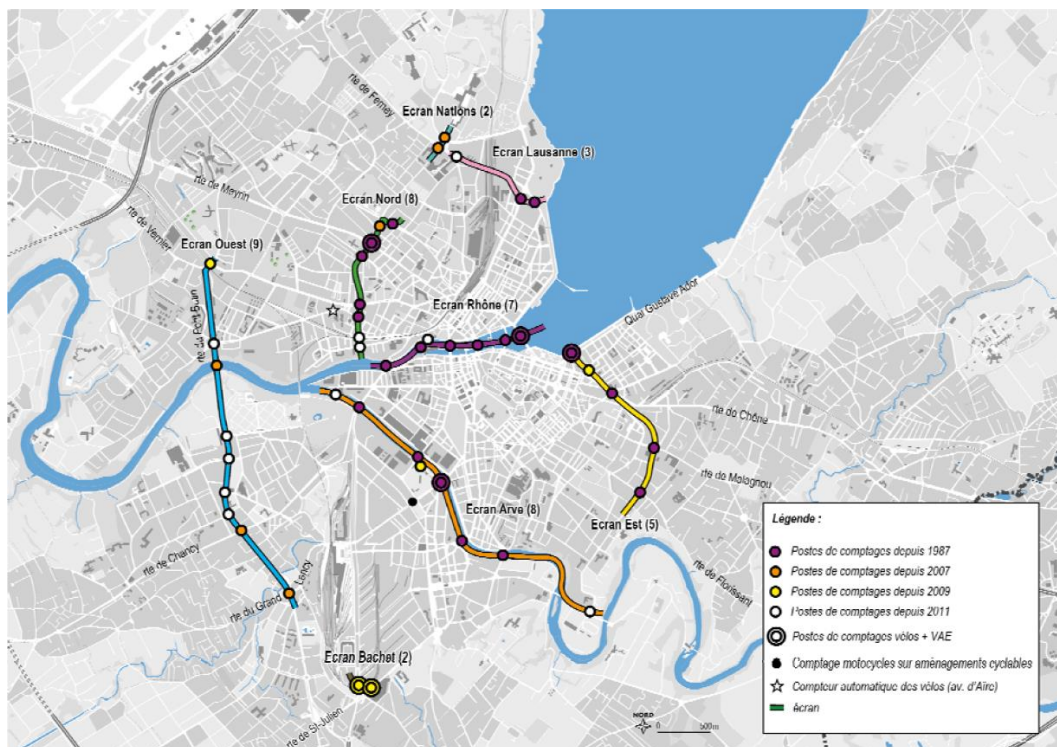


Fig. 3 Localisation des comptages vélo de la ville de Genève (source : DGM, Ville de Genève. Les comptages Vélos 2011)

Très vite il est apparu évident qu'il fallait faire des comptages en section plutôt que des comptages directionnels aux carrefours. Le risque d'erreur est moindre sur des comptages en section qui sont plus simples à réaliser. L'identification des sections est facile. La comparaison avec les valeurs sur les arcs du modèle est aussi plus facile.

Après consultation des outils de mesures et du savoir-faire en la matière, notamment les travaux de Daniel Sauter, www.mobilservice.ch/fr/accueil/cas-pratiques/comptages-pietons-1310.html, [103] et le rapport de recherche SVI 2001/503 [184], il est apparu que :

- Des comptages automatiques du type éco-compteur ne convenaient pas en raison de l'impossibilité à distinguer les flux piétons des flux cyclistes sur les sections jugées représentatives ;
- Des comptages automatiques vidéo ont été retenus (caméras MioVision, **Fig. 4**) car elles permettaient de distinguer les flux piétons des flux cyclistes pour disposer de courbes journalières types et pour disposer d'un point de référence pour redresser les comptages sur l'ensemble de la période comptée ;
- Des comptages manuels avec saisie sur tablette tactile ont été jugés la méthode la plus souple à configurer pour les besoins de l'étude. Les compteurs disposaient d'un masque de saisie Excel et de macros de traitement (**Fig. 5**). Chaque observation était contée par un touché sur la case Excel correspondante (par exemple cycliste dans le sens x). Cette méthode de relevé permet de disposer de statistiques de flux à la seconde et de disposer d'une moyenne horaire flottante au fur et à mesure de la saisie. Par essais et tâtonnement, cette méthode a permis de constater que des comptages de minimum 15 minutes mais si possible 20 minutes permettent d'obtenir un flux horaire représentatif. Avec trois comptages par section dans la journée et application d'un redressement selon des courbes journalières relevées par caméra il était possible d'obtenir une valeur de comptage journalier représentative. Nos expériences se démarquent des enseignements du mandat de recherche SVI 2001/503 [184] qui arrivait à la conclusion que la marge d'erreur de comptages de 15 min était de plus ou moins 30% et de plus ou moins 20% avec des comptages de 30 min.



Fig. 4 Caméras MioVision

Meteo:	beau, sans impact mobil.							
Evénement:	aucun							
Lieu (rue, n°):	91190 ; avenue de France (pont au dessus							
Début du comptage:	18:28:40	18:44:47						
	Fin du comptage:							
ID_campagne:	91190 ; avenue de France (pont au d							
paquis	< Directions >	nations						
Annuler le dernier comptage								
<	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Piétons trottoir impairs</td></tr> <tr><td>39</td><td>13</td></tr> <tr><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> </table>	Piétons trottoir impairs		39	13	0.0	0.0	>
Piétons trottoir impairs								
39	13							
0.0	0.0							
<	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Vélo</td></tr> <tr><td>27</td><td>4</td></tr> <tr><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> </table>	Vélo		27	4	0.0	0.0	>
Vélo								
27	4							
0.0	0.0							
<	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Piétons trottoir pairs</td></tr> <tr><td>31</td><td>18</td></tr> <tr><td>0.0</td><td>0.0</td></tr> </table>	Piétons trottoir pairs		31	18	0.0	0.0	>
Piétons trottoir pairs								
31	18							
0.0	0.0							




Fig. 5 Interface utilisée pour les comptages avec des tablettes (écran de saisie)

Les comptages ont considéré aussi bien les cyclistes sur les aménagements cyclables que ceux dans le flux de trafic ou sur les trottoirs. Les cyclistes à contre-sens ont été comptés en fonction du sens et non de la position dans la rue.

De même pour les piétons, ils ont été comptés distinctement sur chaque trottoir même si l'information n'a pour l'instant pas été utilisée à ce niveau de détail.

3.4.2 Organisation

La campagne de comptages a été organisée sur 13 jours en octobre 2015 : Jeudi 08, mardi 13, mercredi 14, jeudi 15, vendredi 16, mardi 20, jeudi 22, vendredi 23, samedi 24, mercredi 28, jeudi 29, vendredi 30 et samedi 31.

Sur cette période, il a fallu tenir compte de certaines contraintes, notamment les congés scolaires entre le samedi 17 et le dimanche 25. Durant cette période, le nombre de sections comptées était limité et certaines sections les plus importantes ont été recomptées un jour « normal » afin d'identifier les écarts.

3.4.3 Échelle de l'opération :

- Environ 100 points de comptage manuels à l'intérieur du périmètre : 3 comptages de minimum 15, si possible 20 minutes, par point de comptage (matin, midi et soir).
- 5 caméras pour des comptages 24h : comptages réalisés le 8 et le 20 octobre dont le positionnement a été choisi pour des situations jugées représentatives des profils de personnes et destinées à établir des courbes de variation journalière (Cropettes : représentative d'accès gare, Beaulieu : représentatif parc, Carteret : représentatif quartier d'habitat, Chandieu : représentatif accès école primaire, Servette : représentatif rue commerçante de quartier, cf. **Fig. 8**).
- 1 caméra posée sur 16 jours et relevant les données 1h par jour (avant, pendant et après les vacances) dans le but d'harmoniser les comptages réalisés sur des jours différents.
- Les 100 + 5 + 1 points de comptages ont été fait pour une longueur totale de réseau cycliste de 100 km et de 150 km de réseau piéton dans le périmètre test (en prenant en compte les sens de circulation).

3.4.4 Extrapolation des comptages à la journée

Les tests statistiques ont montré que les comptages de 15 à 20 minutes étaient suffisamment représentatifs, avec la méthode de relevé utilisée, pour être étendus à des valeurs horaires par règle de 3.

En comparant la distribution des 3 heures de relevé aux distributions journalières, il a été possible d'associer un coefficient de passage des 3 heures de relevé à la journée. Le comptage 16 jours a permis de faire le redressement des comptages pendant les périodes de vacances.

Les valeurs ainsi obtenues ont été extrapolées pour obtenir une représentation TJOM des flux de cyclistes (**Fig. 6**)

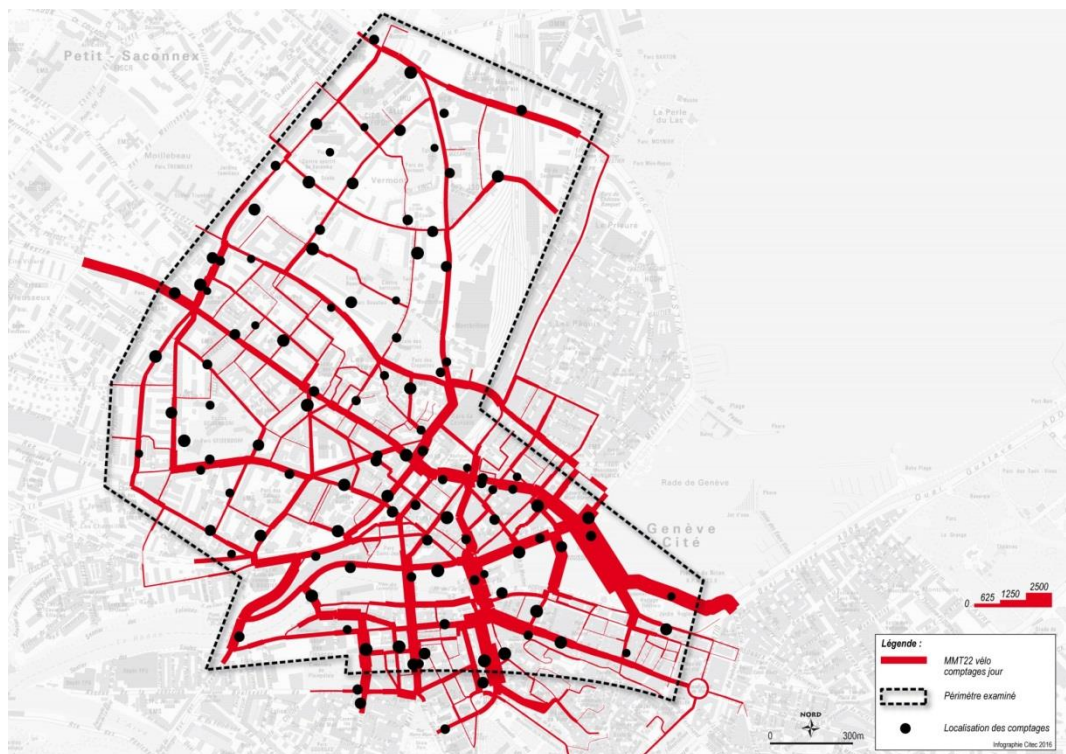


Fig. 6 Plan de charges (TJOM) vélo du périmètre d'étude obtenu par extrapolation des données de comptages

3.5 Enseignements de la collecte de données pour le test genevois

Les difficultés méthodologiques rencontrées lors des comptages piétons justifient de **lancer un mandat de recherche pour améliorer la connaissance des flux piétons**. Nous proposons d'intégrer les thèmes suivants à une future recherche :

3.5.1 Comment et où identifier des sections de comptage représentatives ?

Sur une rue principale commerçante (Genève, rue de la Servette) nous avons effectué 8 sections de comptages piétons sur un tronçon de 350 m afin de vérifier dans quelle proportion le nombre de personnes comptées varie en fonction de l'emplacement précis du comptage. Il est en effet difficile de juger a priori où compter très précisément. La proximité d'un arrêt de bus ou de tram, d'un commerce alimentaire (Migros, Coop ou autre), d'un bancomat influencent bien sûr beaucoup les flux à l'échelle très locale mais faut-il se tenir à 20 m, à 50 m, ou plus de tels générateurs de flux ? Des observations et des statistiques suffisamment nombreuses permettront de clarifier ce point et d'en tirer des règles générales, applicables à des villes de taille diverse.

3.5.2 Disposer de courbes journalières en fonction du site et du public

Le type de piétons rencontrés et les horaires de présences peuvent varier sensiblement selon les sites : proximité d'école, commerces de proximités, commerces d'agglomération, activités, logements, etc. Comme pour le trafic routier, pour lequel nous disposons de courbes typiques (trafic pendulaire, route touristique, trafic d'agglomération, etc.) il est utile de pouvoir identifier et caractériser les types de courbes journalières des piétons, en particulier pour la reconstitution des flux à partir de comptages courts. Les comptages et observations effectués pour le compte de ce mandat de recherche laissent penser qu'il existe des courbes journalières typiques pour :

- Les abords d'écoles
- Les rues commerçantes (de quartier ou d'agglomération)
- Les parcs et espaces de loisirs
- Les quartiers tertiaires
- Les quartiers industriels
- Les accès aux gares

De telles courbes sont nécessaires aussi bien pour redresser des comptages ponctuels que pour déterminer les moments caractéristiques dans la journée selon les sites (voir, par exemple, **Fig. 7**).

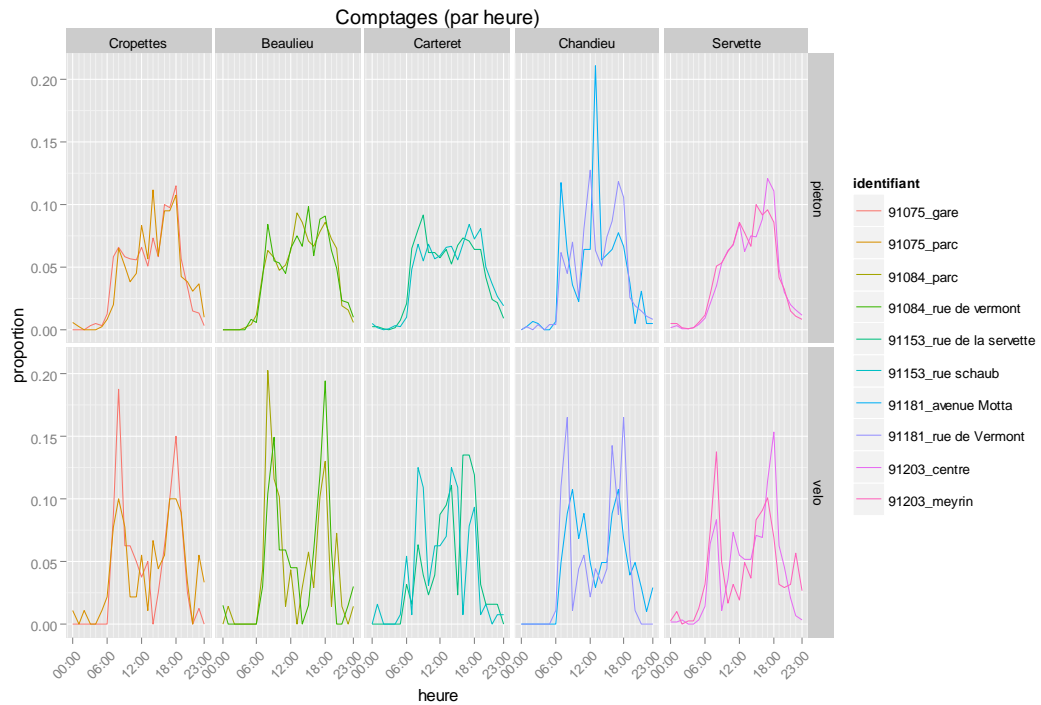


Fig. 7 Exemple de courbe de variations journalières types selon les profils de personnes collectées pour les besoins de la recherche dans le quartier de la Servette

3.5.3 Identifier quelle est la plage de validité de comptages manuels courts

Afin de limiter les coûts de collecte de donnée nous avons opté pour des comptages manuels en section par périodes de 15 à 20 minutes à trois moments de la journée. Ce choix est issu de tests et d'expérimentations sur diverses rues genevoises. Pour les besoins de planification et d'exploitation il est important de continuer à accumuler des expériences sur la collecte des données. En particulier de déterminer quelles sont les plages de validité des outils et méthodes et donc leur champ d'application. Par exemple, est-ce que statistiquement des comptages de 15 minutes sont suffisants pour tous types d'environnement moyennant un redressement à partir d'un TJM piéton. Nos expériences en la matière diffèrent des résultats obtenus avec le mandat de recherche SVI 2001/503 [184]. Il est probable que l'utilisation d'outil permettant un relevé à la seconde et l'affichage d'une moyenne horaire flottante au fur et à mesure du comptage améliore la fiabilité du relevé et donc l'appréciation par l'opérateur de réaliser un comptage plus longuement si nécessaire.

3.5.4 Catégoriser les personnes comptées

Selon les sites, les catégories de personnes sont très variables. La présence de promeneurs de chiens, de jogger, d'enfants ou de jeunes qui jouent, de personne avec une poussette en « promenade » peuvent influencer de 10 à 25% les flux piétons à considérer. Sous l'angle des flux piétons, certaines de ces activités sont-elles à considérer comme des activités (loisirs, promenade) ou comme des déplacements ? Une définition plus claire et cohérente avec les autres données statistique usuelle (MRMT par exemple) est souhaitable.

3.5.5 Identifier l'impact des saisons et de la météo

Redresser des comptages pour obtenir des valeurs annuelles est assez facile à faire pour le trafic en général et les transports publics. Dans le cas des piétons et, dans une moindre mesure, pour les cyclistes nous manquons de repères statistiques pour calibrer des comptages dans une perspective annuelle moyenne. L'effet de la météo est évident mais ici aussi les séries statistiques sont trop faibles pour établir une relation quantitative.

3.6 Perspectives liées aux progrès technologiques

Dans les années à venir, des nouvelles méthodes de collecte de données vont permettre de fiabiliser la modélisation des flux piétonniers et cyclistes. En vue d'une meilleure prise en compte des flux cyclistes et piétons dans le futur, autant dans la modélisation que dans d'autres tâches de planification, il est souhaitable que les collectivités publiques mettent à profit les nouvelles possibilités technologiques pour fournir des données plus détaillées et plus étendues dans le temps. Ci-dessous, nous procédons à une revue succincte des solutions technologiques les plus prometteuses, tout en précisant leurs limites respectives. Pour maximiser l'efficacité des moyens investis dans ce domaine, il convient sans doute d'établir une stratégie générale de collecte de données « modes doux ».

3.6.1 Collecte de traces de parcours cyclistes

Sur le continent américain, l'enregistrement de données détaillées de parcours cyclistes à l'aide de smartphones a été expérimenté par de nombreuses villes et les projets les plus récents ont démontré une montée en puissance de cette méthode d'enquête.

C'est l'Autorité de planification des transports du Comté de San Francisco (SFCTA) qui a réalisé la première expérimentation réussie de cette nouvelle méthode de collecte de données. Dès 2009, elle a développé le système « *CycleTracks* », qui comprend d'une part une application dédiée que les cyclistes intéressés peuvent télécharger gratuitement sur leur smartphone ainsi qu'un serveur informatique qui centralise les données de parcours des participants. Le système a été conçu dans une logique Open Source et il peut donc facilement être implémenté ailleurs. A ce jour, une vingtaine de villes nord-américaines ont proposé à leurs citoyens d'utiliser *CycleTracks* ou une application dérivée [104]

A San Francisco, la première expérimentation du système lancée en novembre 2009 a permis de récolter en cinq mois environ 3'000 traces de parcours exploitables, fournies par 366 cyclistes [62]. Rendue publique en août 2013 par la Ville de Montréal, l'application « Mon Résovélo » a permis à ce jour de collecter plus de 32'000 trajets. Depuis mai 2014, dans le cadre d'une démarche participative visant à consulter les citoyens pour la conception d'un plan décennal de développement du réseau cyclable, la ville de Toronto est même parvenue à réunir presque 100'000 traces de parcours de la part de plus de 4'000 cyclistes.

Des premières expériences de grande envergure de collecte de traces de parcours cyclistes ont également été réalisées en Europe. L'opération la plus remarquable à ce jour a eu lieu aux Pays-Bas, à l'occasion de la Semaine de la Mobilité 2015 : la campagne « Fietstelweek » a permis de recueillir en une semaine un peu plus de 375'000 trajets effectués par environ 55'000 participants. Pour cette opération, les organisateurs avaient mis à disposition une application gratuite pour iPhone et Android particulièrement simple d'utilisation, puisqu'elle enregistrait automatiquement les déplacements dès que des mouvements étaient détectés (c'est-à-dire sans que l'utilisateur n'ait besoin d'activer ou de stopper l'enregistrement de parcours). À la fin de la semaine de comptage, l'application cessait de fonctionner.

Enfin, il existe aussi la possibilité d'acheter des traces de parcours cyclistes auprès de STRAVA, le réseau social dédié aux athlètes. Grâce à son application conçue pour le suivi d'activités sportives, STRAVA collecte un grand nombre de traces de parcours et il

vend désormais ses données aux collectivités publiques, arguant de leur valeur pour informer les processus de planification d'aménagements cyclables. En effet, étant donné que l'application STRAVA demande aux utilisateurs de qualifier les parcours enregistrés, en précisant par exemple s'il s'agit d'un trajet pour aller au travail, une partie des traces de parcours peut en théorie être valorisée dans ce sens.

Typiquement, les traces de parcours comprennent des points GPS enregistrés chaque seconde. Ce niveau de détail ouvre le champ à de nombreuses possibilités d'analyse : diagrammes de flux sur l'ensemble du réseau viaire, durées d'attente aux carrefours, vitesses moyennes de certains types de cyclistes, corrélations avec les localisations d'accidents, etc. (Voir par exemple : [105], [106]).

Jusqu'ici, le traitement et l'analyse des données ont souvent été pris en charge par des instituts de recherche spécialisés, car le nettoyage des données brutes (élimination des données erronées, vérifications de plausibilité des traces, affectation sur le réseau viaire, etc.) ainsi que la complexité des algorithmes d'analyse exige des compétences avancées de *data mining*. On peut néanmoins s'attendre à ce que des sociétés spécialisées proposent bientôt des outils standardisés de traitement des données et permettront ainsi une valorisation plus aisée de grandes quantités de traces de parcours.

Il faut souligner ici que, à court-moyen terme, les traces de parcours cyclistes recueillies à l'aide de smartphones ne pourront pas se substituer aux données de comptage, **car la représentativité des traces de parcours collectées demeure sujette à caution**. Il existe notamment des biais d'autosélection de l'échantillon, puisque les cyclistes participent à la collecte des données sur une base volontaire. Par exemple, une étude réalisée à Atlanta a comparé les données de STRAVA et celles collectées à l'aide de l'application CycleAtlanta, une version dérivée de CycleTracks, et l'analyse a mis en évidence des biais d'autosélection assez marqués pour les données STRAVA (les utilisateurs de STRAVA tendaient à être des cyclistes orientés « performance » même pour les trajets qualifiés de « pendulaires », avec notamment des distances parcourues nettement plus longues) [107]. Afin d'optimiser la représentativité des traces de parcours collectées, il est essentiel de déployer des efforts de recrutement de participants par de nombreux canaux de publicité.

D'autres problèmes de représentativité doivent également être maîtrisés, comme notamment celui des combinaisons origine-destination couvertes ou encore le fait que certains participants enregistrent nettement plus de traces que d'autres. Pendant un certain temps, il conviendra donc de multiplier des opérations combinant des comptages *in situ* avec une collecte de données par smartphone, afin de maîtriser les risques de biais statistiques et de parfaire les méthodes de redressement de données.

3.6.2 Autres technologies de comptage automatisé

En réponse à un intérêt croissant de la part des collectivités publiques, de nombreuses solutions technologiques de comptage automatisé du trafic non-motorisé sont apparues sur le marché ou sont en cours de perfectionnement dans le cadre de recherches expérimentales. Nous nous contentons ici de synthétiser les principaux aspects à prendre en considération et, pour plus de détails, nous renvoyons le lecteur à deux études récentes qui ont analysé cette thématique de manière approfondie [108], [109].

D'une manière générale, les technologies de comptage automatisé fournissent des données continues sur de longues durées, qui s'avèrent largement complémentaires à celles de comptages manuels (dont l'avantage réside plutôt dans la densité des points d'observation).

La plupart des solutions technologiques sont conçues pour effectuer des comptages par section. Néanmoins, l'automatisation est depuis peu également envisageable pour des comptages d'intersection, qui visent à déterminer le nombre de piétons qui traversent les

différentes voies du croisement ainsi que les directions de circulation des cyclistes (tourne-à-gauche, tout droit ou tourne-à-droite). Pour ce type de comptages complexes, l'analyse automatisée de relevés vidéos grâce à des algorithmes de reconnaissance de piétons et/ou de cyclistes donne des résultats de plus en plus fiables [110], [111].

Pour le comptage automatisé de cyclistes et/ou de piétons par section, de nombreuses solutions technologiques peuvent être appliquées (liste non exhaustive) :

- *Détection infrarouge passive* : un capteur adéquatement positionné détecte la chaleur des piétons et des cyclistes qui passent devant lui, permettant ainsi un comptage non différencié du nombre de personnes circulant sur la voie observée.
- *Détection infrarouge active* : le comptage s'appuie sur la mise en place d'une barrière photoélectrique, avec des éléments positionnés des deux côtés de la voie observée (émetteur et récepteur, éventuellement avec un réflecteur).
- *Détection par ondes radio* : ce procédé fonctionne de manière similaire à une barrière photoélectrique, mais en utilisant des ondes radios. Un avantage de cette méthode réside dans la possibilité de distinguer les piétons des cyclistes, moyennant utilisation d'ondes radio de différentes fréquences.
- *Radar ultrason* : un émetteur-récepteur d'impulsions ultrasons est capable de mesurer la distance ainsi que la vitesse des personnes qui passent devant lui. Ces données peuvent être utilisées pour effectuer des comptages.
- *Tubes pneumatiques* : ce procédé usuel pour le comptage de véhicules motorisés est aussi applicable pour des comptages sur des voies cyclables, idéalement avec des systèmes optimisés pour le confort des cyclistes (tubes plus fins).
- *Boucles inductives* : ce procédé a lui également été optimisé pour le comptage de cyclistes, certains appareils s'avérant capables de distinguer différents types de vélos en analysant la signature magnétique des roues de vélo. Vu qu'elle implique des travaux de génie civil, cette technologie est notamment appropriée pour mettre en place des postes de comptage permanents (encore qu'il existe aussi des dispositifs pour des installations temporaires de longue durée).

Il est à noter que ces différentes technologies sont toutes sujettes à des erreurs de comptage, principalement dues à la difficulté de distinguer plusieurs personnes qui passent en même temps devant le détecteur, soit parce qu'elles se déplacent en groupe ou parce qu'elles se croisent au même instant. Ce phénomène d'occlusion engendre un sous-comptage qui devient de plus en plus marquant en période de pointe et il s'avère donc nécessaire d'appliquer des fonctions de correction des comptages [112].

En combinant plusieurs types de détecteurs, il est possible d'effectuer des comptages de section avec distinction entre piétons et cyclistes, avec identification du sens de circulation.

3.6.3 Suivi de piétons et cyclistes par WIFI ou Bluetooth

Divers appareils électroniques, dont en particulier les smartphones, signalent systématiquement leur présence auprès des antennes WIFI ou Bluetooth installées dans leur périmètre de réception. Étant donné que ces antennes ont des portées relativement réduites et que, par ailleurs, les messages de notification incluent un identifiant unique à chaque appareil (adresse MAC), les antennes des réseaux sans fil peuvent être utilisées pour estimer le nombre de personnes qui transitent dans leurs alentours.

Le principal intérêt de cette méthode de collecte de données réside dans son faible coût de mise en place, puisque qu'elle utilise généralement des infrastructures de communication existantes. Cependant, pour des applications de comptage automatisé, les limitations inhérentes à cette méthode s'avèrent très problématiques, car plusieurs facteurs d'incertitude doivent être pris en compte :

- Quelle part des personnes en transit possèdent un appareil avec connexion WIFI / Bluetooth ?
- Quelle part de ces utilisateurs ont activé l'un ou l'autre de ces modes de communication ?
- Enfin, combien y a-t-il d'utilisateurs qui possèdent plusieurs appareils connectés (par ex. smartphone plus oreillette, smartphone plus tablette, etc.) et qui sont susceptibles de générer des comptages multiples ?

En définitive, cette méthode de détection s'avère donc surtout utile pour collecter des traces de parcours approximatives et pour estimer les vitesses de déplacement des personnes transitant dans une zone équipée d'un réseau dense d'antennes WIFI / Bluetooth. Moyennant des efforts de modélisation, ces données peuvent notamment être utilisées pour mieux comprendre les flux de personnes dans des grandes infrastructures piétonnes telles qu'un campus universitaire, une gare ou encore un centre commercial [113].

4 « Granulométrie » du modèle, spécificités de la modélisation piéton-vélo

Dans cette section, la notion de « granulométrie » fait référence au niveau de détail retenu pour la représentation de l'espace et des infrastructures de transport dans le modèle.

Ce chapitre pose les bases de la spécificité de la modélisation piéton/vélo qui seront traitées plus en détail, thème par thème, dans les chapitres 5 à 12.

4.1 Problématique

La première étape dans la construction d'un modèle concerne le choix du zonage et du niveau de détail de représentation des infrastructures de transport. Ces choix dépendent des objectifs pour lesquels le modèle est conçu. Dans le cas présent, l'objectif est de prendre en compte les caractéristiques des itinéraires « modes doux » (marche à pied et vélo) dans le cadre d'une modélisation multimodale des déplacements.

Les déplacements modes doux présentent les particularités suivantes : ils sont généralement plus courts que ceux en voiture ou en transports en commun, en particulier les déplacements à pied). La part modale des déplacements à vélo est relativement faible.

Après examen, six thèmes (**Fig. 8**) sont à considérer avec des précautions particulières pour maîtriser la modélisation macroscopiques piéton/vélo.

À chaque fois, le niveau de finesse du zonage et du réseau nécessaires à leur modélisation sont déterminants. Pour bien comprendre ces interactions, il faut rappeler ci-après quelques notions de base et leur transcription dans un modèle

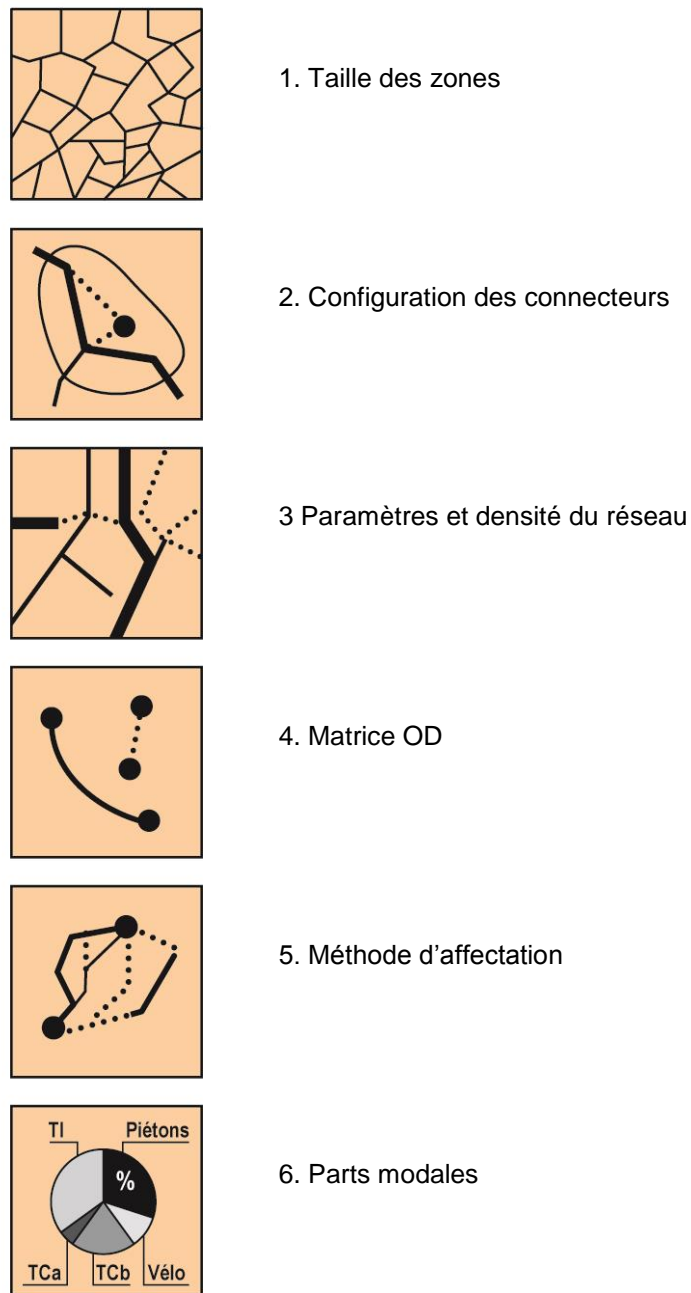


Fig. 8 Représentation schématique des questions à résoudre dans la définition de la « granulométrie » du modèle.

4.2 Centroïdes de Zones : lieux d'origine et de destination des déplacements

La modélisation macroscopique repose sur une caractérisation discrète de l'espace. Le territoire étudié est découpé en zones. Chaque zone est dotée d'un centroïde, qui concentre l'ensemble de ses caractéristiques (**Fig. 9**).

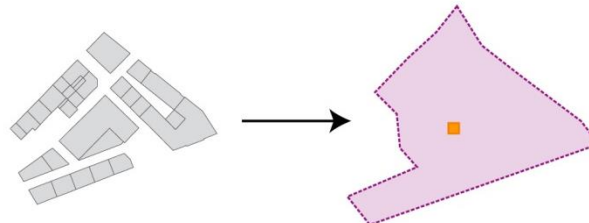


Fig. 9 Localisations concentrées au niveau du centroïde de zone

Le centroïde correspond ainsi à une simplification de l'hétérogénéité spatiale de la zone. Il est le point où sont concentrés les lieux d'habitations et, plus généralement, l'ensemble des lieux de la zone où se déroulent les activités des individus. Les centroïdes de zone sont donc les lieux d'origine et de destination de tous les déplacements modélisés. L'information sur les points de départ et d'arrivée des déplacements est seulement disponible au niveau de résolution du zonage.

Les déplacements entre les centroïdes de zone sont réalisés sur un réseau de transport, dont les infrastructures sont représentées sous forme de graphe, avec des arcs, aussi appelés tronçons, et des nœuds. Les connecteurs de centroïde sont des arcs spécifiques, directement reliés aux centroïdes. Leur fonction n'est pas de représenter des infrastructures, mais plutôt des conditions moyennes d'accès aux infrastructures de transport de la zone.

Dans l'objectif d'illustrer les enjeux des choix du niveau de détail du découpage spatial et de la représentation de la géométrie des infrastructures, on prend appui sur un exemple.

La **Fig. 10** représente un itinéraire « réel » entre un lieu d'origine connu O et un lieu de destination connu D. Il s'agit de lieux connus en ce que l'on dispose des coordonnées (de porte-à-porte) sur un plan.

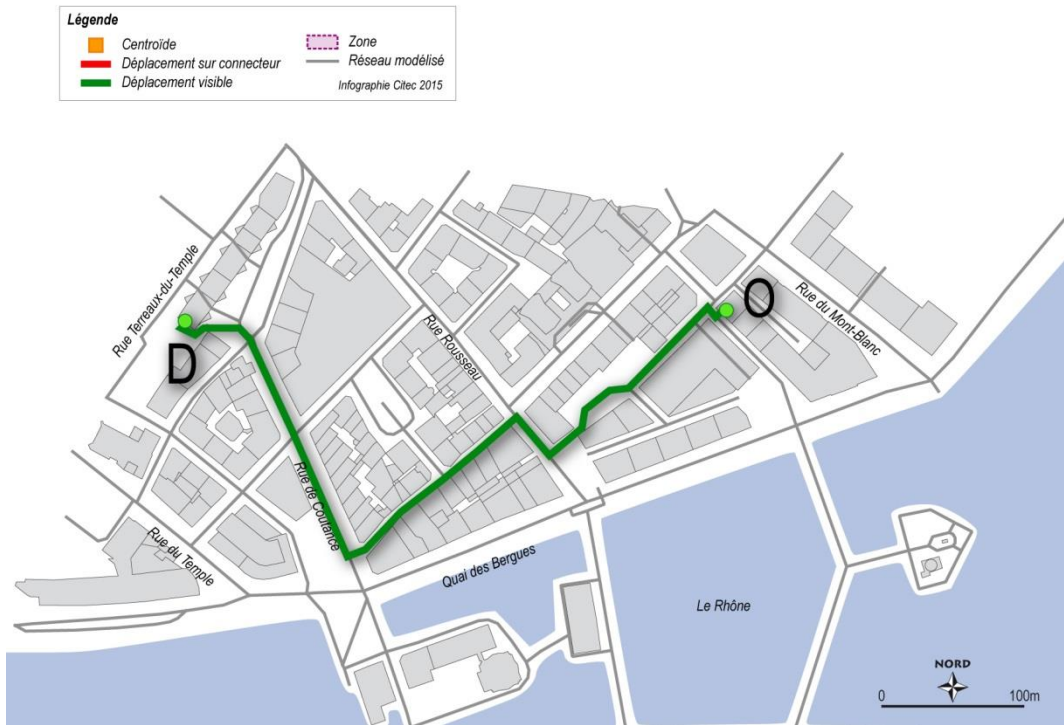


Fig. 10 Représentation d'un itinéraire « réel » entre une origine O et une destination D

Dans la **Fig. 11**, l'itinéraire « réel » de la **Fig. 10** est représenté à l'aide d'un zonage fin. Seulement les zones d'origine et de destination sont représentées (les zones intermédiaires sont omises pour ne pas complexifier le schéma). Les lieux « réels » d'origine et de destination ont été reportés sur le centroïde.



Fig. 11 Représentation de l'itinéraire avec un zonage et un réseau « fins »

Dans la figure **Fig. 12**, le zonage retenu est plus « grossier » que celui de la figure **Fig. 11**. Dans la configuration retenue, le positionnement des centroïdes et des connecteurs est différent puisqu'ils représentent des zones plus grandes. Il en résulte que l'itinéraire modélisé est plus court que l'itinéraire « réel » (**Fig. 10**). Dans le cas général, les itinéraires réels entre les deux zones peuvent être plus courts ou plus longs que les itinéraires modélisés, selon la manière dont les centroïdes et connecteurs sont positionnés. Lorsque le zonage est plus grossier, la précision de localisation des origines et destinations diminue. Le choix de zones plus grandes conduit à perdre la dispersion des distances au profit d'une distance de déplacement « représentative » : celle entre les centroïdes.



Fig. 12 Représentation de l'itinéraire avec un zonage « grossier » et un réseau « fin »

Lorsque le zonage est encore plus agrégé que dans les cas précédents (**Fig. 13**), l'itinéraire du déplacement ne peut plus être représenté sur le réseau car le lieu de départ est le même que le lieu d'arrivée : le centroïde de la zone. Les déplacements intrazonaux sont perdus pour la modélisation, et il est généralement préconisé que leur nombre soit minimisé.

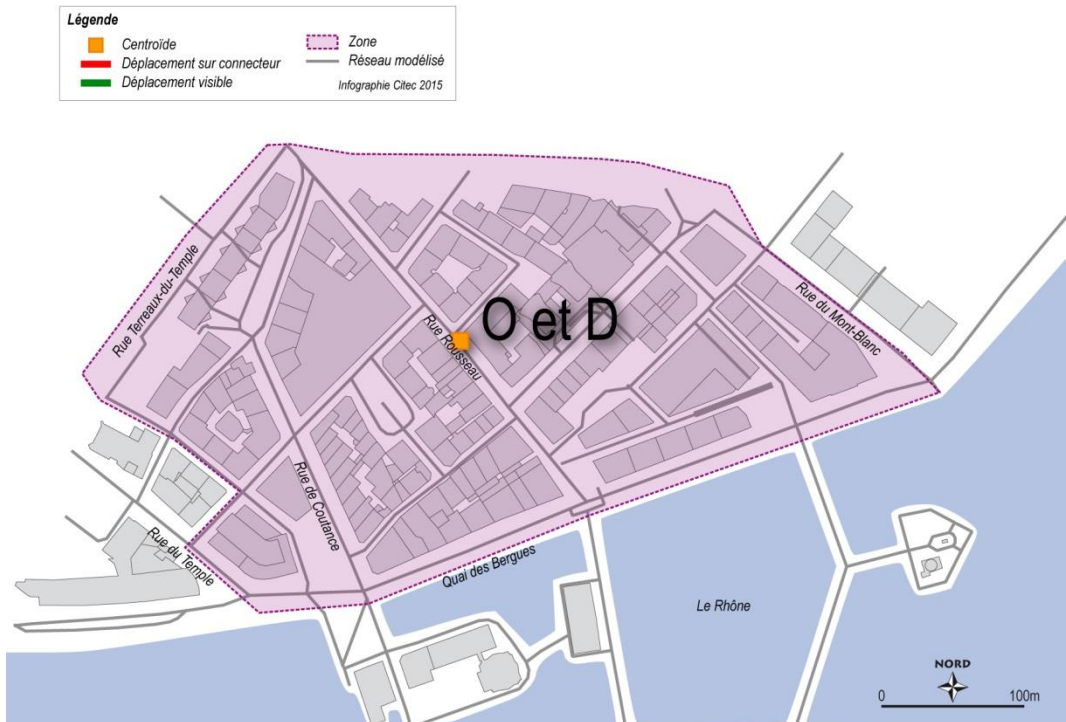


Fig. 13 Avec un zonage trop « grossier », l'itinéraire n'est plus modélisé

Les distances de parcours observées pour le mode à modéliser doivent être compatibles avec la finesse du découpage zonal. Pour valider un zonage, il convient donc d'étudier les distances de parcours et la part des intrazones.

4.3 Géométrie du réseau

Lors de la codification des réseaux, l'enjeu principal consiste à trouver la manière la plus pertinente, tenant compte des objectifs de la modélisation, de passer des « chaussées » du « monde réel » à une représentation de celles-ci en termes d'arcs et de nœuds. La figure **Fig. 14** illustre deux stratégies de codification dans le cas de réseau piétons : l'une plutôt détaillée et l'autre plus agrégée.

Dans les deux cas, il est primordial que la représentation conserve les « fonctionnalités » des infrastructures qui sont d'intérêt pour l'étude. Ainsi, dans la représentation de droite, le modèle permet de connaître un nombre de piétons parcourant la rue dans les deux sens. Dans la représentation de gauche, les trottoirs ont une représentation différenciée et les interactions entre les deux, au niveau des passages piétons, sont également prises en compte.

Le choix du niveau de détail n'est évidemment pas une particularité des modes doux. Dans le cas du réseau routier, les possibilités d'agrégation sont également nombreuses. Par exemple, usuellement, les voiries de desserte ne sont pas prises en compte dans la codification : seulement les voiries structurantes sont conservées. On peut également avoir des configurations dans lesquelles deux voiries parallèles différentes sont agrégées en un même arc (en intégrant des informations capacitaires pour chaque sens de circulation).

Comme le zonage, le niveau de détail dans la géométrie des infrastructures peut avoir un impact fort sur les résultats de modélisation. En effet, selon la configuration de la géométrie du réseau, les itinéraires « réels » peuvent être déformés. Dans la figure **Fig. 15**, un certain nombre d'arcs et de nœuds a été enlevé de la représentation des infrastructures. On a donc un réseau plus agrégé. La représentation de l'itinéraire « réel »

donné dans ce qui précède (**Fig. 10**) est déformée d'une manière similaire à ce que peuvent être les effets du zonage (**Fig. 15**).

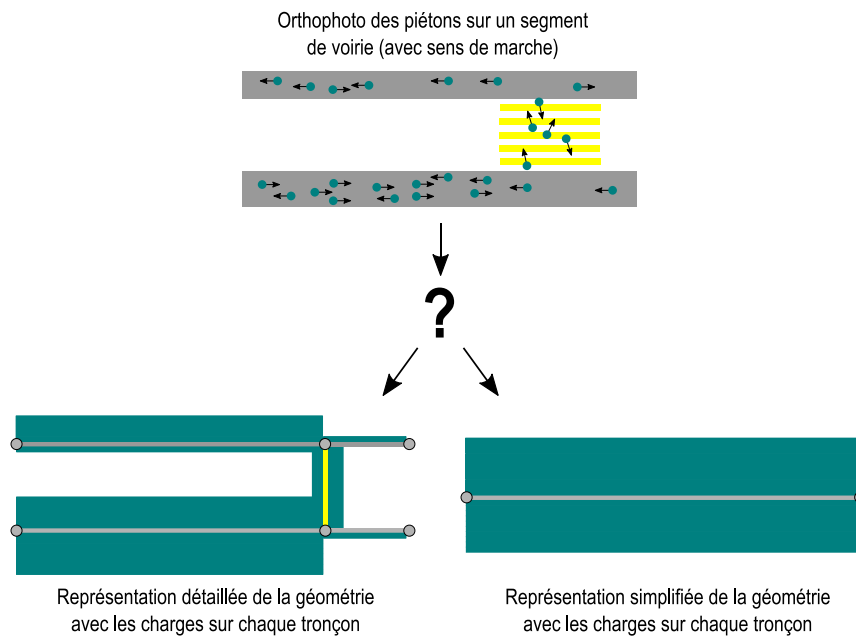


Fig. 14 Quel niveau de détail pour la représentation de la géométrie du réseau piéton ?

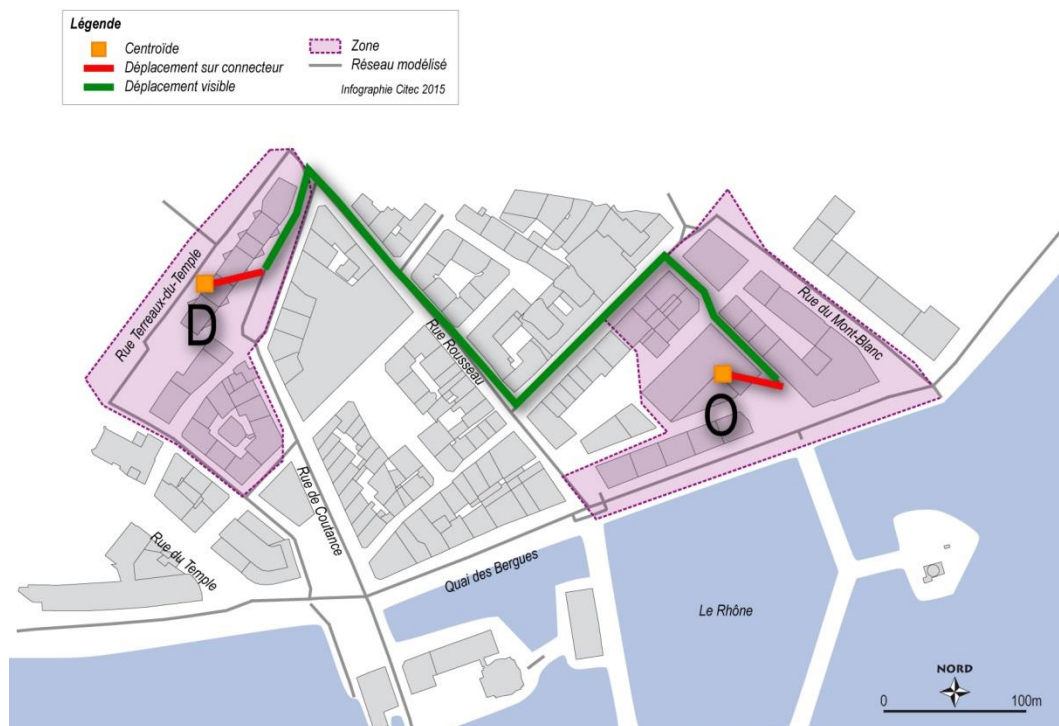


Fig. 15 Avec une géométrie des réseaux trop « grossière », les itinéraires et distances peuvent être déformés

Les distances de parcours observées pour le mode à modéliser doivent être compatibles avec la finesse de la représentation des infrastructures. Pour valider un réseau, il convient donc d'étudier les distances de parcours et la géométrie du réseau, pour voir si on reproduit tous les axes de circulation principaux.

4.4 Lien entre zonage et réseau : positionnement des connecteurs de centroïde

Le positionnement des connecteurs de centroïde a une grande importance. Les nœuds de réseau connectés sont les lieux effectifs d'injection / évacuation des déplacements interzonaux. **Le positionnement des connecteurs doit être tel que les itinéraires obtenus soient en accord avec l'organisation spatiale de la zone** (densités), ou au minimum, le plus homogène possibles (en accord avec l'hypothèse d'homogénéité spatiale de la zone. Pour cela, leur positionnement doit tenir compte

- de la manière dont la demande est répartie sur l'aire d'étude (zones) ;
- de la géométrie du réseau ;
- et de la manière dont la recherche d'itinéraires est faite lors de l'affectation.

Si des modes différents ont des algorithmes d'affectation différents, alors il convient de se demander si on peut utiliser les mêmes connecteurs pour ces différents modes.

4.5 Interaction des modes et modélisation multimodale

Les piétons, cyclistes usagers du TC et automobilistes partagent un espace commun, la rue, dans lequel ils sont en interaction continue (traversées de rue, accès aux arrêts, utilisation de la chaussée...). Cependant, cet espace partagé du « monde réel » n'est pas forcément représenté de cette manière dans les modèles multimodaux.

Les interactions sur la voirie entre les utilisateurs des différents modes modélisés ne sont que rarement prises en compte. Un exemple usuel est celui de l'interaction entre temps de parcours des bus et temps de parcours des voitures en présence de congestion. Dans la conception des modèles macroscopiques usuels, chacun de ces modes a une affectation propre. Un algorithme, reposant la capacité et le lien entre charge et temps de parcours, est appliqué pour les voitures particulières et un autre, reposant sur des temps inter-arrêts et les fréquences des services, pour les bus ; le tout sans que les résultats de l'un soient nécessairement pris en compte dans l'autre (et inversement)³.

Et pourtant, lors de la codification des réseaux les tronçons et nœuds utilisées par les bus et les voitures sont les mêmes (en dehors de certaines interdictions ou autorisations spécifiques). En réalité, on peut dire qu'on utilise les mêmes arcs et nœuds par commodité, pour éviter de démultiplier le travail de « dessin » de ces objets.

Dans un tel contexte, deux questions doivent être évoquées pour la modélisation macroscopique des modes doux :

- Si l'on dispose d'un modèle multimodal usuel, avec une affectation pour les véhicules particuliers et une affectation pour les transports en commun, **peut-on se contenter de réutiliser la géométrie des arcs et des nœuds pour modéliser les flux de piétons et de vélos ?** Sinon, quels compléments / modifications faut-il faire ?
- Quelles sont les interactions entre piétons, cyclistes et conducteurs dans l'espace qu'ils partagent ? Est-il pertinent de les modéliser dans une démarche macroscopique ? Quelles interactions doit-on modéliser en priorité ? Peut-on utiliser un modèle macroscopique pour « alimenter » des modèles microscopiques pour

³ Les logiciels permettent cette interaction. En revanche, dans la pratique en Suisse, elle est rarement mise en pratique.

certain cas d'interaction spécifiques (par exemple, l'abord des gares et autre générateurs) ?

Dans les quatre chapitres suivants, ces questions, ainsi que celle évoquées dans les sections précédentes de ce chapitre, seront traitées de manière spécifique pour la modélisation des vélos et pour celle des piétons.

5 Taille des zones

Rappel du chapitre 3 : Dans le MRMT, on entend par **étape**, un trajet effectué avec un seul moyen de transport. Un **déplacement** est un trajet effectué pour un seul motif, qui peut être constitué d'une ou plusieurs étapes, selon que la personne a utilisé un seul ou plusieurs moyens de transport.

Par principe, il est toujours souhaitable de disposer d'un zonage selon le niveau le plus fin d'information disponible, quitte à agréger des informations (des zones) ultérieurement. Une taille réduite permet de construire des zones au contenu plus homogène, donc plus représentatif de la réalité. Comme les déplacements piétons sont courts, il importe aussi d'avoir une taille de zone aussi petite que possible afin de réduire le nombre de déplacements intrazonaux qui ne peuvent pas être affectés sur le réseau.

A contrario, d'un point de vue pratique, le modélisateur sera souvent contraint de travailler avec des zones aussi grandes que possibles, par exemple pour les raisons suivantes :

- la limite technique (ou financière) du logiciel ;
- la quantité de travail nécessaire à définir les zones, les connecteurs, etc. ;
- la difficulté à recomposer des matrices OD (mais comme décrit au chapitre 8, l'élaboration d'une matrice nécessite de toute façon une méthodologie particulière, même avec des zones de « grande » taille) ;
- l'existence d'un modèle multimodal TIM/TC que l'on souhaite étendre à l'affectation des piétons et cyclistes.

Ce chapitre s'intéresse à la taille minimale de zone souhaitable pour pouvoir réaliser une modélisation des cyclistes et des piétons.

5.1 Problématique vélo

A priori la modélisation des vélos ne présente pas de difficulté majeure à partir d'un modèle dont les zones et le réseau ont été définis pour réaliser des affectations VP.

5.1.1 Taille des zones d'analyse : question des déplacements intrazonaux

L'une des premières questions à se poser concernant la modélisation des modes doux est la suivante :

« Avec le zonage prévu, combien de déplacements pourrai-je affecter ? »

Pour répondre à cette question il faut calculer la part des déplacements dits intrazonaux. En effet ces déplacements ne pourront jamais être affectés (**Fig. 13**).

Si l'on fait cette analyse⁴ sur la ville de Genève on obtient les résultats suivants :

⁴ L'analyse a été faite à partir du MRMT 2010 sur la base des déplacements déclarés, hors déplacements de type domicile-domicile (boucles), réalisés en interne à la ville de Genève. L'échantillon considéré est de 4'357 déplacements déclarés (après avoir supprimé les déplacements pour lesquels la distance indiquée dans le MRMT est nulle ou non indiquée, pour les besoins de l'analyse des distances par la suite).

Tab. 4 Analyse des déplacements JOUR réalisés en vélo en interne de la ville de Genève

Motif du déplacement	Part des déplacements intrazonaux	Part des déplacements réalisés entre zones
Travail	0%	100%
Loisirs	3%	97%
Étude	0%	100%
Achat	0%	100%
Tous	2%	98%

Conserver le modèle existant entraîne la perte de 2% des déplacements réalisés en vélo ce qui est tout à fait acceptable. Ce résultat est à mettre en relation avec le fait que le modèle genevois est conçu dès l'origine avec des zones de petite taille (environ 400 m par 400 m dans la partie centrale). La **Fig.** en annexe permet de visualiser la demande des déplacements vélos de moins de 4 km en relation avec la ville de Genève. On observe bien que la grande majorité correspond à des déplacements entre zones.

Une conclusion générale consiste donc à constater qu'en principe le découpage en zone d'un modèle transport en commun/route peut suffire pour la modélisation des vélos. L'adaptation d'un modèle multimodal préexistant pour intégrer les vélos s'en trouve donc facilitée.

5.1.2 Taille des zones d'analyse : question des distances de déplacement

En termes de distances de parcours, l'analyse du MRMT 2010 de Genève révèle que les déplacements à vélo sont plus courts que ceux en voiture (en tant que conducteur et en tant que passager) et que ceux en transports en commun (notamment Bus). La distance moyenne, à vol d'oiseau, d'un déplacement à vélo à l'intérieur de la ville de Genève est 1,237 km⁵. Les distances moyennes des déplacements en VP conducteur, passager et en bus sont, respectivement, environ 22, 33 et 40% plus importantes que celle des déplacements à vélo. Par ailleurs, environ 65% des déplacements réalisés en interne dans la ville de Genève font moins de deux kilomètres (**Fig. 16**), ce qui correspond à la moyenne suisse d'après le graphique de distribution des distances de déplacement par mode en Suisse donnée dans la **Fig. 17**, issue du rapport SVI 20100/04 [114].

⁵ Analyse faite sur la base du même échantillon utilisée pour l'analyse du chapitre 5.1.1.

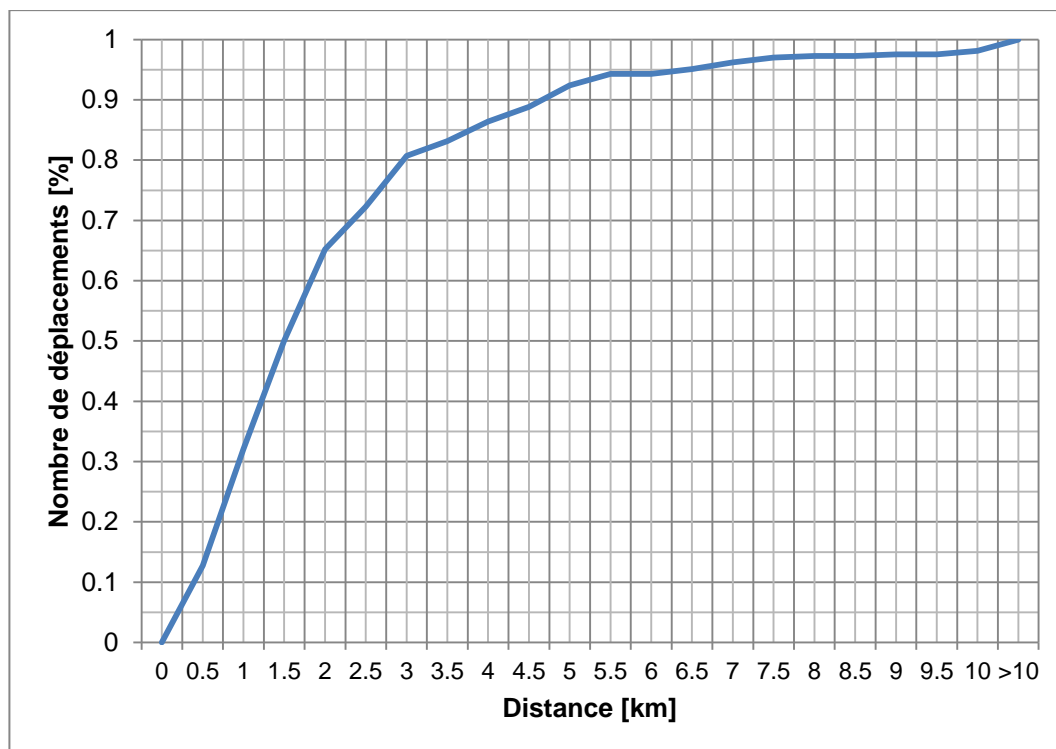


Fig. 16 Fréquences cumulées des distances des déplacements vélos réalisés en interne de la ville de Genève. Source : MRMT 2010

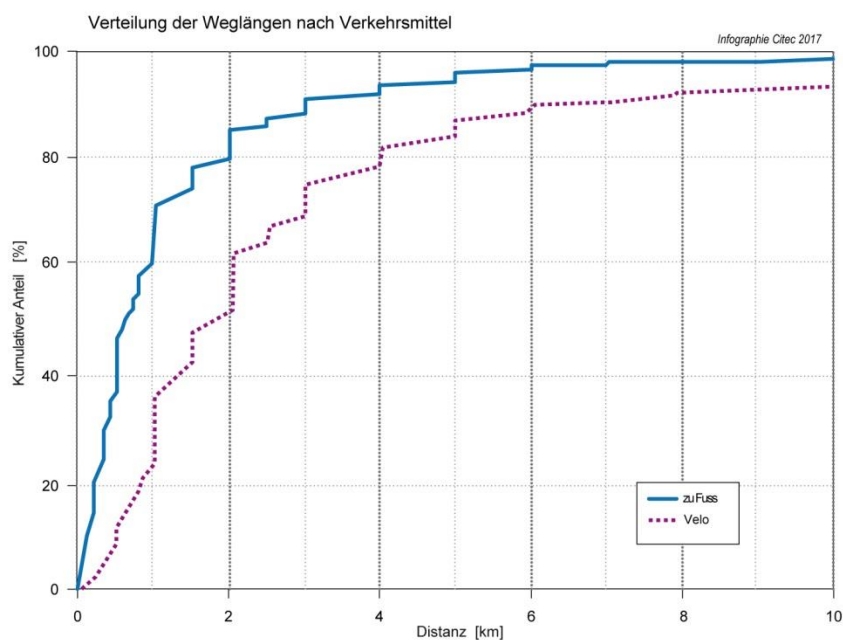


Fig. 17 Fréquences cumulées des distances des déplacements vélos réalisés en Suisse. Source [114] (illustration refaite à partir de l'original)

Les choix méthodologiques en matière de « granulométrie » pour la description du réseau cyclable dépendent de la réponse à la question suivante : « Peut-on dire que les

écarts de distance de déplacement entre vélos et modes motorisés sont trop importants pour conserver la même géométrie des infrastructures ? ».

Si l'on s'intéresse aux étapes, il est possible de se référer à des analyses faites lors de l'analyse des résultats du MRMT (**Fig. 18** issue de [115]), et qui concernent l'ensemble de la Suisse. On remarque que les distributions de déplacements vélo et transports en commun sont proches. Ainsi, en première approche la granulométrie d'un modèle d'affectation transport en commun/route est suffisante pour envisager une affectation.

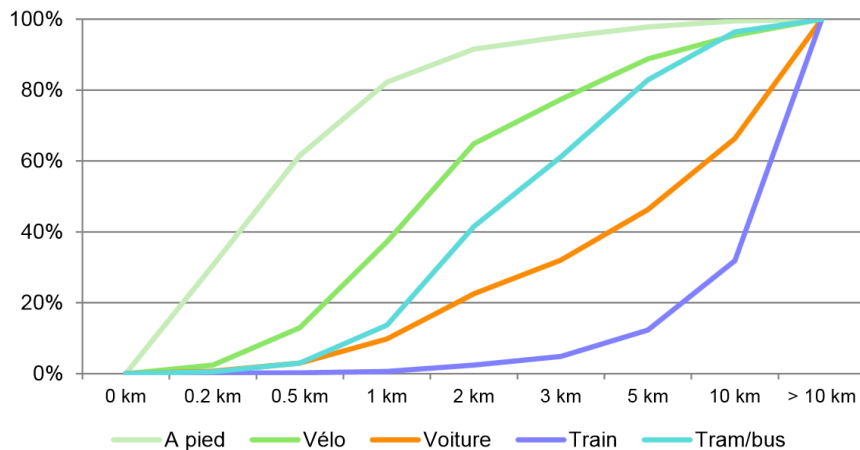


Fig. 18 Fréquences cumulées des distances des étapes selon le mode de transport sur l'ensemble de la Suisse (en %). Source [115].

5.2 Problématique d'un modèle piéton

Du fait de la longueur moindre des déplacements réalisés à pieds, la finesse du modèle prend une importance plus grande et plusieurs problématiques se posent pour la construction d'un modèle modes doux, par exemple :

- La question des générateurs particuliers (écoles, supermarchés...);
- La marche à pied comme mode d'accès aux transports en commun (étape pour un déplacement donné);
- La gestion des connexions des zones au réseau;
- La finesse du réseau.

En ce qui concerne Genève, par exemple, près de 60%⁶ des déplacements réalisés à pied en interne de la ville de Genève font moins de 500 mètres.

Pour définir la taille des zones d'un modèle piéton, deux questions sont à résoudre :

- Faut-il tenir compte des étapes à pied (piéton faisant partie d'un déplacement intermodal) ou bien, est-il possible de se contenter de modéliser uniquement les déplacements à pied (piéton comme mode principal) ?
- Quelle taille de zone permet d'affecter la majorité des étapes ou déplacements à pied ?

Pour répondre aux deux questions il faut s'intéresser aux distances parcourues lors des différentes étapes.

⁶ Analyse faite sur la base de 3058 déplacements tous motifs effectués à pied déclarés dans le MRMT, hors déplacements de type domicile-domicile.

5.2.1 Importance de l'intermodalité et des étapes à pied

Les trajets à pied pour accéder à un autre mode de transport tels que les transports en commun ou la voiture (parking) posent un problème en soit. Dans le MRMT, ceux-ci sont considérés comme une étape d'un déplacement. Ces derniers peuvent représenter un volume important (cf. **Fig 21**), non négligeable, alors qu'ils ne sont généralement pas considérés comme des déplacements à affecter dans les modèles existants.

L'analyse des étapes à pied effectuées en interne de la ville de Genève montre que la distance moyenne (à vol d'oiseau) des étapes à pied est de 0.425 km contre 0.882 km pour les déplacements à pied. Les étapes sont généralement plus courtes mais plus nombreuses.

Selon le microrecensement sur le territoire de la ville de Genève, les déplacements entièrement à pied représentent 44% des étapes à pied (2'807 déplacements pour un total de 6'374 étapes à pied recensées, cf. tableaux ci-dessous). Par contre, ces déplacements entièrement à pied représentent environ 58% de la totalité des kilomètres réalisés à pied. **Les étapes à pied de déplacements intermodaux constituent donc environ 42% des km à pied**, soit une distance importante qu'il convient de pouvoir affecter sur le réseau pour être représentatif de la réalité. **Ce constat démontre à nouveau l'importance de construire des modèles d'affectation qui prennent en compte les chaînes de déplacement (piétons + transports en commun, piétons + parking)**

Les tableaux ci-dessous permettent encore de constater que pour le motif travail les km parcourus à pied sont aussi important pour des étapes de déplacements intermodaux que pour des déplacements entièrement à pied (49% et 51%). Par contre, pour le motif loisir, qui est d'ailleurs un motif très important, la proportion n'est plus que de 41% pour les étapes et 59% pour les déplacements entièrement à pied. Sans surprise les étapes à pied d'un déplacement intermodal se font essentiellement en combinaison avec les transports publics (1'351 km contre 348 km en intermodalité avec la voiture). **En synthèse, dans le cas de la ville de Genève, les km à pied proviennent à 58% de déplacement entièrement à pied, à 33% d'étapes pour utiliser les transports publics et à 8% d'étapes en lien avec les parkings.**

Tab. 5 Caractéristiques des déplacements ayant pour mode principal la marche et réalisés en interne de la ville de Genève

Déplacements à pied	Nombres		Distances totales		Intrazone
Travail	480	(17%)	461 km	(19%)	22%
Etude	143	(5%)	114 km	(5%)	20%
Achats	759	(27%)	529 km	(22%)	26%
Services	211	(8%)	146 km	(6%)	21%
Loisirs	1'026	(37%)	987 km	(41%)	25%
Tous motifs (hors boucles)	2'807	(100%)	2'408 km	(100%)	24%
Plus : promenades en boucles (loisirs)	245		700 km		(100%)

NB : Les calculs de distances se basent sur les indications faites par les personnes enquêtées (indications subjectives)

Tab. 6 Caractéristiques des étapes à pied et réalisées en interne de la ville de Genève

Étapes à pied (hors boucles)	Nombres		Distances totales		Intrazone
Travail	1'428	(22%)	901 km	(22%)	30%
Etude	420	(7%)	234 km	(6%)	25%
Achats	1'250	(20%)	734 km	(18%)	28%
Services	497	(8%)	257 km	(6%)	27%
Loisirs	2'279	(36%)	1'669 km	(40%)	30%
Tous motifs	6'374	(100%)	4'133 km	(100%)	29%
Dont : étapes intermodales avec TC	2'676	(42%)	1'351 km	(33%)	28%
Dont : étapes intermodales avec TIM	703	(11%)	348 km	(8%)	49%

NB : Les calculs de distances se basent sur les indications faites par les personnes enquêtées (indications subjectives)

5.2.2 Longueur des étapes et taille recommandée des zones

A partir des données du microrecensement sur la ville de Genève, il est possible d'identifier la longueur à vol d'oiseau (ci-dessous) ou estimé par l'utilisateur (ci-après) d'un déplacement ou d'une étape à pied. Ces informations permettent de constater qu'environ 10% de la totalité des km réalisés par des étapes à pied ont une longueur inférieure à 200 m. Cette valeur baisse à 7% si l'on se contente de la totalité des km réalisés par des déplacements entièrement à pied. **Dans le cas de la ville de Genève, des zones d'environ 200 m de côté permettent donc d'affecter 90% des km réalisés à pied.**

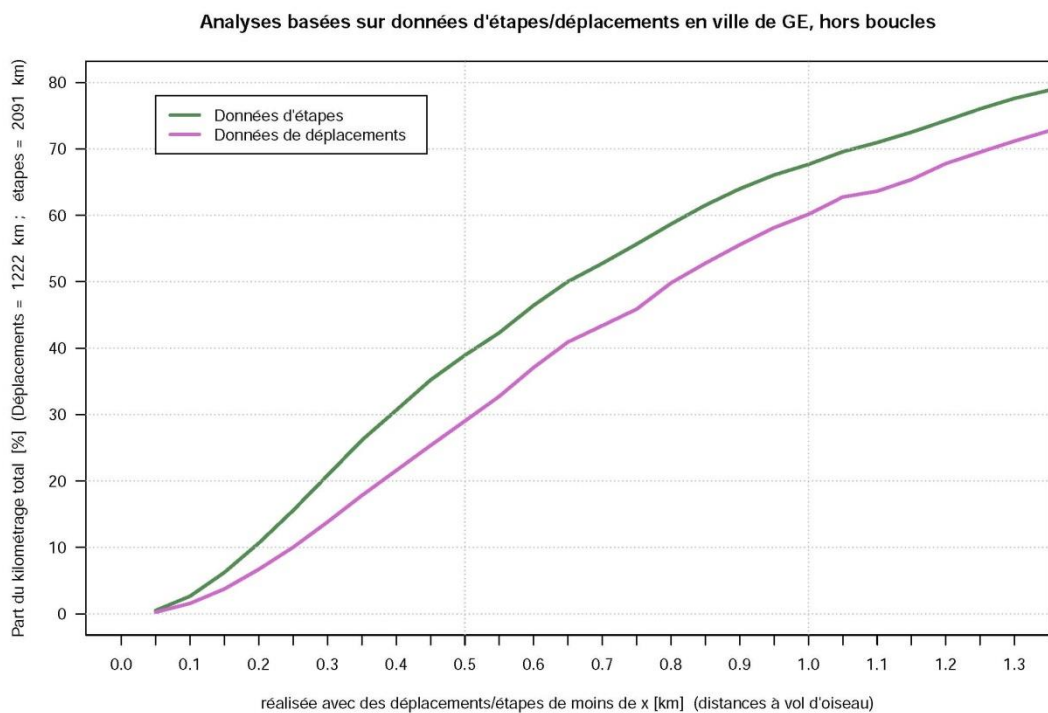


Fig. 19 Répartition des étapes et des déplacements effectués à pied en interne de la ville de Genève en fonction de la distance (à vol d'oiseau).

Basé sur les estimations subjectives des personnes enquêtées, ces valeurs sont même plus faibles car les distances estimées sont systématiquement plus importantes que les distances à vol d'oiseau. On constate aussi des sauts dans la courbe : beaucoup de personnes enquêtées indiquent 500m et 1km comme distance de marche.

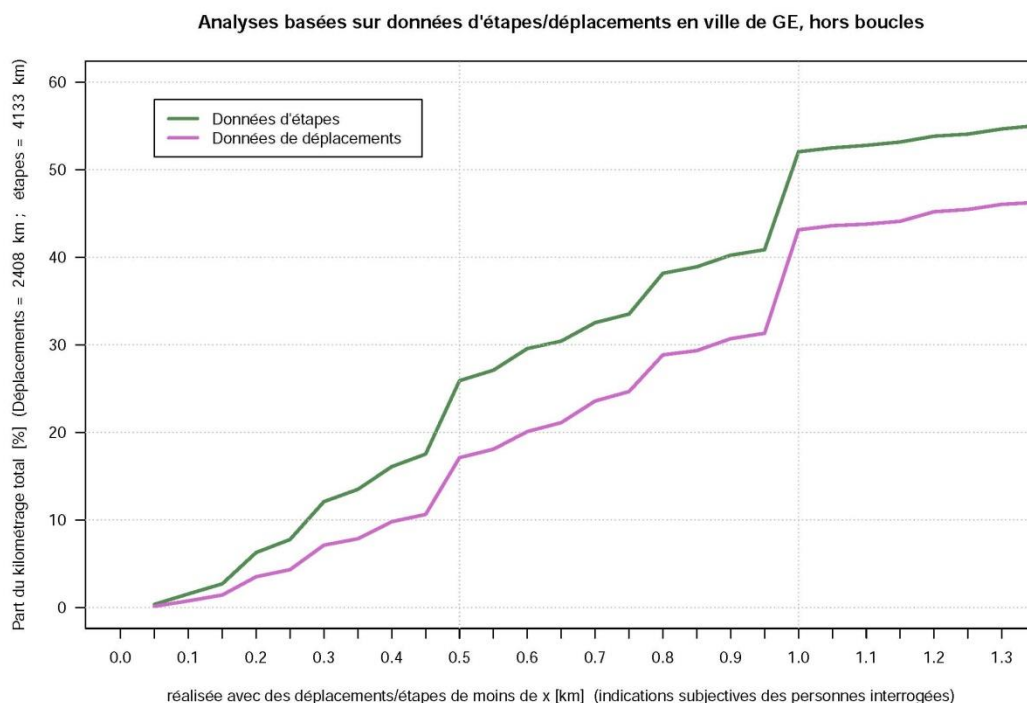


Fig. 20 Répartition des distances selon la distance de déplacement estimée par les personnes enquêtées pour les étapes et les déplacements à pied, internes à la ville de Genève.

Comme pour les vélos on se pose la question du nombre de déplacements affectés sur le zonage existant du modèle MMT. Si l'on fait cette analyse⁷ sur la ville de Genève avec le zonage du MMT on obtient les résultats suivants :

Tab. 7 Analyse des déplacements JOUR réalisés à pied en interne de la ville de Genève

Motif du déplacement	Part des déplacements intrazonaux	Part des déplacements réalisés entre zones
Travail	18%	82%
Loisirs	21%	79%
Étude	18%	82%
Achat	27%	73%
Tous	22%	78%

⁷ Analyse faite sur la base du même échantillon utilisée pour l'analyse du chapitre 5.1.1.

Lorsqu'on utilise les étapes, on obtient :

Tab. 8 Analyse des étapes JOUR réalisées à pied en interne de la ville de Genève

Motif du déplacement	Part des étapes intrazonales	Part des étapes réalisées entre zones
Travail	30 %	70 %
Loisirs	30 %	70 %
Étude	25 %	75 %
Achat	28 %	72 %
Tous	29 %	71 %

Conserver le modèle existant entraîne la non affectation de 22% des déplacements ou encore 29% des étapes à pied ce qui est très important.

La **Fig.** en annexe permet de visualiser la demande des déplacements piétons de 100 à 1'000 mètres en relation avec la ville de Genève. Les déplacements de plus de 400 mètres sont prépondérants. Les déplacements plus courts se font en priorité dans le centre-ville.

Le sous-découpage du zonage peut permettre de récupérer l'information d'une partie des déplacements intrazonaux. Cependant, ce sous-découpage nécessite de pouvoir intégrer toutes les informations qui caractérisent les zones sur ce sous-découpage. Les modèles de génération, distribution et choix modal sont la plupart du temps caractérisé par :

- La population par catégorie d'individus ;
- Les emplois ;
- Les surfaces ou les emplois commerciaux ;
- Les places disponibles pour les élèves ;
- Les équipements de loisirs et de service.

Il semble important de récupérer à minima l'information de la localisation des pôles générateurs importants tels que les écoles et les magasins de type supermarché et, dans une moindre mesure, les universités. Ces informations sont assez facilement récupérables, elles peuvent ainsi être intégrées dans le modèle, comme des **générateurs ponctuels**. La prise en compte de ces pôles de manière indépendante permet :

- De générer et affecter tous les déplacements liés à ces pôles (la question des déplacements intrazonaux ne se pose alors plus pour ceux-ci)
- D'améliorer la qualité des affectations (voir paragraphe 6.1)
- De contourner le manque d'homogénéité ou l'hétérogénéité de certaines zones.

Si la mise en place de pôles générateurs permet de récupérer une partie de la demande intra-zonale, il restera toujours une part importante de déplacements non affectés.

Ces déplacements pourront être modélisés par un « bruit » dépendant par exemple de la typologie de la zone et/ou du tronçon. Par « bruit », il faut comprendre des déplacements supplémentaires (matrices additionnelles par exemple) dont le nombre et la diffusion sont encore à imaginer.

5.3 Conclusions partielles

- Pour les besoins de la modélisation vélo, le découpage VP/TC suffit pour autant qu'il soit aussi fin que dans le cas du modèle genevois (400 m par 400 m de taille de zone au centre)
- Pour les besoins de modélisation des piétons, un tel découpage ne permet pas d'affecter suffisamment de déplacements (nombre). Il faut recourir à une ou plusieurs des astuces suivantes :
 - Générateurs ponctuels additionnels (écoles, supermarchés, universités)
 - Accroissement artificiel des déplacements (bruit)
 - Découpage plus fin des zones (zonage en grille ;..)
 - Par contre, en termes de km parcourus, donc affectés, un découpage de 200 m par 200 m est une valeur recommandée pour les piétons.
- Dans le cadre des étapes à pied réalisées pour rejoindre le réseau de transport en commun, des solutions prises sur le positionnement des connecteurs sont envisageables. Celles-ci sont développées au chapitre 6. L'intermodalité vélo et TC (et vice-versa) est plus compliquée. Aucun modèle à notre connaissance ne gère cet aspect. Dans le cadre de gros pôles comme les gares, un nombre non négligeables d'usagers du train terminent leur chaîne de déplacement à vélo. Une solution consiste à faire une hypothèse sur répartition modale de ces trajets terminaux et de créer une matrice additionnelle de demande.
- En ce qui concerne les générateurs tels que les gros parkings, la génération de trajets à pied ou en vélo induit peut être estimée à partir des hypothèses basées sur le nombre de places du parking, son taux d'occupation et des taux de rotation des places. Une matrice additionnelle peut ensuite être construite pour considérer dans l'affectation ces étapes à pied depuis ou vers le parking.

6 Positionnement des connecteurs

6.1 Connexions des zones au réseau

Un des éléments essentiels de la modélisation piétonne est la manière dont les zones sont connectées au réseau.

Compte tenu des algorithmes d'affectation utilisés, tout déplacement entre deux zones utilise les connecteurs, au départ et à l'arrivée, qui lui garantissent le temps de parcours le plus court. Il faut donc que la manière de connecter le centroïde de zone permette de gérer au mieux l'hétérogénéité spatiale de la zone.

L'image qui suit montre la manière dont des déplacements sont affectés, au niveau de la zone d'arrivée, sur un réseau disposant de connexions relativement longues et nombreuses par rapport à la taille des zones. Cette configuration est, en quelque sorte, la norme si l'on utilise un réseau piéton plus fin que celui utilisé par les autres modes (les connecteurs rejoignent des infrastructures plus capacitaires pour les flux motorisés).

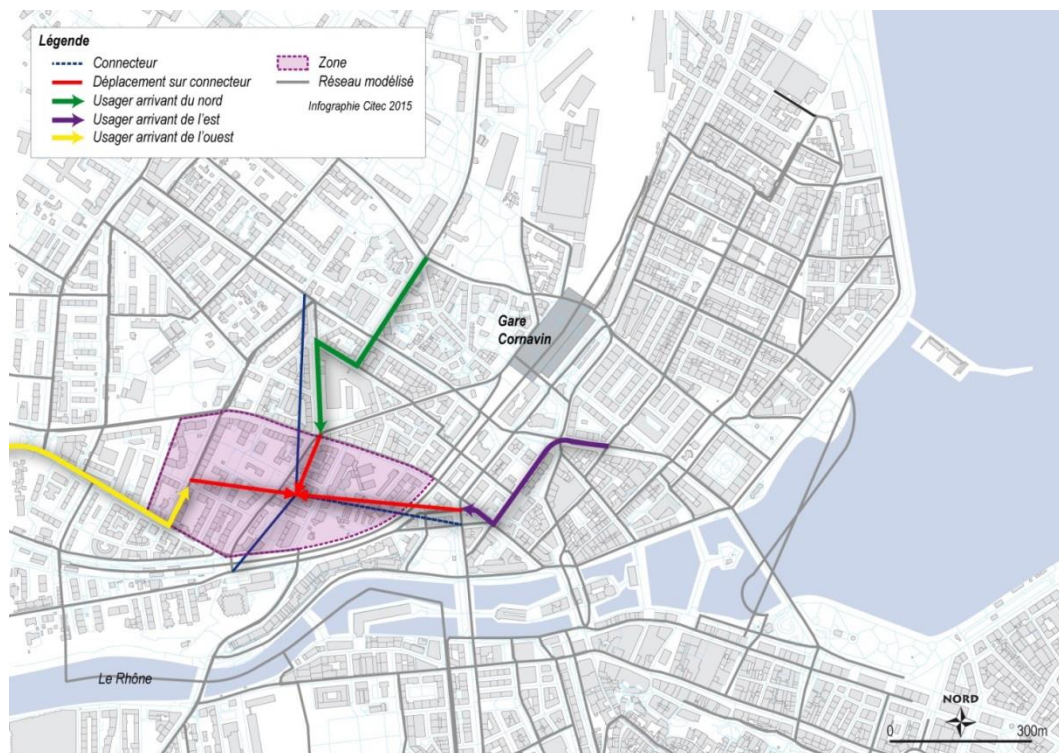


Fig. 21 Affectation des déplacements sur les connecteurs

Une grande partie du déplacement à pied (la partie effectuée sur le connecteur) est « perdue » pour l'affectation, on ne la voit plus apparaître sur le réseau de voirie. Pour remédier à ce biais, une solution consiste, pour les piétons, à ne pas utiliser les connecteurs du réseau VP mais à créer des connecteurs courts et uniques pour chaque zone, sur le réseau « fin » consacré à la marche à pied.

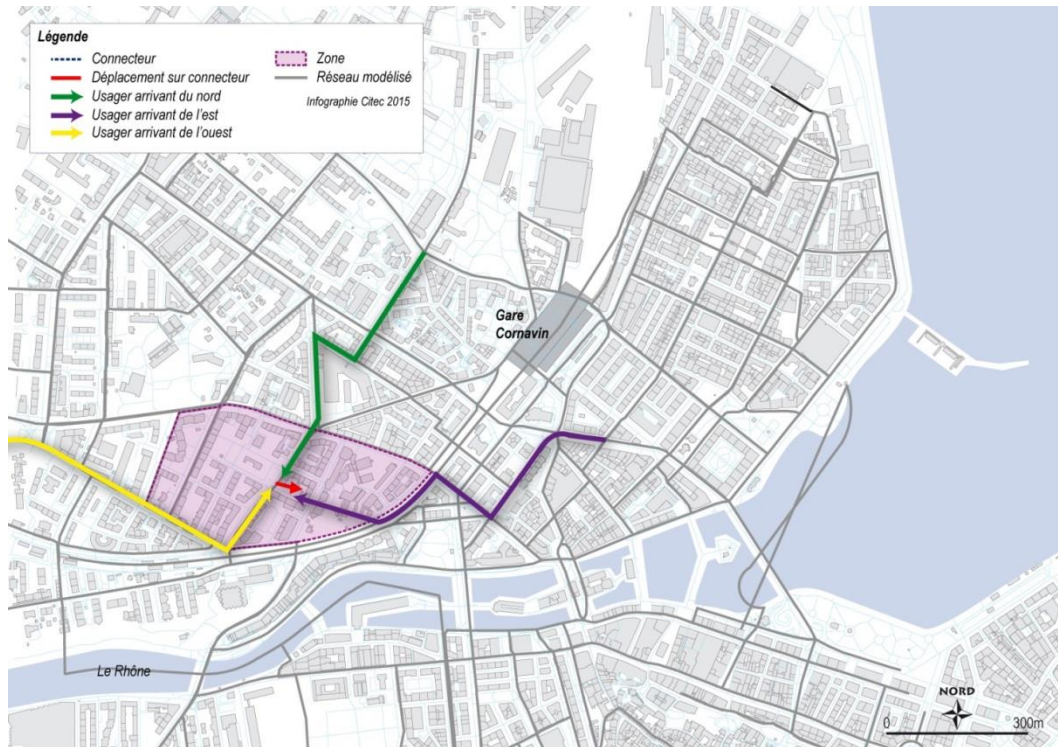


Fig. 22 Utilisation de connecteurs courts pour la MAP

6.2 Gestion des piétons en lien avec les transports en commun

Ici deux problématiques différentes se posent :

- la problématique des piétons qui quittent ou arrivent sur le réseau TC depuis une zone du modèle (trajets terminaux) ;
- la problématique des usagers en correspondance sur des pôles d'échange étendus (correspondances).

6.2.1 Les trajets terminaux

Dans la réalité l'utilisateur part à pied de son origine pour se rendre à un arrêt TC (le problème est le même pour les parkings).

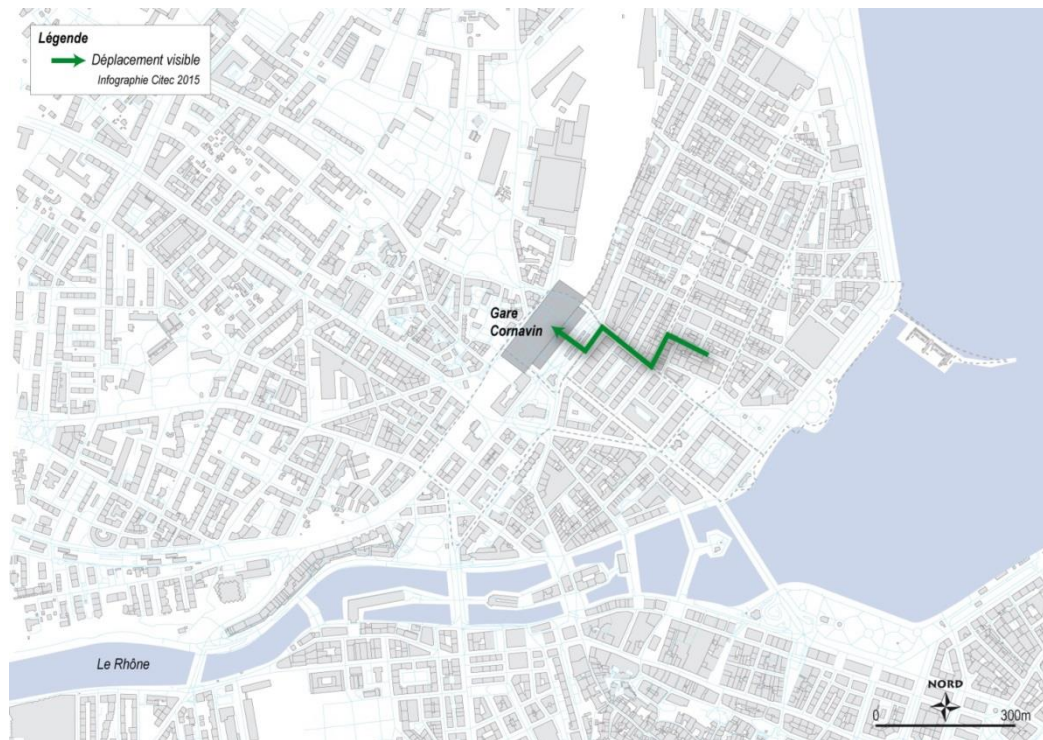


Fig. 23 Trajet piéton réel pour un usager de la rue Sismondi allant prendre un train à Cornavin

Dans de nombreux modèles, la totalité du déplacement est considérée comme un déplacement TC, la partie réalisée en marche à pied est négligée et réalisée sur un connecteur. C'est également ainsi que fonctionne le modèle de Genève.

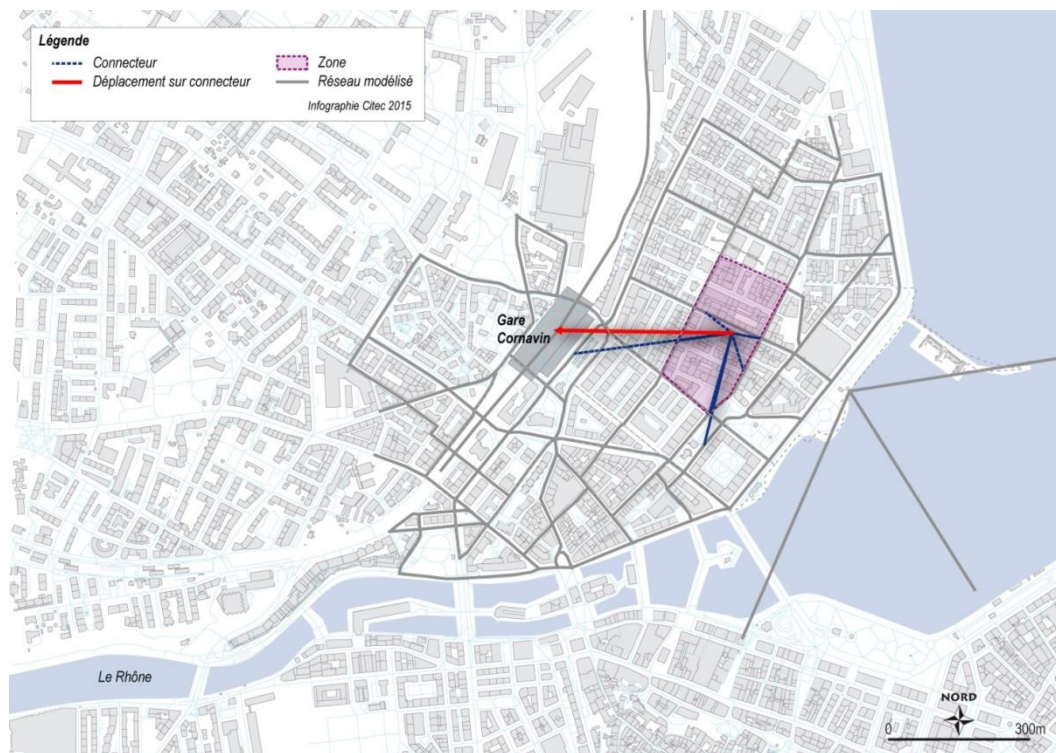


Fig. 24 Trajet piéton modélisé pour un usager de la rue Sismondi allant prendre le train à Cornavin dans le modèle MMT

L'objectif du modélisateur sera donc de minimiser la partie réalisée sur le connecteur au profit d'une affectation des piétons sur le réseau de voirie.

Il est possible de coder un modèle de telle sorte que la partie réalisée à pied du déplacement TC soit affectée sur le réseau (ce type de modèle existe déjà, par exemple celui de Grenoble). La méthode à appliquer est alors la même que celle proposée dans le paragraphe 6.1 à savoir faire des connections peu nombreuses et courtes pour les TC également.

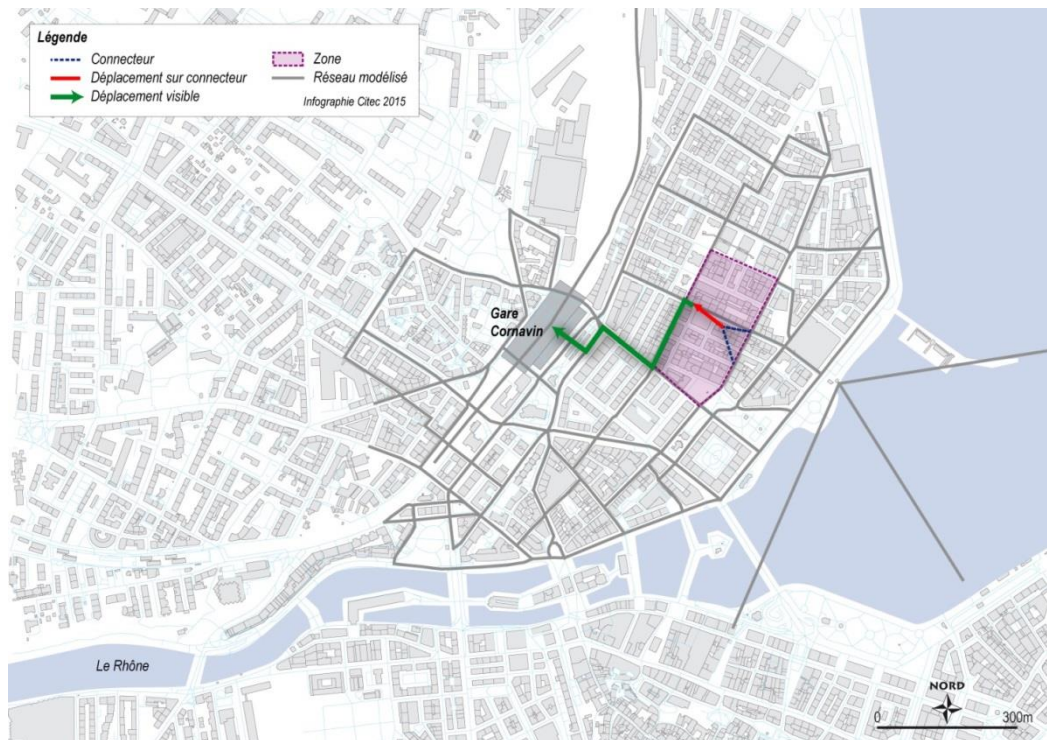


Fig. 25 Trajet piéton modélisé avec nouvelle méthode de modélisation

La gestion des trajets terminaux réalisés à pied nécessite d'appliquer une affectation libre pour les TC, le modèle calcul l'itinéraire vers l'arrêt le plus performant.

Le calage de l'affectation TC est par contre plus difficile dans ce type de modèle.

6.2.2 La gestion des correspondances dans les pôles d'échange

Dans la réalité beaucoup de personnes réalisent des correspondances dans des pôles d'échange parfois étendus. Il peut dès lors être intéressant de modéliser ces piétons. Dans la pratique, l'intérêt de modéliser ces flux intervient à deux échelles :

- Soit il s'agit de vérifier le bon fonctionnement d'un pôle d'échange et dans ce cas les vérifications portent sur un périmètre restreint (la gare et ses abords immédiats, un grand nœud d'échange autour d'un place urbaine, etc.). Ce périmètre peut être traité pour lui-même, indépendamment du contexte, par exemple en identifiant les flux avec un cordon.
- Soit il s'agit de considérer le pôle de la gare (ou d'un grand nœud d'échange) comme un générateur particulier du tissu urbain. L'échelle de référence est alors la ville ou l'agglomération. Dans ce cas, il suffit de considérer l'ensemble du pôle comme un seul nœud ou comme deux ou trois nœuds de transport public proches suivant la complexité du pôle.

Si l'on prend l'exemple de la gare Cornavin à Genève, il est intéressant de modéliser les piétons en échange entre le train et le tram sur le parvis de la gare.

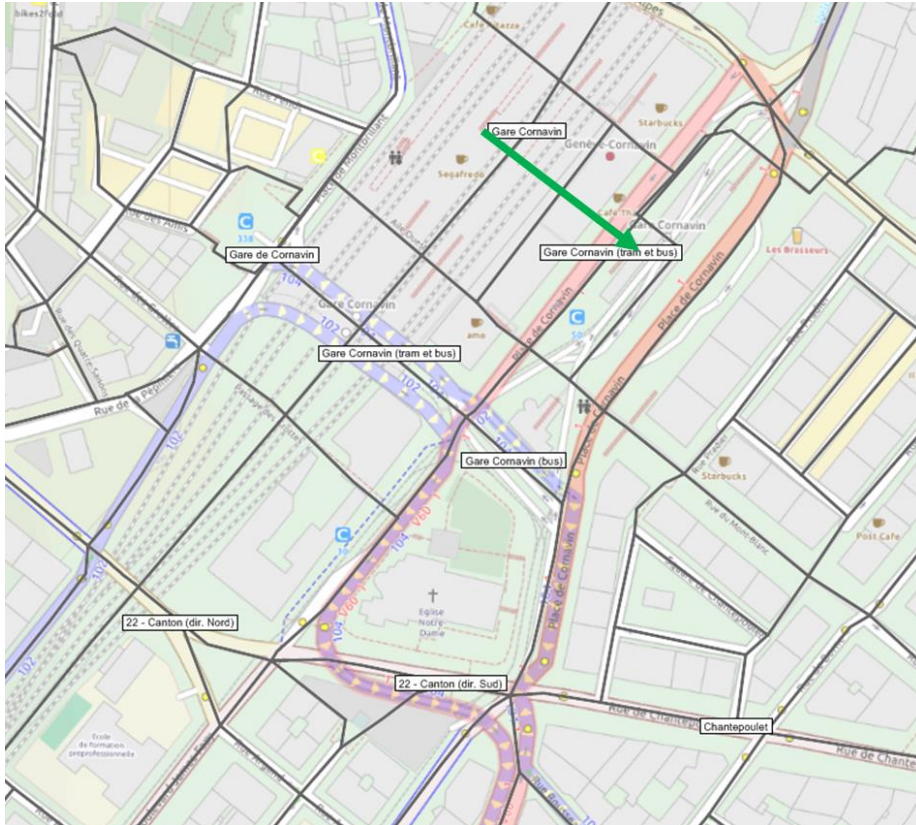


Fig. 26 Trajet piéton modélisé avec nouvelle méthode de modélisation

Pour observer ce déplacement dans le modèle il suffit d'offrir la possibilité au modèle de gérer les correspondances grâce aux tronçons à pied.

Offrir cette possibilité nécessite de caler des temps de parcours entre les différents arrêts des pôles d'échange. Cette action a les conséquences suivantes :

- le calage affectation TC sera plus complexe et
- le temps de calcul de l'affectation TC va augmenter.

7 Codification du réseau

Les attributs du réseau permettent de décrire l'offre proposée à destination des modes doux. C'est sur ces attributs que reposent les modèles de choix de chemin (affectation) et de choix de mode (ou répartition modale). Par rapport aux attributs généralement retenus pour les modes motorisés, les attributs d'un réseau modes doux sont plus nombreux.

En effet, comparativement aux déplacements VP et TC, les piétons et cyclistes sont en contact direct avec l'environnement extérieur (bruit, pluie) et mesurent physiquement l'effort de chaque déplacement. Des attributs correspondants doivent donc être pris en compte dans la codification des réseaux

7.1 Cas des cyclistes

Compte tenu des différents éléments évoqués dans ce qui précède, il convient d'inclure dans la codification du réseau cyclable les attributs suivants.

7.1.1 Distance et dessin ou géométrie du réseau

La distance est un attribut inclus dans tous les modèles de choix d'itinéraire. La codification de cet attribut est généralement aisée car elle découle directement de la définition de la géométrie du réseau. Celle-ci dépendra de la stratégie de codification retenue : son niveau de granulométrie souhaité et les sources de données disponibles.

Les principales sources de données pour établir la géométrie des réseaux sont les données qui alimentent les systèmes de navigation. Ces données sont disponibles surtout pour les automobiles. Cependant, comme vu dans le chapitre 4, la densité des réseaux ainsi représentés est suffisante.

Par rapport aux modes motorisés (VP et TC), la distance est plus souvent utilisée que le temps de parcours. En réalité, cette approche se justifie par :

- L'effort physique inhérent aux déplacements en modes doux, qui est fonction de la distance ;
- Des temps de parcours plus variables que pour les modes motorisés puisqu'ils dépendent de la condition physique des individus.

Dans la mesure où les objectifs du présent mandat rentrent dans un cadre de recherche, le choix qui a été fait est de retenir une description fine des réseaux (plus fine que celle du MMT). Ce choix permet d'intégrer notamment toutes les voies potentiellement utilisées par des cycles, y compris les voies interdites à la circulation automobile. Les charges des différents itinéraires permettront de savoir si la codification était trop fine ou non.

7.1.2 Dénivelé et autres attributs relatifs à l'effort

La revue de littérature (section 2.1.6) a permis de mettre en évidence le fort impact du dénivelé sur le choix du chemin. Intégrer cet attribut au moment de la codification est important.

Dans la plupart des cas, en modélisation transport, les pentes sont calculées à partir de données altimétriques de sources diverses. L'usage est de calculer les pentes des tronçons à partir des nœuds en amont et en aval de ceux-ci.

Pour les modes doux, cette manière de procéder n'est pas entièrement satisfaisante. Compte tenu des distances de déplacement plus faibles et de la plus grande sensibilité des cyclistes au relief, il est important d'avoir une mesure plus fine de cet attribut.

Pour évaluer cette approche, nous avons calculé le dénivelé à partir d'une couche de points placés à une distance uniforme (5 m, par exemple) sur l'ensemble du réseau et associé les résultats des calculs aux tronçons correspondants (**Fig. 27**). Les attributs à reconstituer au niveau des tronçons sont les suivants : dénivelé positif, dénivelé négatif, pente maximale positive, pente maximale négative.

Dans la plupart des cas, l'utilisation d'un MNT est suffisante pour le calcul des pentes, mais nécessite un traitement manuel pour intégrer correctement des éléments comme les ponts, les tunnels... Il faut alors combiner les données du MNT et du MNS

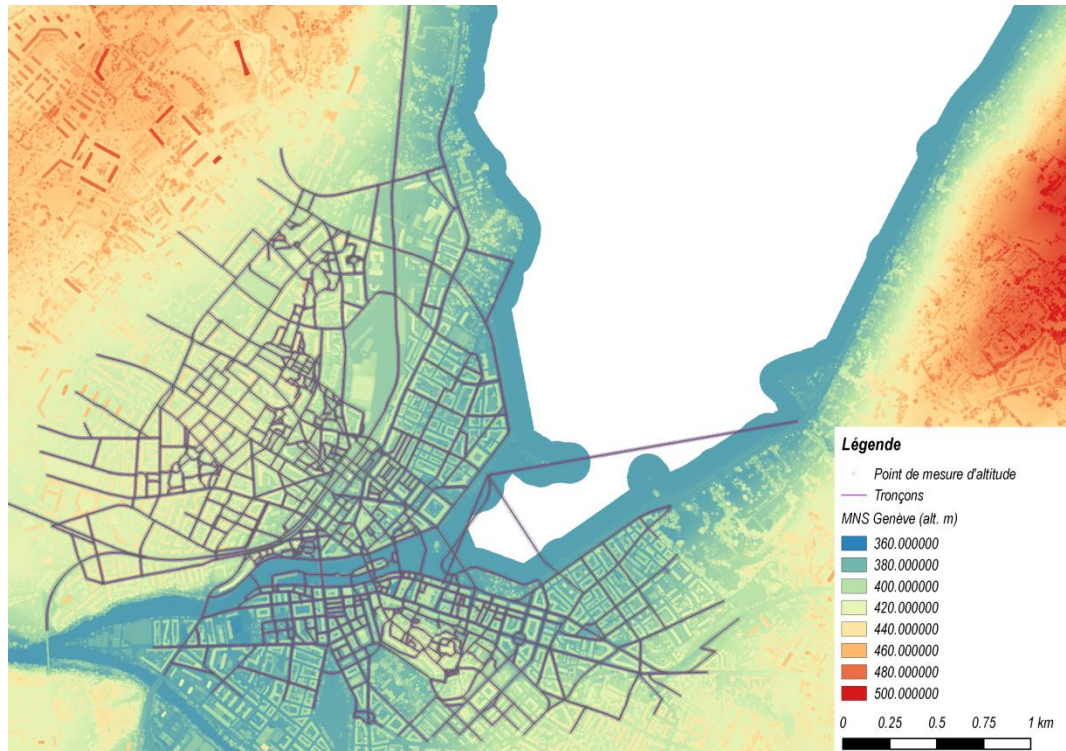


Fig. 27 Utilisation du MNS de Genève pour associer des altitudes à différents points des tronçons.

La combinaison de ces jeux de données n'est pas aisée. Selon la localisation exacte des tronçons, des données indésirables du MNS peuvent être intégrées (arbres, bords des toits). Il faut procéder à une vérification de tous les tronçons et à une correction manuelle, en cas de besoin. La **Fig. 28** donne un exemple de profils de certains tronçons du MMT2.2 qui ont été corrigés manuellement.

Les tunnels présentent des cas délicats car tant le MNT que le MNS peuvent comporter des erreurs. Dans le traitement des données de Genève, certains tronçons correspondant à des passages sous les voies ferrées comportaient de « sauts » (augmentation de l'altitude à l'intérieur du tunnel), qui ne correspondaient pas au profil de la chaussée. Ces « sauts » étaient présents dans les 2 jeux de données altimétriques.

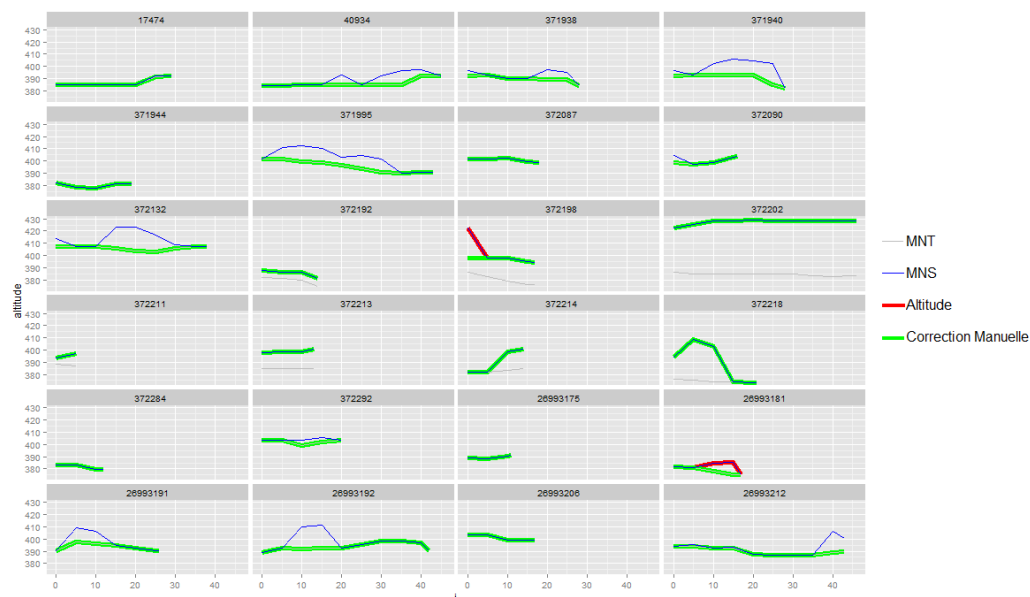


Fig. 28 Exemple de correction manuelle des altitudes de points pour les calculs de pentes sur le MMT2.2

De manière générale, la **codification des données altimétriques est une activité chronophage en raison de la multiplicité de traitements et de vérifications à réaliser** (à ce sujet, voir également l'exemple du calculateur d'itinéraires cyclables à Genève [52]).

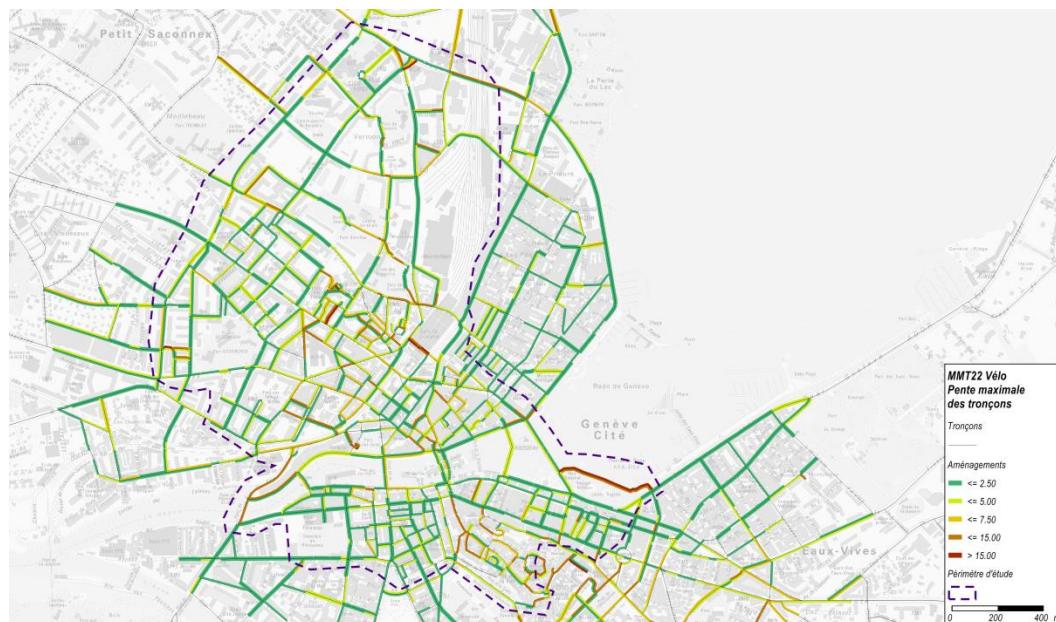


Fig. 29 Pente positive maximale des tronçons (à partir des points retenus pour l'altimétrie) sur le MMT2.2

Un aspect important est de rappeler **que l'attribut d'un chemin est une agrégation (le plus souvent une somme) des attributs des arcs dans le modèle**. Certains attributs prennent un sens seulement au niveau du chemin. Par exemple, un attribut comme la pente maximale positive peut être établi pour chaque arc (**Fig. 29**). Cependant, dans le choix du chemin, il est plus intéressant d'écartier certains chemins qui ont une partie avec

une pente trop importante. **Il est donc préférable de disposer d'un attribut de type pente maximale du chemin.**

7.1.3 Perception positive de la sécurité : Présence d'aménagements cyclables

Un des principaux éléments impactant favorablement la perception de sécurité des itinéraires est la présence d'aménagements cyclables. Ceux-ci peuvent être de plusieurs types et être placés dans des configurations de voirie différentes.

Une fois que la géométrie du réseau a été définie, l'intégration des aménagements cyclables se fait par des traitements SIG à partir de données existantes (jointures spatiales, plus ou moins faciles ou automatiques selon la qualité des données de départ). La difficulté pour cette étape de la codification, au-delà des difficultés de traitement SIG, concerne principalement la **typologie à retenir pour les aménagements**.

Dans la littérature, on peut trouver plusieurs types d'aménagements selon les lieux où les études sont réalisées. Il est conseillé de prendre en considération les éléments suivants :

- Le type d'infrastructure :
 - Les routes dédiées vélo : seulement les vélos y ont accès et il n'y a pas de trafic motorisé ou piéton en parallèle qui pourrait créer des conflits potentiels dans les mouvements. Par ailleurs, il n'y a pas de places de stationnement adjacentes.
 - Les infrastructures mixtes modes doux : les piétons et les cyclistes sont séparés des modes motorisés, mais sans démarcation spécifique pour les espaces piéton et cycliste.
 - Les pistes cyclables : aménagements faits en parallèle des réseaux existants, avec une barrière physique entre le trafic motorisé et les vélos (et, théoriquement, les piétons)
 - Les bandes cyclables : comme les pistes cyclables, mais la délimitation de l'espace cyclables est faite par une ligne peinte et non une barrière physique (mixité d'usage, souplesse pour les usagers).
 - Les couloirs TC empruntables par les vélos : il s'agit d'aménagements conçus pour la circulation des TC mais qui sont également autorisés aux cyclistes
 - Le marquage au sol : certaines infrastructures sont dotées d'un marquage au sol pour prévenir les automobilistes de la présence d'un trafic vélo, mais il n'y a pas de démarcation spécifique.
- Le sens de circulation du trafic motorisé : est-il le même que celui des vélos, le sens contraire ? surtout important lorsqu'il n'y a pas de barrières physiques séparant le trafic motorisé des vélos.

Pour le test avec le modèle de Genève, la distinction suivante, issue des données du SITG sur les aménagements 2 roues, a été retenue (**Fig. 30**) :

- Piste cyclable
- Bande cyclable
- Dérogation 2 roues : il s'agit d'infrastructures pour les piétons mais où les vélos sont autorisés également (essentiellement rues piétonnes et quelques traversées de parcs). Il n'y a pas de signalisation définissant la séparation entre vélos et piétons.
- Voies de Tram/Bus : il s'agit d'infrastructures réservées en priorité aux TC mais où les cyclistes sont autorisés également.
- Contresens : voies à sens unique pour les voitures, où les vélos sont autorisés à contresens.



Fig. 30 Exemple de codification du réseau cyclable à Genève : éléments de géométrie et aménagements cyclables à partir des bases SITG

Une fois que les types d'aménagement ont été identifiés sur les tronçons, il faut définir les attributs qui seront nécessaires dans le calcul d'itinéraire. Usuellement, la longueur de chaque type d'aménagement est utilisée. Accessoirement, la proportion qu'un type d'aménagement représente sur la longueur totale (d'un chemin) est aussi retenue (pour éviter des problèmes de corrélation des variables explicatives). Comme pour les données d'altitude, il faut veiller à ce que l'agrégation des attributs des arcs le long d'un chemin ait du sens.

Une remarque importante concerne la continuité des aménagements cyclables. Sa prise en compte est délicate car elle doit être faite au niveau du calcul des chemins entre une paire d'OD. Cela veut dire qu'il faudrait inclure une procédure de « détection » de la continuité des aménagements cyclables au moment où la recherche des chemins alternatifs est effectuée. En général, dans les études de préférences révélées utilisant de données GPS, la continuité des infrastructures cyclables n'est pas prise en compte.

7.1.4 Perception négative de la sécurité : risque d'accident avec les modes motorisés

Pour définir la dangerosité d'un itinéraire, il est usuel d'inclure le volume et la vitesse du trafic motorisé sur les tronçons. Si la modélisation du réseau cyclable se fait à partir d'un modèle multimodal existant, il est relativement aisé d'utiliser les résultats de l'affectation de ces modes comme attributs du réseau cyclable, surtout si le niveau de granulométrie est le même pour la représentation des réseaux. Autrement, il faut récupérer des données de comptages et de vitesse supplémentaires.

L'inclusion de la vitesse des modes motorisés n'est pas toujours significative dans les modèles de choix de chemin, en raison de problèmes de corrélation avec les emplacements où les aménagements cyclables sont réalisés en priorité.

Pour l'exemple avec le MMT, les résultats d'affectation ont été introduits enregistrés comme attributs pour le réseau cyclable. A noter que la variable introduite n'est pas une charge horaire (véh./h) mais une charge horaire pondérée par la distance (véh. / h * m). Cette approche permet de rendre la variable indépendante du nombre de tronçons dans un chemin.

La dangerosité d'un itinéraire peut également être liée aux transports en commun, en particulier au Tram (chute liée aux rails, **Fig. 31**).

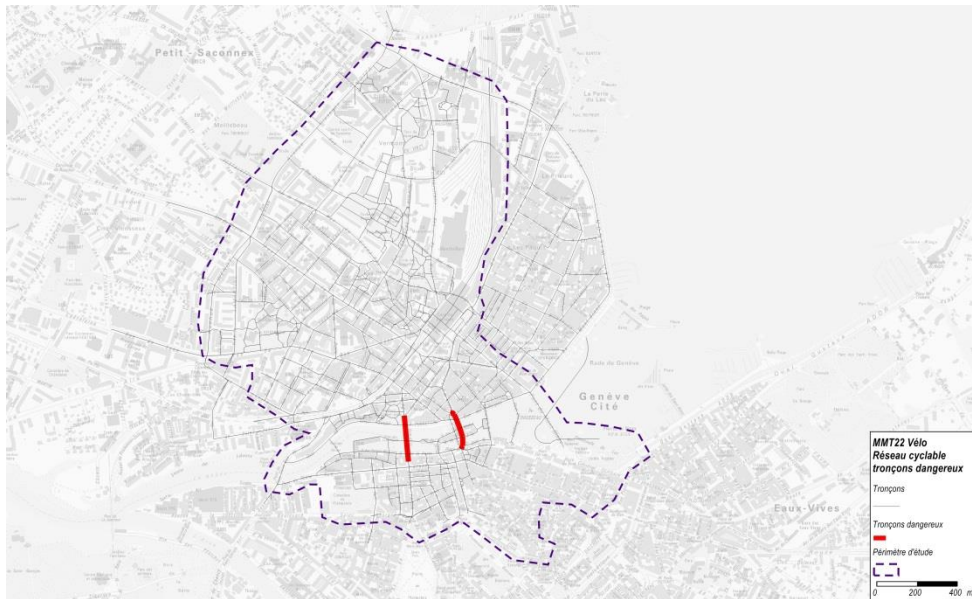


Fig. 31 Codification des sections dangereuses en raison de la fréquence importante des trams et de la nécessité de rouler sur les rails pour les cyclistes.

7.1.5 Autres éléments de perception : Agrément ou esthétique

Il y a des éléments de perception qui peuvent avoir un impact sur le choix d'itinéraire et qu'il est utile de dissocier des aménagements cyclables. Le premier de ces éléments concerne l'agrément positif. Ainsi, le fait de passer par un chemin où il y a plus de verdure, ou des cours d'eau peut être préférable à un environnement urbain classique (**Fig. 32**). Les variables qu'il est intéressant de retenir sont les suivantes :

- En cas de présence de cours d'eau : longueur du parcours à proximité immédiate d'un cours d'eau
- En cas de présence de parcs ou autres « espaces verts » : le nombre d'arbres par kilomètre ou la longueur du parcours « vert »



Fig. 32 Exemple d'éléments d'agrément positif : le réaménagement des berges du Rhône à Lyon a rendu cet itinéraire attractif pour les cyclistes

Il y a d'autres facteurs qui ont un impact négatif. Tout itinéraire dont les caractéristiques sont celles d'un espace souterrain (**Fig. 33**) est la plupart du temps évité par plusieurs raisons :

- risques d'accident accrus en raison d'une moindre luminosité
- risques d'agression ;
- insalubrité.

Ces éléments peuvent être inclus comme des longueurs de route perçus négativement.



Fig. 33 Exemple d'agrément négatif : Passage Montgomery à Bruxelles

Il y a une exception : le cas très particulier de certaines infrastructures souterraines spéciales pour les modes doux, comme le « tunnel modes doux » de la Croix Rouse à Lyon (**Fig. 34**)



Fig. 34 Exemple d'aménagement souterrain : tunnel modes doux de la Croix Rouse (Lyon). Agrément positif

Dans le cas de l'exemple avec le MMT2.2, l'agrément positif et négatif a été inclus sous une forme générique : « longueur de perception positive » et « longueur de perception négative » (il s'agit des longueurs de tronçon). L'attribut « positif » a été associé aux bords du lac Léman et du Rhône, ainsi qu'à certains tronçons à l'intérieur des parcs. L'attribut « négatif » a été associé à certains tronçons correspondant à des passages souterrains à proximité de la gare de Cornavin (**Fig. 35**).

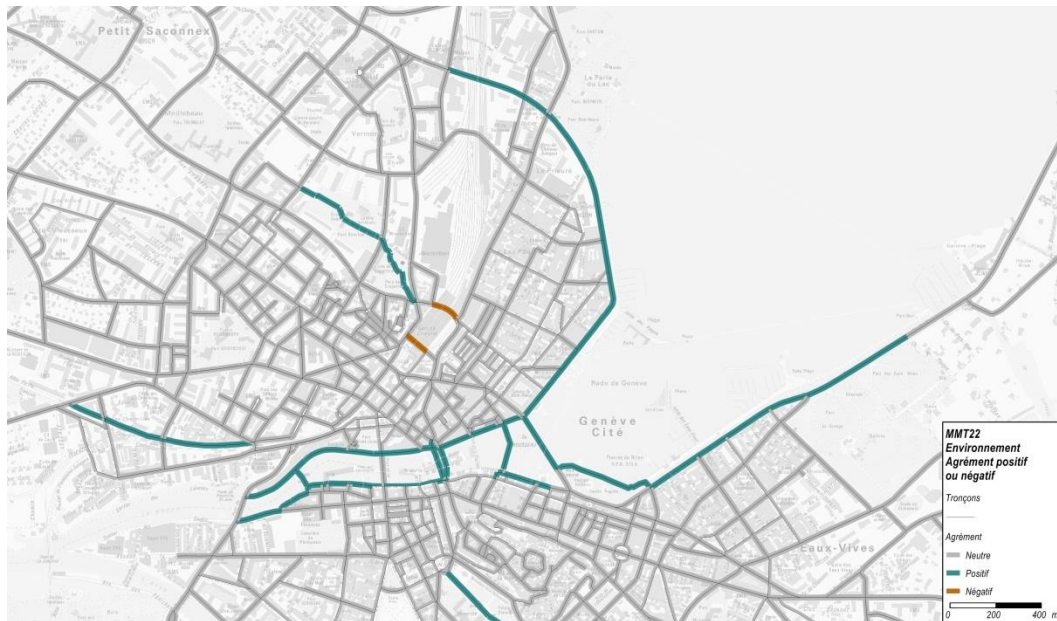


Fig. 35 Codification des lieux où l'environnement bâti est susceptible d'avoir un impact sur le choix d'itinéraire

7.1.1 Codifier le réseau selon la loi ou l'usage ?

L'expérimentation sur le périmètre restreint de Genève a permis de mettre en évidence quelques questions supplémentaires.

Le pont du Mont-Blanc n'est pas équipé de bandes cyclables ni de pistes cyclables. Il comporte pourtant plus de 70'000 véhicules/j et environ 3'000 cyclistes/j. La constitution du réseau cyclable à partir des données SIG aboutit à une lacune d'aménagement conformément à la réalité, pourtant la majorité des cyclistes empruntent le trottoir côté lac (d'une largeur d'environ 3 m mais très fréquenté par les piétons). Dans une telle situation comment faut-il coder le réseau ? Il semble évident de coder le réseau avec un itinéraire cyclable même s'il n'existe pas formellement. Mais quel attribut lui donner ? Il ne s'agit pas d'une piste cyclable hors chaussée en raison des nombreux conflits avec les piétons. Cet exemple concret illustre la difficulté de l'ingénieur à préparer les éléments préalable à l'affectation. Dans ce cas précis il est vraisemblable que les attributs du réseau soient ajustés au fur et à mesure du calage d'affectation.

Une autre difficulté observée sur le débouché sud du pont de la Coulouvrenière consiste à apprécier la meilleure manière de coder des aménagements multiples. Dans ce secteur le cycliste peut soit rouler sur le trottoir (marquage au sol et indication d'itinéraire au début du pont), soit rester sur la chaussée, sur la voie de tram. Au débouché sud du pont, si le cycliste est sur trottoir il est plus difficile de poursuivre selon l'itinéraire principal, si le cycliste est dans la voie de droite qui comporte le tram, il est ensuite confronté à l'arrêt de tram et surtout à un virage des voies de tram comportant un angle très défavorable dans un contexte de fort trafic. Dans une telle situation, que faut-il coder ? Un aménagement « sûr » mais réhébitoraire ou un tronçon difficile, dangereux et direct ? Nous n'avons pas pu trancher dans le cadre des tests.

Ces deux exemples illustrent une difficulté classique de modélisation qui n'est pas spécifique à la modélisation des piétons ou des cyclistes. Cependant, soulignons qu'avec la modélisation piéton/vélo, il faut encore moins utiliser les bases de données des réseaux telles quelles. Il faut encore plus que pour les TIM ou les TC procéder à des arbitrages sur les attributs de certains tronçons. D'une certaine manière, le cycliste prend toujours les éléments les plus avantageux du mode piéton et du mode voiture.

7.2 Cas des piétons

7.2.1 Importance du maillage du réseau

Pour les piétons, si la distance à parcourir est un élément prépondérant dans le choix d'itinéraire, plusieurs autres caractéristiques influencent l'utilisation d'un itinéraire (**Fig. 36**).

Ces autres caractéristiques prennent d'autant plus d'importance que le réseau est maillé. Dans ce cas, plusieurs itinéraires concurrents peuvent avoir une distance de parcours similaire et le choix de l'itinéraire sera dépendant des autres caractéristiques du réseau (**Fig. 37**).

En milieu urbain il apparait donc comme étant très important de pouvoir caractériser de manière fine le réseau piéton.

Plusieurs indicateurs apparaissent comme étant dimensionnant pour la caractérisation de l'offre :

- la qualité d'aménagement (trottoir, agrément, largeur) ;
- le volume de trafic voiture ;
- la caractérisation du socle actif, soit le rez-de-chaussée des bâtiments (commerces, activités...).

La qualité d'aménagement, notamment en termes de largeur de trottoir et d'agrément n'est généralement pas déterminante pour juger si un parcours est possible ou pas. Dans la majorité des cas, le choix d'un itinéraire ne se pose pas non plus en termes de capacité, donc de largeur disponible en fonction du flux de piéton. Parfois l'agrément devient un paramètre pénalisant. Une rue commerçante très attractive est un bon itinéraire pour flâner et faire des achats mais un mauvais itinéraire pour des déplacements usuels

La prise en compte du trafic est un attribut qu'il faut pouvoir encore analyser et dont il faut pouvoir observer mieux les impacts sur les comportements. Dès 15-20'000 véh/j une rue devient trop bruyante pour qu'une conversation entre deux personnes soit facile. Selon la largeur du trottoir, la vitesse et le volume de trafic, le piéton ressentira un danger physique en plus de la pression du trafic. Cette perception négative incite souvent à choisir des itinéraires plus calmes dans des rues secondaires. La perception du danger est par contre réduite avec du stationnement latéral ou des arbres qui créent un filtre, un écran par rapport au danger du trafic. A notre connaissance ces paramètres ne sont pas quantifiés.

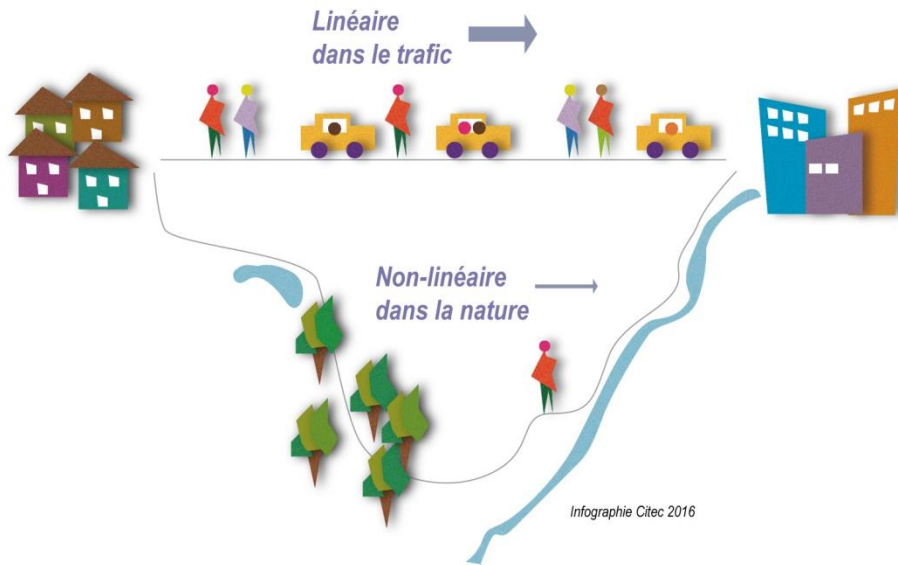


Fig. 36 Peu de choix d'itinéraire – distance prépondérante

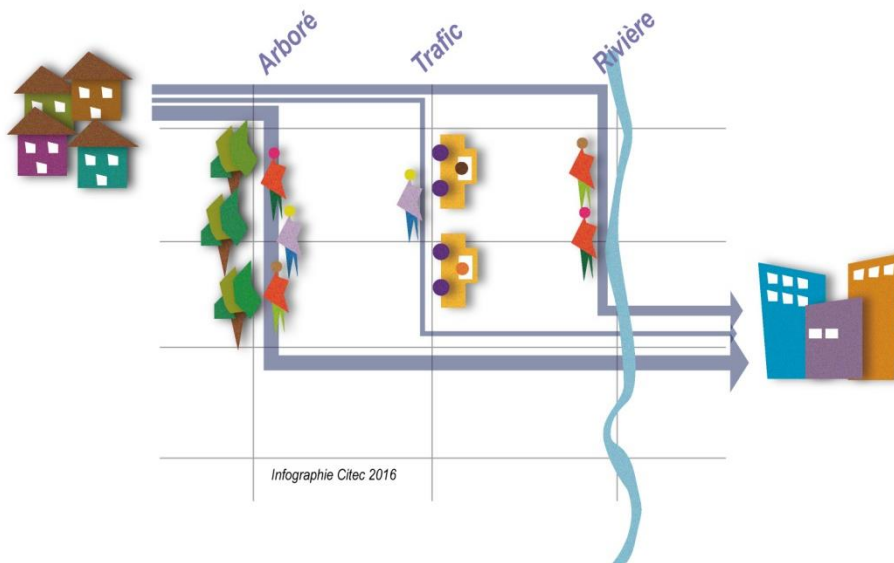


Fig. 37 Réseau très maillé – importance de la qualité des itinéraires

Le socle actif constitue à la fois un attribut d'attrait du réseau et un générateur de déplacement qui vient renforcer ou affiner la matrice interzone. Le socle actif est un terme qui rappelle que certains bâtiments ont un rez-de-chaussée en forte relation avec la rue et d'autres pas (qu'il s'agisse de logements ou d'activités). Lorsqu'un commerce occupe le rez-de-chaussée, il génère une clientèle, donc un flux de piéton. Si le commerce est borgne ou avec une vitrine, l'attractivité pour la rue est différente. L'enjeu n'est pas d'identifier les zones commerciales pour construire le réseau piéton mais d'identifier les rez-de-chaussée qui ont une valeur publique. Une entrée de cabinet de médecin ou de physiothérapeute, une bibliothèque publique, une poste, sont tous à des degrés divers des éléments de socle actif. Ils renforcent l'attractivité d'un parcours piéton. Le réseau piétonnier doit donc en tenir compte dans ses attributs. Les tentatives de formaliser un attribut pour cette dimension ont abouti à proposer 4 catégories de socles actifs :

- Un rez-de-chaussée continu sur les deux côtés de la rue pour des activités dont l'attractivité porte sur l'ensemble de la ville ou de l'agglomération : par exemple, le centre commerçant d'une ville,
- Un rez-de-chaussée discontinu ou peu commerçant mais dont les activités ont une attractivité sur l'ensemble de la ville : par exemple, des équipements ou des administrations en périphérie du centre historique
- Un rez-de-chaussée continu sur les deux côtés de la rue pour des activités dont l'attractivité est liée au quartier (centralité de quartier)
- Un rez-de-chaussée discontinu ou non commerçant pour des activités de quartier (animation diverses, cabinet médical, physiothérapeute, etc.)

Pour certains publics, des attributs spécifiques sont aussi à considérer et, peut-être, à prendre en compte :

- Les enfants sur le chemin de l'école sont souvent éduqués pour parcourir un itinéraire sûr avec traversée des rues en des points précis (carrefour à feux, carrefours avec une patrouilleuse aux heures d'entrée et sortie d'école). Comme ces flux peuvent représenter 20 à 35% des flux totaux d'une section, il faut examiner la pertinence d'en tenir compte dans la construction d'un modèle.
- Les personnes âgées sont souvent très sensibles aux possibilités de se reposer sur un parcours. La présence de banc peut être un facteur à considérer dans l'attractivité d'un tronçon. De même l'aménagement de trottoirs abaissés peut être discriminant. Malgré les importantes améliorations réalisées ces dernières années pour intégrer les personnes à mobilité réduite, de nombreux obstacles subsistent dans l'espace public. Il semble illusoire de considérer ce niveau de détail (bancs, abaissements de trottoirs) dans la construction du réseau piéton mais il est cependant recommandé d'apprécier si ces éléments sont discriminants dans un cas concrets et doivent être pris en compte par un attribut de confort ou d'agrément.

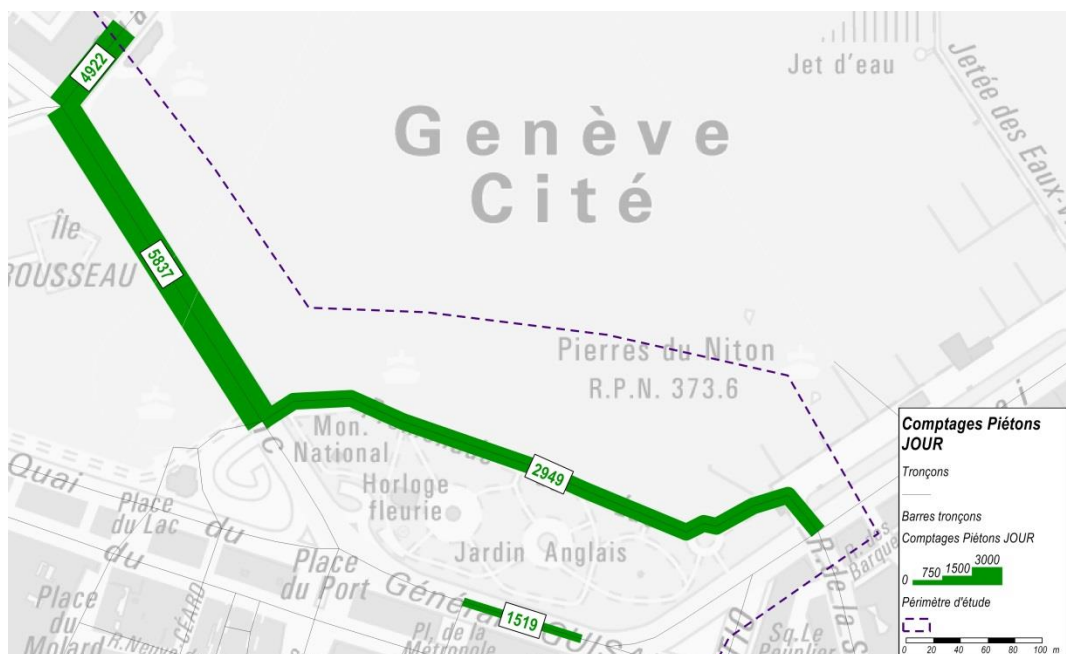


Fig. 38 Un exemple genevois : les comptages piétons montrent que les bords du lac par le parc du Jardin Anglais sont plus attractifs que par le Quai du Général Guisan à forte circulation

7.2.2 Nécessité d'affiner le réseau piéton

Pour ce qui est des étapes effectuées à pied, 60% comptent 500 mètres ou moins, y compris pour se rendre aux arrêts des TP et pour en revenir. Cette moyenne suisse se vérifie dans le canton de Fribourg : agglomération de Fribourg : 62%, Bulle 57%, canton : 61% ».

Compte tenu des distances de déplacement à pied, la modélisation de ce mode nécessite de **disposer d'un réseau fin**, intégrant notamment **toutes les voies potentiellement utilisées par des marcheurs**, y compris les voies interdites à la circulation automobile.

La codification des réseaux s'appuie généralement sur des bases de données géographiques dont l'objectif de départ est de servir de base aux applications de navigation GPS. En effet elles ont l'avantage d'avoir déjà une représentation en graphe des infrastructures. Pour la codification des réseaux pour les véhicules particuliers, les voiries les plus fines sont supprimées. Cependant, pour les réseaux piétons, si on souhaitait avoir une représentation plus fine que les graphes source, pour examiner, par exemple, les trottoirs d'une voirie, il faut codifier de manière semi manuelle la totalité de ces infrastructures.

La question de la pertinence de dissocier les trottoirs de chaque côté de la voirie est abordée au chapitre 4. OpenStreetMap reste une source très complète mais demande un temps non négligeable de nettoyage et de sélection des informations intéressantes à garder pour décrire le réseau à l'étude. Dans le cas de Genève, les informations sur les itinéraires qui traversent des parcs ainsi que les circuits piétons sont très précieuses et ont aidé à affiner le réseau. La figure ci-après détaille en gris le réseau de base du MMT, en vert les tronçons ajoutés pour le modèle vélo et en bleu ceux utiles pour le modèle piéton.

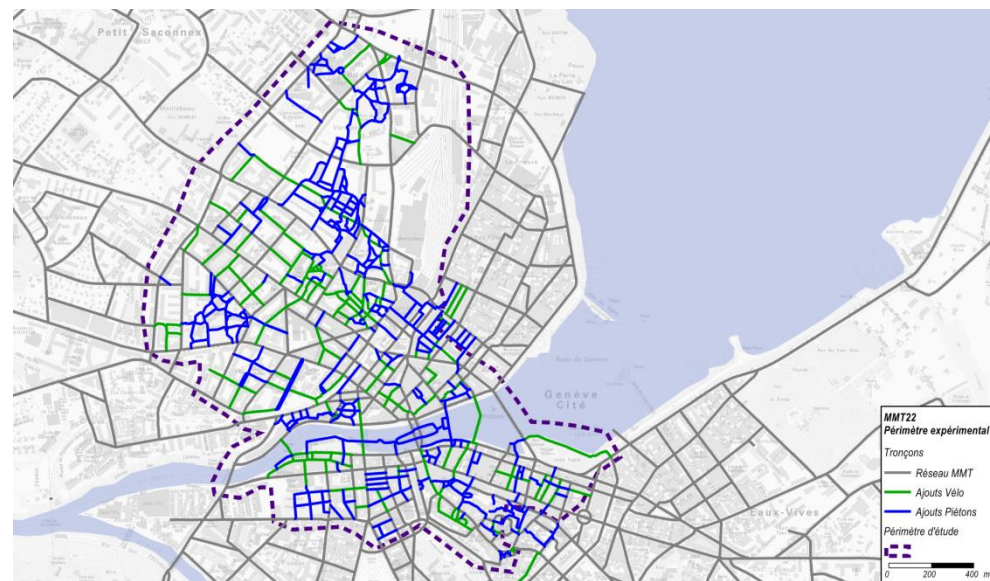


Fig. 39 Exemple de codification du réseau marche à pied à Genève : réseau plus fin

7.3 Modélisation des carrefours

Dans la codification des réseaux VP, il est usuel de définir des pénalités temporelles associées aux traversées de carrefours. Pour les modes doux, il est tout-à-fait possible de définir, de manière analogue, des pénalités pour représenter la difficulté à traverser certains types de carrefour.

Les attributs associés aux carrefours, dans le cas de la modélisation des modes doux, doivent servir à caractériser principalement les effets suivants :

- Les impacts en termes de temps de parcours, puisque, comme pour les modes motorisés le franchissement d'un carrefour peut impliquer un temps d'attente ;
- Les impacts en termes de sécurité : les carrefours sont généralement des points de discontinuité des aménagements cyclables ;
- Les impacts en termes d'effort supplémentaire liés au besoin de s'arrêter et repartir (ce facteur est plus important pour le vélo).

Les logiciels de modélisation permettent de définir des pénalités associées aux traversées de carrefour, à l'aide d'attributs des ou des mouvements tournants. Par exemple, dans le MMT, les nœuds représentant les carrefours sont organisés par types. Des pénalités temporelles par défaut sont associées à chaque mouvement tournant selon le type de nœud, le type de mouvement et les priorités des flux. Avec 8 types de nœud, 4 types de mouvements tournants et 4 types de priorités des flux, il y a 128 pénalités temporelles à définir.

Pour le vélo, des stratégies pragmatiques de codification peuvent prendre appui sur une classification similaire. Il est également possible d'utiliser le trafic VP total de chaque nœud. Dans ce projet, cette possibilité a été discutée dans la commission de suivi (Begleitkommission) mais elle n'a pas été retenue pour des considérations de priorités du projet.

8 Matrice empirique de déplacements

Dans les sections 4 à 7 nous avons vu que la distance faible des déplacements en modes doux conduit au besoin d'avoir une codification des zones et du réseau plus fines que pour les modes motorisés.

Cette section décrit la manière de définir une matrice origine destination observée

8.1 Quelle représentativité de la matrice de référence ?

Lors de la construction d'un modèle à quatre étapes, il est nécessaire de définir des matrices origine-destination par mode pour :

- Caler le réseau pour l'affectation : la définition des paramètres du réseau se fait par itérations. On affecte la matrice de référence et on modifie les paramètres de manière à reproduire les valeurs cibles du calage (données de comptage principalement et temps de parcours si ceux-ci sont disponibles).
- Caler les trois premières étapes de la séquence de modélisation : Une fois que les réseaux sont calés, on peut procéder au calage des trois premières étapes du modèle. L'objectif de ce calage est d'obtenir des paramètres pour la génération, distribution et répartition modale permettant de reproduire les matrices de référence.

Les enquêtes déplacements (MRMT en Suisse) sont la principale source de données pour la constitution des matrices de référence. En général, le taux de sondage de ce type d'enquête est d'entre 1 et 2%, à l'exception de certains pays comme le Royaume Uni ou le Canada où le taux peut dépasser 5%.

La construction des matrices OD de référence est problématique en raison de la quantité de données nécessaires pour avoir une valeur statistiquement significative dans chaque case. Celle-ci est une difficulté récurrente dans la modélisation macroscopique.

À quantité de données constante, l'utilisation d'un zonage fin conduit à avoir un grand nombre de cases de la matrice avec un effectif enquêté faible, voire nul. Il y a donc un problème de représentativité statistique de la matrice :

- Pour les cases à faible effectif, le nombre de déplacements obtenu avec un intervalle de confiance large ;
- Pour les cases sans effectif, il est impossible de savoir si les zéros correspondent à une absence de déplacement ou à un aléa dans l'échantillonnage.

Pour les modes doux le problème de représentativité de la matrice OD est amplifié par la combinaison de deux facteurs : les distances de déplacement et les parts modales.

Pour le vélo, on peut utiliser un zonage proche de celui utilisé pour les modes motorisés pour représenter les déplacements car cette taille de zone entraîne peu de déplacements intrazonales (par définition non affectables). Cependant, comme la part modale est faible, le degré d'incertitude sur chaque case de la matrice est beaucoup plus élevé que pour les modes motorisés.

Pour la marche à pied, la part modale est élevée, donc le nombre de déplacements recensés aussi mais les déplacements sont courts. Si on utilise les mêmes zones que pour les autres modes, on aura une part de déplacements intrazonales très importante. Si on utilise un zonage plus fin, on retrouvera la configuration proche de celle du vélo, avec moins d'intrazonales mais une moins bonne fiabilité statistique. Par ailleurs, il faut également prendre en compte les considérations de confidentialité dans la diffusion de

données. L'affinement du zonage peut poser la question du respect de l'anonymat des personnes interrogées. Pour les piétons il faut encore tenir compte d'un biais probable entre enquête et observations. Il est en effet très vraisemblable qu'un certain nombre de déplacements (ou d'étapes) soient négligés ou mal documentés dans les enquêtes car la personne enquêtée aura tendance à simplifier certains mouvements.

La question de la représentativité de la matrice OD de référence est illustrée dans la **Fig. 40**. On suppose qu'on a une ville « filiforme » (un segment) avec le centre-ville à l'ouest et la périphérie à l'est. Deux découpages sont appliqués à ce territoire :

- le zonage 1 est constitué de 4 zones, A, B, C et D ;
- le zonage 2, plus fin que le zonage 1, sous découpe chaque zone de celui-ci en 2. Il est ainsi constitué de 8 zones A1, A2, B1, B2, C1, C2, D1 et D2.

Au niveau des matrices, on observe que :

- Pour la MAP, avec le zonage 1, les déplacements se concentrent sur la diagonale (intrazones). A proximité du centre-ville, les déplacements enquêtés sont nombreux et il y a quelques déplacements interzones. Avec le zonage 2, on a plus de déplacements interzones, mais la représentativité statistique de chaque OD est réduite
- Pour les vélos, avec le zonage 1, la matrice comporte des déplacements sur un grand nombre d'OD, même si l'effectif enquêté est insuffisant. Avec le zonage 2, on a une matrice avec des « trous » (cellules sans déplacement enquêté) à proximité de cellules où il y a des déplacements. Il devient difficile de dire s'il s'agit de zones sans déplacement à vélo ou si c'est simplement un problème d'échantillonnage.

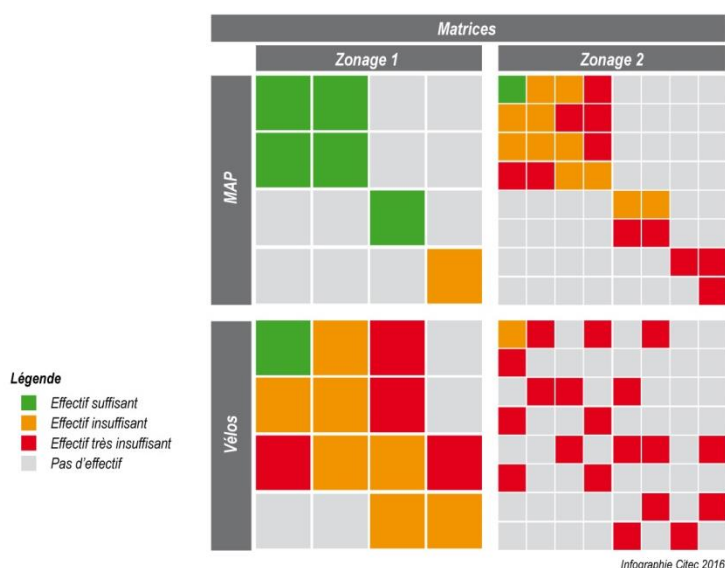


Fig. 40 Impact du zonage et de la distribution des distances de déplacement sur la fiabilité statistique des matrices OD

Dans une démarche de modélisation, il est nécessaire d'avoir des données compatibles avec l'approche adoptée. Pour la modélisation des modes doux, il faut se donner les moyens de :

- Produire les données nécessaires (par exemple, en augmentant le taux de sondage), ce qui est en général coûteux.
- Faire appel à des méthodes utilisant des données « auxiliaires ». C'est-à-dire, optimiser l'information disponible.

8.2 Données auxiliaires : quelles méthodes ?

Pour pallier à l'impossibilité d'avoir des données de flux OD avec un niveau de précision suffisant, il est nécessaire de faire appel à des données supplémentaires. L'utilisation de celles-ci permet d'affiner la structure de la matrice OD, mais elle demande un effort de calage supplémentaire.

Traditionnellement, il y a deux grandes familles d'approches pour produire des matrices OD. L'une fait appel à des données socioéconomiques ou géographiques et l'autre fait appel à des comptages.

8.2.1 Utilisation de données socioéconomiques ou géographiques

En général, on dispose de la localisation de la population et des emplois sur le secteur d'étude avec une grande précision. Celles-ci sont souvent définies à l'échelle des zones (nombre d'habitants, nombre d'emplois...), mais il peut s'agir également d'une distribution observée des distances de déplacement, d'une part modale... Lorsque l'on dispose de distributions de variables socioéconomiques à l'échelle zonale, il est usuel d'utiliser des méthodes d'ajustement proportionnel itératif (*iterative proportional fitting*) aussi connues sous le nom de « calage sur marges » [116], [117], mais d'autres approches sont possibles. Dans cette optique, les trois premières étapes de l'approche classique de modélisation : génération distribution et répartition modale peuvent être vues comme une méthode d'utilisation des données disponibles pour déterminer les valeurs des matrices OD.

8.2.2 Utilisation de données de comptages

Il y a aussi des **méthodes d'établissement d'une matrice OD à partir de comptages**. Elles ont connu un développement continu en fonction des nouvelles techniques de calcul disponibles [118]–[126]. Le principe général de ces méthodes repose sur l'hypothèse que le réseau est suffisamment calé pour que les itinéraires s'y répartissent de manière conforme à la réalité. A partir de cette hypothèse, ces méthodes déterminent la matrice avec la probabilité la plus forte de maximisent la probabilité Ces méthodes nécessitent un réseau préalablement calé ou à défaut un processus itératif adaptant les paramètres du réseau et la matrice OD.

En effet, traditionnellement, les modèles à quatre étapes sont calibrés étape par étape, indépendamment (du moins dans un premier temps). Le recours à des variables auxiliaires conduit à se retrouver dans un cadre plus complexe, « d'estimation jointe » de modèles.

8.3 Expériences dans le cas genevois

En vue de définir les matrices OD observées, permettant de faire le premier calage des réseaux, plusieurs méthodes ont été appliquées.

8.3.1 Matrice vélo

Comme établi précédemment (section 8.1), la définition de la matrice vélo présente certaines difficultés compte tenu des données disponibles.

Dans cette recherche, nous avons retenu trois techniques pour définir la matrice OD à affecter. Leur différence réside dans les données auxiliaires utilisées.

La première technique consiste à utiliser les données du MRMT 2010 sur Genève, sans retraitement.

- On commence par filtrer, dans le fichier déplacements, tous ceux dont le mode est vélo et dont au moins l'une des extrémités est située dans la ville de Genève ;
- On associe à chacune des extrémités des déplacements retenus la zone fine MMT dans laquelle elle se trouve
- On agrège tous les déplacements par zone d'origine et zone de destination, en prenant en compte un facteur de redressement pour avoir un volume journalier.

En procédant de cette manière, on retrouve les difficultés classiques de construction des matrices OD. Chaque case de la matrice a un intervalle de confiance très large autour de la valeur retenue. En particulier, pour les cases nulles, on ne peut pas dire *a priori* s'il s'agit réellement d'OD sur lesquelles il n'y a pas de flux (en raison, par exemple d'une absence de générateurs ou d'attracteurs) ou si, tout simplement, il s'agit d'un « faux » zéro lié à l'échantillonnage.

La **deuxième technique** repose également sur les données du MRMT 2010, mais **intègre des données auxiliaires**. L'idée est de reconstituer une matrice de flux sur un zonage plus agrégé, ce qui permet d'améliorer la fiabilité statistique des flux sur chacune des cases. Cette matrice est ensuite « éclatée » en fonction de variables auxiliaires comme la population ou l'emploi (**Fig. 41**).

Dans l'exemple du modèle de Genève, seulement la somme population+emplois a été retenue comme variable auxiliaire.

La **troisième méthode** peut être vue comme une extension de l'utilisation de variables auxiliaires. Il s'agit de reprendre les résultats des 3 premières étapes de la chaîne de modélisation du MMT. À l'issue de la répartition modale, on obtient une matrice vélo. On peut dire que celle-ci intègre non seulement la population et les emplois comme variable auxiliaires, mais également toutes les variables explicatives retenues dans le modèle. Dans le cas de Genève, plusieurs contrôles ont été définis pour garantir une forme la plus plausible possible de la matrice vélo (des contrôles de distance ont notamment été inclus) même si le MMT ne disposait pas d'un module d'affectation des vélos à proprement parler [127].

De manière générale, le degré de finesse nécessaire pour la matrice OD conduit à avoir besoin de beaucoup de données. Les ressources nécessaires pour un modèle opérationnel sont donc considérables.

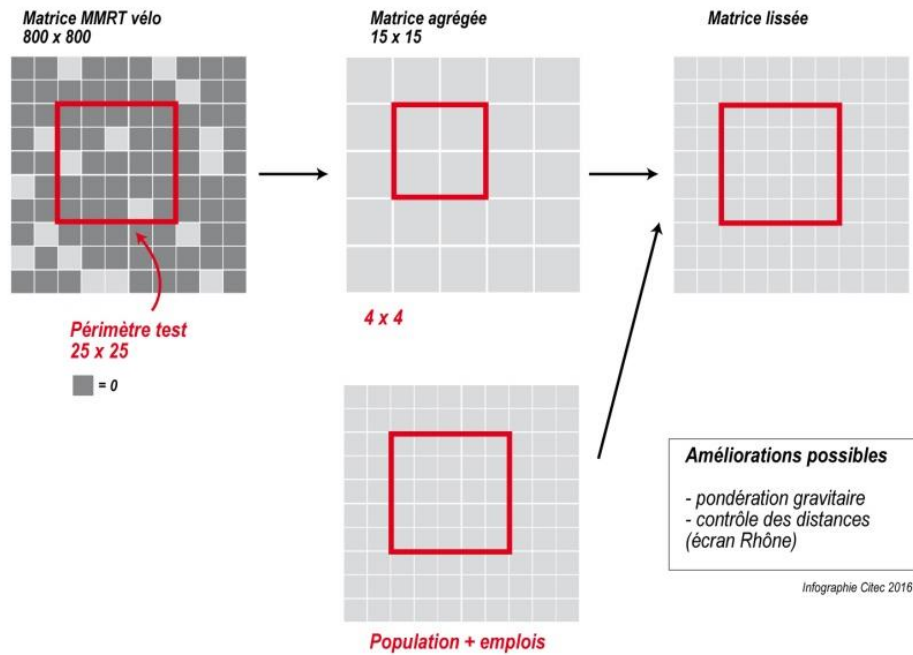


Fig. 41 « Éclatement » de la matrice MRMT 2010 pour les vélos

8.3.2 Matrice piéton

Si la problématique de l'échantillonnage se pose moins pour les piétons que pour les cyclistes, le nombre d'usagers de ce mode étant plus important, il apparaît tout de même qu'une utilisation brute de la matrice issue du MRMT est peu pertinente :

Au cœur de ville de Genève une majorité d'origine-destination (75%) présente un nombre de déplacement nul. Cette valeur est a priori trop élevée mais elle n'est pas non plus absurde.

Afin de pallier à cette « discrétisation » de la matrice il a été choisi de constituer une matrice à partir de la matrice du MRT.

Pour l'éclatement de la matrice piéton, une formulation gravitaire a été retenue. La fonction d'impédance est une exponentielle simple, appliquée à la distance (**Fig. 42**).

Les paramètres de cet éclatement sont fixés de manière :

- A reproduire la distance moyenne observée dans le MRT
- A ce que chacune des zones fines émette et attire le même nombre de déplacement que dans le MRT

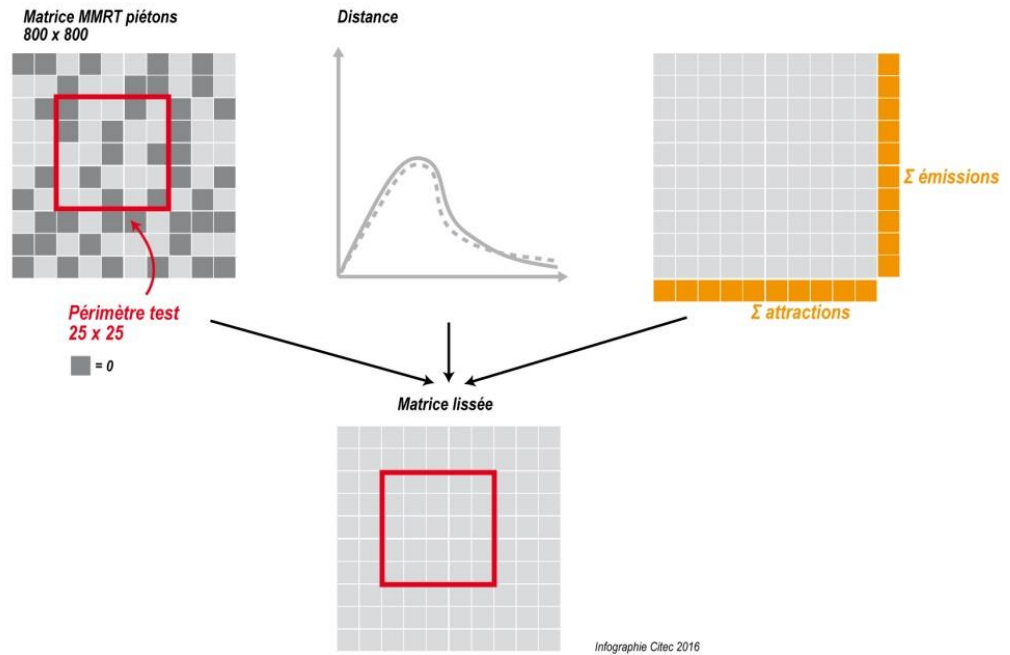


Fig. 42 Lissage de la matrice MRMT 2010 pour les piétons

8.3.3 Enseignements des tests sur Genève :

Pour de prochaines expérimentations, il faut pouvoir améliorer la qualité initiale de la matrice, par exemple avec les approches suivantes :

- Surreprésenter les usagers vélos dans le MRMT. Mais cette approche risque de conduire à un nombre très élevé de personnes interrogées pour pouvoir identifier suffisamment de cyclistes (qui ne représentent que 5% de la population)
- Concevoir les sections de comptages de manière à pouvoir plus facilement corriger ou valider la matrice. Il faut, par exemple, prévoir de décomposer le territoire en écrans pour pouvoir ainsi vérifier la justesse de certaines parties de la matrice.

9 Affectation

L'étape d'affectation correspond à la confrontation des souhaits de déplacement (matrices OD) aux possibilités effectives de se déplacer (réseau). Dans un modèle macroscopique, l'affectation permet de déterminer des chemins permettant d'aller des origines vers les destinations du périmètre d'étude et d'attribuer un volume de déplacements à chacun de ces chemins. Un chemin est une succession ordonnée d'éléments du réseau (tronçons, nœuds, connecteurs...) permettant d'aller d'une zone d'origine vers une zone de destination.

Ce chapitre essaye de représenter au mieux les enjeux méthodologiques du calage d'un modèle d'affectation. Dans les chapitres précédents, une bonne partie des éléments caractérisant la structure du modèle d'affectation ont été abordés, notamment en ce qui concerne la codification du réseau. Ce chapitre se focalise un peu plus sur les éléments comportementaux du modèle.

9.1 Qu'est-ce que caler un modèle d'affectation ?

La question du calage de l'affectation est relativement complexe et peu abordée, même en ce qui concerne les modes motorisés. Pour faciliter la présentation, il convient de définir un certain nombre de concepts. Dans cette optique, on prend appui sur les travaux de Abraham [129], relatifs à la calibration des modèles urbains, qui propose la représentation réduite suivante du modèle :

$$Y = G(\theta, X) \quad (1)$$

Dans cette représentation, Y correspond aux *outputs* du modèle. X et θ sont les *inputs*. X désigne les *inputs* connus ou observés, c'est-à-dire ceux des données disponibles. θ désigne les paramètres (*inputs* non-observés). La fonction G donne l'agencement entre les *inputs* connus et inconnus, qui permet d'obtenir les *outputs*.

Les modèles urbains, dont les modèles de déplacements, sont généralement composés d'un ensemble de sous-modèles. La représentation simplifiée donnée dans l'équation (1) s'applique à un modèle dans son ensemble mais elle peut s'appliquer également à chacun des sous-modèles. Si on l'applique à l'étape d'affectation pour les modes doux :

Les *inputs* X de l'affectation sont la matrice OD et la géométrie du réseau (en particulier le positionnement des connecteurs et les aménagements cyclables).

Les *outputs* Y de l'affectation contiennent notamment les volumes de trafic sur les différents arcs du réseau, les temps de parcours sur les arcs, voire les mêmes quantités sur les chemins entre les différentes OD du secteur étudié.

La fonction G est la combinaison de différents algorithmes et fonctions : génération des chemins, fonction de temps généralisé, algorithme d'affectation, etc.

Pour une certaine structure du modèle, les paramètres θ dans (1) sont constitués des paramètres de la fonction de temps généralisé, ainsi que d'autres paramètres de l'algorithme d'affectation comme ceux caractérisant les distributions de probabilité dans le cas de l'affectation stochastique.

Le calage du modèle consiste à estimer la valeur des paramètres à partir de multiples observations de X et Y . L'application du modèle consiste à prédire la valeur de Y à partir d'observations de X , en utilisant les valeurs des paramètres obtenues pour le calage.

Dans la pratique usuelle de la modélisation, pour les VP et les TC, peut le calage peut prendre 3 formes, selon les données disponibles :

- calage en débit : c'est la pratique la plus développée Il s'agit de s'assurer que les résultats de trafic correspondent aux comptages ;
- calage en temps de parcours : il s'agit de comparer les temps modélisés aux temps réels ;
- calage en flux origine-destination : consiste à vérifier la répartition entre les différents chemins d'une OD. Cette dernière forme de calage est facilitée par la disponibilité croissante des données GPS.

En ce qui concerne les modes doux, et le vélo en particulier, le calage en débit et celui en flux origine-destination sont les plus appropriés, puisque l'hétérogénéité des cyclistes risque de jouer un rôle important sur les temps de parcours (santé, VAE...).

9.2 Quel algorithme d'affectation pour les modes doux ?

Pour organiser la présentation, il est utile de commencer par identifier certaines caractéristiques que doit posséder une méthode d'affectation des modes doux (vélo en particulier) pour être pertinente.

La première caractéristique consiste à utiliser une distribution de probabilité pour le choix d'itinéraire, permettant de tenir compte des approximations du modèle. En effet, la minimisation du temps, même généralisé, ne permet pas d'expliquer toute la complexité du comportement. De plus, elle ne tient pas compte de la diversité de ces comportements à travers la population. Les flux seront affectés sur les chemins proportionnellement à la probabilité d'utiliser ceux-ci.

La deuxième caractéristique est qu'il faudrait idéalement tenir compte de la mixité du trafic et de l'interaction entre les différents modes de transport (les flux de piétons et de vélos sont ralentis par le flux de voitures). Bien que des modèles aient été proposés [130] aucune méthode éprouvée n'est disponible actuellement pour intégrer dans un modèle d'affectation. **Dans le cas de ce mandat, il ne semble donc pas fondamental de tenir compte de la contrainte de capacité.** En revanche, **il est plus important de tenir compte des variables autres que le temps ou le coût de parcours qui ont un impact sur le choix d'itinéraire** (telles que la présence d'aménagements spécifiques, la pente, etc. cf. chapitres 2 et 3).

Pour prendre en compte ces deux caractéristiques, la méthode d'affectation usuelle la plus adaptée à la représentation des itinéraires cyclables est l'**affectation stochastique** [131]. Plus précisément, en absence de contrainte de capacité, il s'agit du *stochastic network loading problem* [132] (temps de parcours constants sur les infrastructures).

Dans sa version la plus simple et répandue, cette méthode repose sur les principes suivants (pour une OD) :

1. Une première étape permet de trouver l'ensemble de chemins possibles entre les différentes origines-destinations.
2. Une deuxième étape permet de répartir la demande de la matrice entre les différents chemins (en général une distribution de type logit est retenue).

La difficulté principale de mise en œuvre vient du nombre très élevé de chemins reliant une origine à une destination dans un réseau de transport. Deux catégories de méthodes existent : sans, et avec énumération des chemins.

La première est particulièrement intéressante au niveau du temps de calcul. Elle consiste à considérer le choix d'itinéraire comme une suite de choix d'arcs, effectués à chaque

nœud du graphe. Cette méthode, proposée initialement par [131], souffre de deux limitations majeures.

- La première est la « myopie » de la méthode, c'est-à-dire que le choix d'un arc se fait localement, en utilisant une approximation grossière de son efficacité globale (en l'occurrence, le fait que l'arc permette de s'éloigner de l'origine et de se rapprocher de la destination).
- La seconde est que la corrélation importante entre les chemins, due à des sections communes, est ignorée, produisant une surestimation du flot sur les chemins ayant beaucoup de tronçons en commun avec d'autres.

Des méthodes récentes visent à lever ces limitations ([133], [134]).

La seconde catégorie de méthodes commence par extraire de l'immense ensemble de chemins un sous-ensemble de taille gérable, soit en utilisant des heuristiques comportementales [135], soit en utilisant des méthodes d'échantillonnage [136], [137].

Ensuite, un modèle de choix d'itinéraire est appliqué à ce sous-ensemble. Le modèle le plus simple est un modèle logit, corrigé pour tenir compte des sections communes soit par un *path-size* [138], soit par un *C-logit* [139]. Mais des modèles plus complexes comme le « cross-nested logit » peuvent être utilisés [140], [141].

Pour la recherche, l'algorithme choisi était celui du logiciel Visum (affectation stochastique). Ce point sera présenté plus en détail au chapitre 9.5.

9.3 Génération des chemins alternatifs et stabilité des comportements

Les taux marginaux de substitution observés dans les différentes études de choix d'itinéraire à partir de données de préférences révélées sont assez différents d'une étude à l'autre. Ceci contraste avec un des avantages des modèles de choix discret souvent mis en avant : leur transférabilité, c'est-à-dire la possibilité d'utiliser un modèle estimé dans un contexte (spatial ou temporel) dans un autre contexte.

En effet, dans ce type de modélisation l'unité analysée est l'individu et le processus décisionnel de celui-ci est reproduit plus fidèlement qu'avec, par exemple, une approche agrégée. La meilleure représentation de la prise de décision à l'échelle individuelle se traduit par une robustesse accrue dans le cas de transferts (spatiaux ou temporels) de modèles [91], [92]. On s'attendrait donc à avoir des taux marginaux de substitution similaires pour deux modèles estimés dans des contextes différents. Les résultats des modèles de choix de chemin vont à l'encontre de ce postulat.

Deux explications possibles peuvent être mises en avant.

1. La première et principale explication est assez classique. Elle réside dans une prise en compte insuffisante de l'hétérogénéité des comportements dans les modèles. Si les élasticités varient à travers la population, un modèle avec un paramètre unique va non seulement donner des résultats erronés, mais ces résultats vont varier d'un endroit à un autre et d'un échantillon à l'autre.
2. La deuxième explication est la difficulté à définir l'ensemble des chemins parmi lesquels le choix des individus se fait. En réalité, les enquêtes de préférences déclarées avec des traces GPS permettent de connaître l'itinéraire effectivement retenu. Mais, pour modéliser le choix du chemin, il est non seulement nécessaire de disposer des caractéristiques des chemins choisis par les individus, mais également des caractéristiques des chemins alternatifs [60] (voir **Fig. 43**). Pour estimer les modèles, ces derniers sont définis plus ou moins arbitrairement, selon différentes techniques [93].

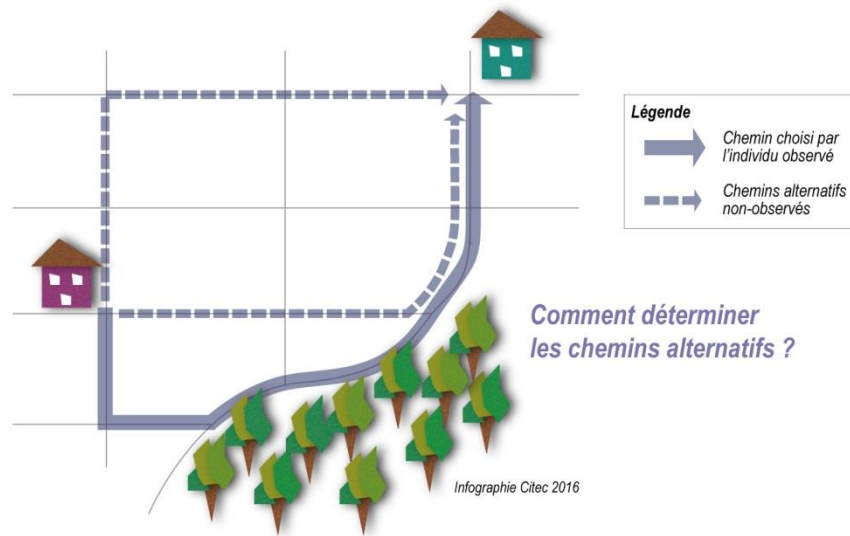


Fig. 43 Comment identifier les chemins possibles pour une OD ?

9.4 Différentes méthodes de calage de l'affectation selon les données disponibles

La méthode de calage va dépendre de la disponibilité des données pour caractériser l'état à reproduire. Dans le cas des modes motorisés, on dispose, en général, uniquement de données sur les trafics, sous forme de comptages, et de données de temps de parcours, même si les données de type trace GPS ont connu un développement intéressant. Pour les modes doux, comme noté dans le chapitre 3, un recueil de données spécifique est quasiment une obligation. Ce recueil peut consister, comme pour les modes, de comptages mais également il peut être envisageable d'utiliser des données de traces GPS.

9.4.1 Disponibilité uniquement de données de comptage : calage agrégé

Lorsque seulement des données de comptages sont disponibles, on s'inscrit dans un cadre d'analyse et de calage agrégé.

Dans un premier temps, l'analyste définit une structure du modèle comportant un algorithme d'affectation et une spécification de la fonction de temps généralisé. Avec cette structure de modèle, il/elle évalue les sorties du modèle avec un jeu de paramètres de départ, en accord avec son expérience.

Puis, il/elle cherche la meilleure valeur de θ et la meilleure formule pour G de telle manière à minimiser l'écart entre Y prédit et Y observé. Ainsi, il/elle peut être amené à modifier :

- la spécification de la fonction de temps généralisé (inclusion d'autres variables explicatives, adaptation des modalités des variables) ;
- l'algorithme d'affectation (utilisation d'un autre algorithme) ;

- le réseau : les éléments modifiés sont souvent les connecteurs, les caractéristiques des arcs et des mouvements tournants.

Dans la démarche de calage agrégé, la question de plausibilité des valeurs des paramètres est délicate. Les paramètres qui sont optimisés en priorité sont ceux de la fonction de temps généralisé. Il est important de vérifier que la logique interne du modèle est respectée, pour assurer un fonctionnement cohérent de celui-ci en prévision : par exemple, dans le cas des aménagements cyclables, on doit vérifier que, par exemple, la distance constitue une désutilité au déplacement. Si cette vérification peut paraître triviale pour certaines variables comme la distance, elle l'est beaucoup moins lorsque le nombre de paramètres s'accroît et que des effets de corrélation apparaissent.

Une difficulté supplémentaire pour le calage agrégé est que, compte tenu de la complexité de la structure du modèle d'affectation, il est difficile de le formuler comme un problème d'optimisation. **En général, le calage est fait « à la main »** selon un processus itératif d'essai-erreur.

Cette façon de procéder a un grand avantage qui est de permettre au modélisateur de développer une connaissance « intime » du modèle :

- de comprendre les raisons des divergences entre observé et modélisé ;
- d'identifier des stratégies pour améliorer la reproduction de l'observé.

Le calage à la main d'un modèle d'affectation pour les vélos présente cependant une difficulté supplémentaire par rapport au calage d'un réseau VP. Le nombre d'attributs à prendre en compte, et donc de paramètres, est plus élevé. De ce fait, la recherche de la « combinaison optimale » de manière manuelle est plus délicate (nombre de combinaisons à tester croît de manière exponentielle avec le nombre de paramètres, interactions entre paramètres, multiplicité d'*optima* locaux...).

9.4.2 Données GPS et estimation de modèles de choix

Lorsque des données de traces GPS sont disponibles, il est possible d'estimer des modèles de choix d'itinéraire (voir, par exemple, [60]–[62]).

Ces modèles ne correspondent pas, à proprement parler, à des modèles macroscopiques d'affectation, puisqu'il s'agit de modèles estimés à l'échelle individuelle (il s'agit de déterminer la probabilité de choix d'un chemin en fonction de ses caractéristiques et de celles de l'individu qui se déplace). Cependant, ils permettent d'explorer les interactions entre les différents éléments pouvant avoir un impact sur le comportement de choix du chemin, dans un cadre standardisé. Il est possible d'utiliser des méthodes algorithmiques d'estimation (à la place de méthodes « à la main »), qui viennent avec toute une panoplie d'outils statistiques permettant une analyse plus systématique.

Celui-ci est un avantage non négligeable. Lorsque les données de traces GPS ne sont pas disponibles et qu'on calibre les paramètres de la fonction de temps généralisé par essai et itérations, la définition des distributions des paramètres et de leur variabilité est beaucoup plus complexe à mettre en place. Il faudrait faire appel à des méthodes de simulation numérique (Monte-Carlo ou bootstrap, entre autres, voir à ce sujet [142]–[144]).

9.4.3 Calage des paramètres d'affectation à l'aide d'une méthode heuristique d'optimisation

L'automatisation, au moins partielle, du processus d'estimation/calage des paramètres est une démarche souhaitable pour tout type de modélisation. Pour l'affectation vélo, le nombre considérable de variables à tester dans la fonction de temps généralisé rend la recherche d'une automatisation d'autant plus nécessaire. Il est ainsi apparu opportun

d'examiner dans cette recherche la capacité d'une méthode stochastique d'optimisation globale à faciliter le processus de calage. La méthode retenue pour cette étude est l'algorithme GenSA (*Generalised Simulated Annealing* [145]) implémenté dans le logiciel statistique R [146]. Il s'agit d'une méthode heuristique de recherche d'un optimum global. L'algorithme a les caractéristiques suivantes :

- Il explore l'espace des paramètres, dans certaines bornes définies par l'utilisateur, en utilisant une méthode de recherche locale, consistant à appliquer des modifications simples à la solution courante dans des bornes définies par l'utilisateur.
- Une nouvelle solution sera acceptée si elle est meilleure (au sens de la fonction objectif) que la solution courante. Si ce n'est pas le cas, elle sera acceptée de temps en temps.
- La probabilité d'accepter une solution de qualité inférieure dépend d'un paramètre appelé « température », qui diminue progressivement pendant l'application de l'algorithme. Lorsque ce paramètre est élevé, l'algorithme va souvent accepter des solutions moins bonnes, permettant ainsi de diversifier l'exploration de l'espace des paramètres sans rester bloqué par un minimum local.

Pour l'application de la méthode, il est nécessaire de définir une fonction objectif à minimiser. Cette fonction prend la forme d'une distance entre les *outputs* du modèle avec les données d'observation. En se limitant au cas classique de disponibilité des comptages en section, la fonction testée dans cette recherche est une mesure de distance entre les charges modélisées et les comptages journaliers.

L'utilisation de l'algorithme GenSA permet d'explorer l'espace des paramètres de manière proche à ce qui aurait pu être fait dans un calage plus manuel. Comme pour d'autres algorithmes heuristiques, l'application de GenSA ne garantit pas que l'on arrive à un optimum global à la fin du processus. Dans le cas particulier du modèle d'affectation, comme la fonction objectif ne prend pas en compte la structure du réseau, il est possible d'obtenir des résultats aberrants. Lors de chaque application, il est nécessaire de vérifier que la solution finale est conforme à ce que l'on attend : chemins obtenus, conformité avec ce que l'on sait des paramètres *a priori* (signes, ordre de grandeur en rapport avec les autres paramètres...).

On peut utiliser GenSA pour obtenir un premier jeu de paramètres. Une fois que celui-ci a été déterminé, il est plus facile de repartir sur une technique de calage « manuelle ».

Bilan de l'expérimentation :

La recherche automatisée de valeurs de paramètre est très utile. Dans les tests réalisés sur Genève, cette méthode a permis de calibrer les spécifications testées bien mieux qu'on n'aurait pu le faire avec une approche purement manuelle. Dans le cas d'un calage où seulement des données de comptage sont disponibles, le recours à une méthode de ce type est nécessaire.

9.5 Structure générale du modèle et paramètres à intégrer dans le calage

Dans le cadre de la présente recherche, le modèle d'affectation stochastique retenu reprend les caractéristiques les plus répandues pour ce type de modèle (et qui sont des caractéristiques par défaut du logiciel retenu pour l'implémentation, Visum de PTV) :

- Le modèle de choix est de type logit ;
- La similarité entre les différents itinéraires possibles est prise en compte par l'intermédiaire d'un facteur correctif de type C-logit ;
- La recherche des chemins possibles pour chaque OD est réalisée selon la première méthode décrite dans la section 9.2.

9.5.1 Un modèle de choix de type logit

Si l'on suppose que pour une OD, l'ensemble de chemins possibles, C , contient n éléments, l'utilité du chemin i , U_i , est donnée par

$$U_i = V_i + \epsilon_i \quad (2)$$

où V_i est l'utilité observable du chemin et ϵ_i est l'utilité non observable. On suppose que l'utilité observable est une combinaison linéaire de m attributs de i . On a donc :

$$V_i = \sum_{k=1}^m \alpha_{ik} \cdot x_{ik} \quad (3)$$

où x_{ik} est le k -ième attribut parmi les m attributs du chemin i . Deux types d'attributs sont impliqués dans la fonction d'utilité d'un chemin : les attributs liés aux arcs et les attributs liés aux chemins complets. Les attributs liés aux arcs sont obtenus comme la somme des attributs correspondant des arcs composant le chemin (par exemple, la longueur d'un chemin est la somme des longueurs des arcs le composant). Les attributs liés aux chemins complets n'ont pas de correspondant pour les arcs (par exemple la pente maximale le long d'un chemin). Le paramètre α_{ik} est la pondération associée à l'attribut x_{ik} .

Pour obtenir un modèle de type logit, on fait l'hypothèse que ϵ_i suit une loi de Gumbel, indépendante et identiquement distribuée, dont le paramètre d'échelle est noté μ^8 . La probabilité de choisir le chemin i est alors :

$$P_i = \frac{e^{\mu \alpha'_i x_i}}{\sum_{j=1}^n e^{\mu \alpha'_j x_j}} \quad (4)$$

Lors de la détermination des paramètres de l'équation (4), il est impossible d'identifier séparément les paramètres α_{ik} et valeur de μ (on détermine seulement le produit des deux). La valeur des paramètres α_{ik} n'a de sens que pour une normalisation donnée de μ , la plus courante étant $\mu = 1$ (ce qui revient à supposer que la variance des ϵ_i est égale à $\pi^2/6$).

En matière de transférabilité, avant d'utiliser un modèle dans un nouveau contexte, le paramètre d'échelle doit être recalibré.

9.5.2 Correction de la corrélation du terme aléatoire

L'hypothèse faite sur la distribution de l'utilité non observée, qui permet d'obtenir la formulation de l'équation (4), est problématique dans le contexte d'un choix de chemin. Comme certains chemins peuvent avoir des sections communes, les utilités non-observées sont corrélées, ce qui conduit, comme noté dans la section 9.2, à surestimer la probabilité de choix de ces chemins. Comme le nombre de chemins alternatifs est important, il est peu pratique d'incorporer la structure des corrélations entre les utilités non-observées. Pour pallier le problème, on rajoute un terme correctif à l'équation (4). On a retenu le *C-logit* de Cascetta [139], implémenté dans Visum. Pour le calcul de celui-ci, on détermine d'abord un facteur de commonalité (de l'anglais commonality) de la manière suivante :

$$C_{ij} = \frac{l_{0ij}}{\sqrt{l_{0i} \cdot l_{0j}}} \quad (5)$$

⁸ La fonction de répartition de la loi de Gumbel prend la forme $F(\epsilon) = \exp(-e^{-\mu(\epsilon-\eta)})$ où η est un paramètre de position et μ est un paramètre d'échelle. Si ϵ suit une loi de Gumbel, sa variance est $\pi^2/6\mu^2$.

où C_{ij} est le facteur de commonnalité (de l'anglais commonality) entre les chemins i et j , l_{0ij} est la longueur sur les sections communes à i et j , l_{0i} est la longueur sur le chemin i et l_{0j} est la longueur sur le chemin j . Le facteur de commonnalité C_{ij} est égal à 1 lorsque les chemins i et j sont identiques. Il est égal à 0 lorsque les chemins n'ont aucune section commune.

Le facteur de correction à appliquer, CF_i , est donné par :

$$CF_i = \frac{1}{\sum_j C_{ij}} - \frac{1}{1 + \sum_{j \neq i} C_{ij}} \quad (6)$$

L'équation (4) corrigée par ce facteur prend ainsi la forme suivante :

$$P_i = \frac{e^{\alpha'_i x_i} \cdot CF_i}{\sum_{j=1}^n (e^{\alpha'_j x_j} \cdot CF_j)} \quad (7)$$

9.5.3 Définition de l'ensemble des chemins possibles

L'équation (7) permet de faire la répartition de la demande sur une OD entre les différents chemins possibles. La recherche des chemins possibles pour chaque OD est réalisée selon la première méthode décrite dans la section 9.2.

Pour expliquer la démarche, nous faisons appel à la notion de temps généralisé de recherche, TGR_i , définie de la manière suivante :

$$TGR_i = -\frac{VS_i}{\beta \cdot \xi} = -\frac{\sum_{k=1}^m \alpha_{ik} \cdot x_{ik}}{\beta \cdot \xi} \quad (8)$$

où β et ξ sont deux coefficients positifs⁹. Ils permettent de faire la normalisation du paramètre d'échelle μ .

Pour générer l'ensemble des chemins possibles pour une OD donnée, l'algorithme rajoute au temps généralisé de recherche un élément aléatoire, de la manière suivante :

$$TGRS_i = TGR_i + \sigma \cdot TGR_i^{0.5} \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Dans l'équation (9), ε suit une loi normale centrée réduite et σ est un paramètre positif. L'algorithme de génération des chemins fonctionne par simulation :

- une réalisation de ε est simulée ;
- la valeur de $TGRS_i$ pour cette réalisation est calculée pour chaque arc du réseau ;
- le plus court chemin est calculé pour ces valeurs ;
- si ce chemin n'a pas déjà été généré, il est ajouté à l'ensemble de choix ;
- la procédure est répétée jusqu'à ce qu'un nombre d'itérations soit atteint.

Il est également possible de donner des contraintes la longueur et sur la similitude des chemins trouvés lors de la procédure de recherche. La contrainte de longueur consiste à définir une valeur maximale d'écart par rapport au temps généralisé minimum (seuil établi comme une fonction linéaire du temps généralisé minimum). La contrainte de similarité prend la forme d'un test de détournement (les chemins trop similaires ne sont pas souhaitables). Si, pour une OD, il existe un chemin i et l'algorithme de recherche trouve un nouveau

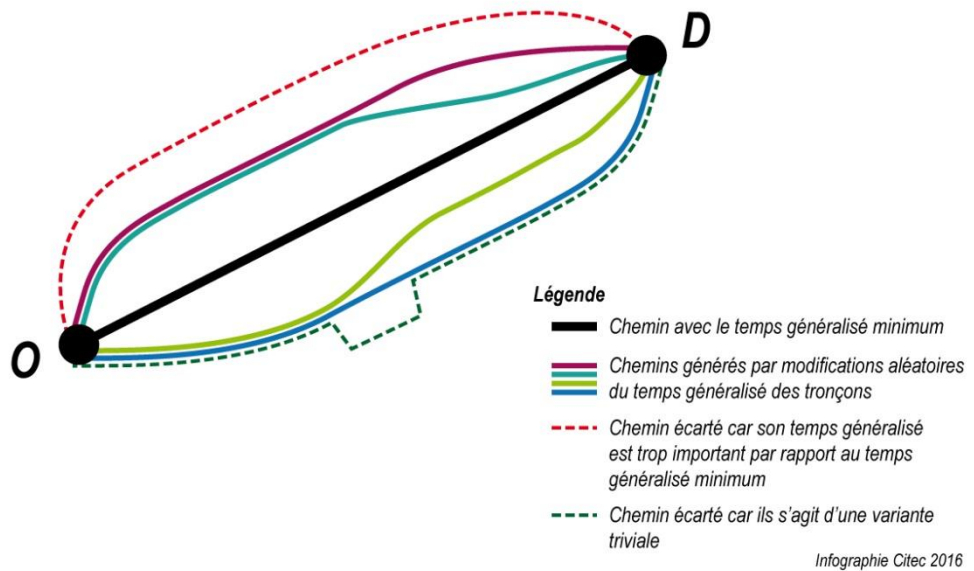
⁹ Ces coefficients sont introduits car ils font partie de l'implémentation logicielle des algorithmes. ξ a été fixé à 1/60 et β est déterminé lors du calage (valeur strictement positive).

chemin j qui partage une section avec i . Si l'on nomme d_i et d_j respectivement les parties de i et j où ces chemins diffèrent, alors le chemin j est écarté si la longueur de d_j est supérieure à la longueur de d_i multipliée par un coefficient.

9.5.4 Représentation schématique de la procédure d'affectation retenue

Il est possible de représenter schématiquement le déroulement de la procédure d'affectation de la manière suivante (**Fig. 44**) :

a) Génération des chemins possibles selon équation (9).



b) Répartition de la demande sur les chemins avec l'équation (7)

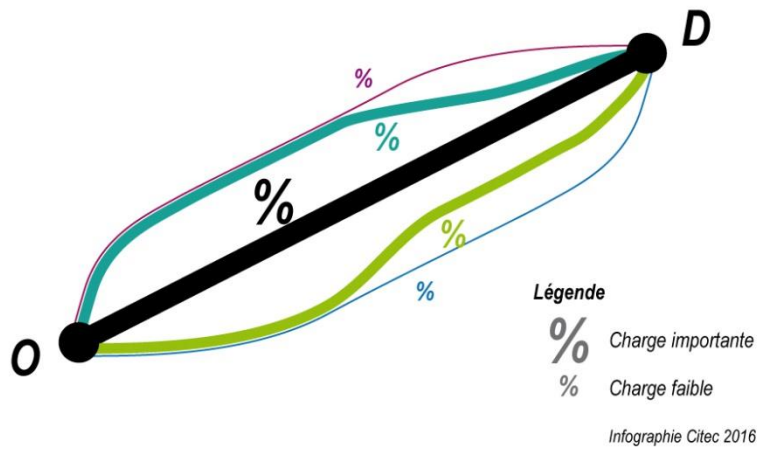


Fig. 44 Représentation schématique de l'affectation stochastique dans Visum

9.6 Définition de l'utilité observable et codification des attributs

La manière de codifier les attributs du réseau est déterminante dans la manière de définir la fonction d'utilité pour le calage de l'affectation. Dans le cas des modèles d'affectation pour les vélos, il faut tenir compte d'un grand nombre d'attributs qui prennent la forme de longueurs. On peut avoir, par exemple, la longueur du chemin, ou la longueur d'un certain type d'aménagement sur un chemin (longueur des pistes cyclables, des bandes...). Ce propos est expliqué plus en détail à partir de l'exemple donné ci-dessous (Fig. 45).

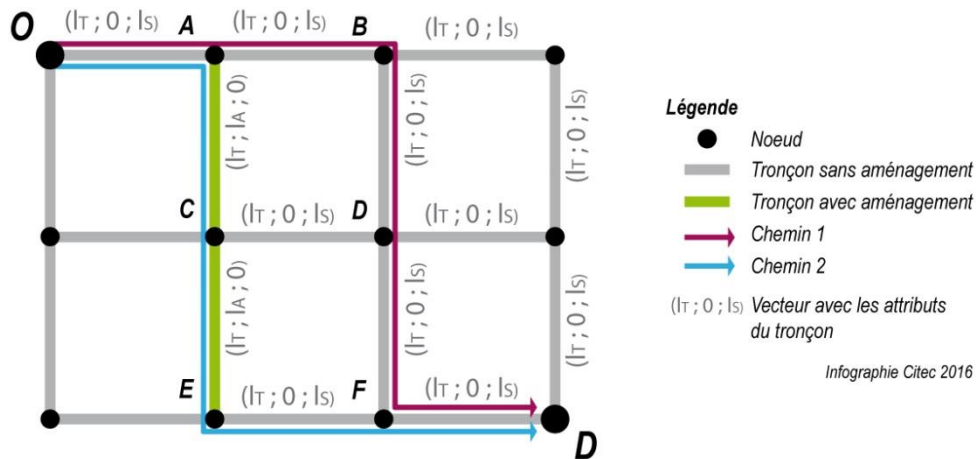


Fig. 45 Calcul du temps généralisé : exemple de deux chemins

Considérons 3 attributs :

- L_t : longueur totale du chemin ;
- L_a : longueur totale du chemin avec aménagement ;
- L_s : longueur totale du chemin sans aménagement.

Dans l'exemple de la Fig. 45 (l est la longueur commune à tous les arcs de l'exemple), nous avons la situation suivante :

	L_t	L_a	L_s
Chemin 1	$5 l$	0	$5 l$
Chemin 2	$5 l$	$2 l$	$3 l$

Nous avons bien entendu toujours que

$$L_t = L_a + L_s. \tag{10}$$

Dès lors, il y a plusieurs manières équivalentes d'écrire les fonctions d'utilité. En effet, seules deux des trois variables sont suffisantes pour décrire un chemin. Par exemple, on pourrait considérer une spécification A :

$$UA = -\beta_a L_a - \beta_s L_s, \tag{11}$$

ou une spécification B :

$$UB = -\gamma_t L_t - \gamma_a L_a, \quad (12)$$

En utilisant (10), on voit que les paramètres de ces deux spécifications sont liés par les relations suivantes :

$$\gamma_a = \beta_a - \beta_s \quad (13)$$

$$\gamma_t = \beta_s. \quad (14)$$

Intuitivement, le chemin 2 devrait être plus attractif que le chemin 1. Dans le cadre de la spécification A , cela revient à dire que

$$UA(2) - UA(1) = -2\beta_a l + 2\beta_s l > 0, \quad (15)$$

qui est vérifiée si $\beta_a < \beta_s$. C'est le « test » qui est effectué à l'obtention des résultats. Si la spécification B est préférée, la même intuition comportementale s'écrit

$$UB(2) - UB(1) = -2\gamma_a l > 0, \quad (16)$$

qui est vérifiée si $\gamma_a > 0$. Vu la relation (13), ces deux conditions sont strictement équivalentes au niveau logique. Ceci montre que **l'interprétation des signes et valeurs relatives des paramètres ne peut se faire que dans le contexte particulier d'une spécification.**

9.7 Synthèse

Ce chapitre a permis de décrire les principaux enjeux pour le calage d'un modèle d'affectation pour les modes doux.

Les caractéristiques des déplacements modes doux font que, parmi les méthodes d'affectation usuellement utilisées, celle qui semble la plus adaptée est l'affectation stochastique.

Les stratégies de calage peuvent porter sur des modifications de structure où sur la valeur des paramètres. Lorsque l'on travaille sur les paramètres, il faut privilégier ceux relatifs à la définition des comportements des agents pour améliorer la lisibilité des résultats du modèle : il s'agit de travailler sur la fonction d'utilité.

Le nombre important d'éléments à prendre en compte dans la fonction d'utilité rend une automatisation, au minimum partielle, de la recherche du meilleur jeu de paramètres très utile.

Comme les attributs à utiliser pour le calage s'expriment souvent comme des longueurs, il se peut que leur « cumul » au sein d'une infrastructure produise des signes contre-intuitifs au premier abord.

Si l'on dispose des données de trace GPS, le calage de modèles désagrégés de choix d'itinéraire peut faciliter l'identification des variables les plus importantes ainsi que des rapports entre coefficients.

Si l'on ne dispose pas de données GPS, l'identification de ces éléments est plus difficile.

10 Test d'affectation vélo : le cas de Genève

Les tests d'affectation réalisés avec le MMT2.2 peuvent être présentés selon ce qui est modifié dans le modèle pour améliorer la proximité entre les volumes modélisés et les comptages. En accord avec la distinction faite dans le chapitre 9, les tests réalisés sur Genève concernent la structure du modèle et les paramètres de la fonction d'utilité.

10.1 Organisation des tests

10.1.1 Exploration de l'impact des effets de bord

La réalisation des tests sur Genève était confrontée à une première difficulté pratique, qu'il est intéressant de discuter ici car elle peut être retrouvée dans d'autres efforts de modélisation. Cette difficulté consiste à définir le périmètre pour réaliser les tests. Plus précisément :

- D'une part, la matrice que l'on utilise pour l'affectation est celle produite par le MMT2.2. En effet, par rapport aux éléments discutés dans la section 8.3, celle-ci contient toute l'information disponible concernant
 - la répartition spatiale des populations et des emplois
 - les volumes et distances de déplacement issus du MRMT, qui est une donnée d'entrée pour le calage de la répartition modal du MMT2.2.**Cette matrice est définie pour l'ensemble du périmètre du MMT2.2.**
- D'autre part, la codification des aménagements cyclables et des autres attributs spécifiques pour l'affectation vélo est limitée au périmètre défini dans la **Fig. 1**.

Cette différence rend nécessaire de faire un choix concernant la mise en cohérence de la matrice à affecter et du périmètre de modélisation. Dans la mesure où cette configuration peut se reproduire dans les efforts d'intégrer une affectation vélo à un modèle multimodal existant, il est apparu pertinent, dans la démarche exploratoire de ce mandat, de considérer, dans un premier temps, deux solutions :

- Une première consiste à affecter la matrice OD telle quelle. Cette méthode revient à supposer que le choix d'itinéraire se fait de deux manières différentes, selon que l'on se trouve au sein du périmètre retenu pour le test ou en dehors. Pour les itinéraires traversant le périmètre restreint, les attributs de réseau spécifiques aux vélos ont été codifiés et ils sont donc non-nuls. À l'extérieur du périmètre restreint, les attributs spécifiques au vélo, autres que la longueur des tronçons, sont nuls.
- Une deuxième consiste à définir un cordon au niveau du périmètre restreint, à partir d'un premier résultat d'affectation (résultat de la première méthode, ou d'une affectation prenant en compte seulement la distance, entre autres). On a ainsi un nouveau zonage pour la matrice qui comporte les éléments suivants :
 - Zones internes au périmètre restreint : elles sont identiques à celles du MMT
 - Zones cordon : elles remplacent les zones MMT à l'extérieur du périmètre restreint. On en génère une par infrastructure permettant d'avoir un échange entre le périmètre restreint et le reste.

10.1.2 Définition des variables constituant les fonctions d'utilité testées (partie déterministe)

Dans chacune des deux séries de tests, modèle complet et modèle restreint au cordon, on examine la forme de la fonction d'utilité. Compte tenu de ce qui a été dit dans la section 9.2, les tests portent sur les variables à inclure dans la fonction d'utilité, mais également sur la manière de les inclure :

- inclusion au niveau de la composante mutuelle à la recherche de chemins et à répartition de la demande ;
- inclusion au niveau de la composante exclusive à la répartition de la demande (c'est à dire en tant qu'attribut des chemins).

Dans la mesure où la manière de construire les variables explicatives conditionne les valeurs des paramètres de la fonction de temps généralisé (voir 9.6), il convient de présenter les variables qui sont utilisées dans les différentes spécifications testées dans l'exemple de Genève, ce qui est fait dans la **Tab. 9**. Les variables sont numérotées (*k*) pour faciliter la présentation des variables dans les différentes spécifications testées.

Tab. 9 Nomenclature des variables explicatives utilisées dans la fonction de temps généralisé (les attributs relatifs aux chemins sont entre crochets [])

k	Code	Description	Unité
1	LONG	Longueur du tronçon (tous les tronçons ont une longueur strictement positive)	[m]
2	V_LONG	Longueur du tronçon si celui-ci n'a aucun aménagement cyclable, 0 autrement	[m]
3	LONG_PISTE	Longueur du tronçon si le niveau d'aménagement correspond à une piste cyclable, 0 autrement	[m]
4	LONG_BANDE	Longueur du tronçon si le niveau d'aménagement correspond à une bande cyclable, 0 autrement	[m]
5	LONG_DEROG	Longueur du tronçon si le niveau d'aménagement correspond à une infrastructure piétonne autorisée la circulation de vélos, 0 autrement	[m]
6	LONG_VBUS	Longueur du tronçon si le niveau d'aménagement correspond à une voie de bus autorisée la circulation de vélos, 0 autrement	[m]
7	LONG_TRAM	Longueur du tronçon si le niveau d'aménagement correspond à une voie de tram autorisée la circulation de vélos, 0 autrement	[m]
8	LONG_CTSENS	Longueur du tronçon si le niveau d'aménagement correspond à un contre-sens voiture autorisé pour la circulation des vélos, 0 autrement	[m]
9	DENIV_POSITIF	Dénivelé positif. Somme des différences d'altitude des points de mesure consécutifs du tronçon (placés tous les 5 mètres). Lorsque la différence d'altitude entre 2 points consécutifs est positive, elle est intégrée à la somme, lorsqu'elle est négative elle n'est pas intégrée	[m]
10	AGR_BEAU_LONG	Longueur du tronçon si le tronçon se trouve dans environnement agréable	[m]
11	MV_CHGVPTRANSF	Moyenne de la charge de trafic HPM et HPS, en unités véhiculaires, multipliée par la longueur du tronçon en mètres	[uvh * m]
12	[MAX:TRONCONS\DPOSLONG]	Maximum du ratio DENIV_POSITIF / LONG (calculé sur chaque tronçon) sur un chemin (en %)	[%]
13	DANGRT_LONG	Longueur du tronçon si l'on considère qu'il présente un danger de circulation pour les vélos (par la présence d'obstacles ou de surfaces glissantes, par exemple), 0 autrement	[m]

La construction de ces variables explicatives suit les principes exposés dans le chapitre 7. Il convient de remarquer que toutes les variables, à l'exception de la variable 12, sont définies à l'échelle des tronçons. La fonction d'utilité est définie sur des chemins, ce qui

impose de sommer ces variables selon l'appartenance des tronçons à un chemin. Cette manière de procéder est liée à la méthode de recherche des chemins possibles, qui s'appuie sur des attributs des tronçons (voir section 9.5.3).

10.1.3 Protocole pour les tests

Les tests d'affectation ont été organisés selon deux grandes séries, en fonction de la manière de traiter les effets de bord et de rendre compatibles matrice à affecter et réseau codifié (voir section 10.1.1). La première série de tests porte sur des affectations faites sur la totalité du périmètre du MMT. La deuxième série de tests porte sur des affectations sur un périmètre restreint. Pour ce faire, un cordon est défini. Celui-ci permet de retraiter la matrice de demande pour l'ajuster aux limites du nouveau périmètre.

Dans chaque série, les tests se déroulent de la manière suivante :

1. On commence par choisir les attributs à inclure dans la fonction d'utilité (par exemple, longueur et dénivelé positif, soit encore x_{i3} et x_{i9}) parmi ceux donnés dans la **Tab. 9**. Il faut faire un choix dans la manière de les prendre en compte. **Ces variables peuvent être utilisées pour la recherche de chemins et pour la répartition de la demande parmi ces chemins, ou seulement pour la répartition de la demande.** Les spécifications testées couvrent les deux cas.
2. On utilise l'algorithme GenSA pour trouver les paramètres de la fonction d'utilité. La fonction objectif est définie à partir de la droite de régression entre comptages et volumes modélisés : l'algorithme minimise l'expression $1 - R^2$ où R^2 est le coefficient de détermination (ratio de la variance expliquée sur la variance totale) associé à la régression linéaire simple : volumes jour modélisés vs comptages en section jour. GenSA teste un grand nombre de combinaisons de paramètres. Son usage est limité par le besoin de faire une affectation pour chaque évaluation d'un jeu de paramètres. La condition d'arrêt fixée est un temps maximum de calcul (entre 12h et 3 jours, selon la durée d'une affectation). **Ainsi, pour chaque test, plusieurs milliers d'affectations sont réalisées, chacune avec un jeu de paramètres différent.**
3. A l'issue de ce calcul, on vérifie la cohérence des paramètres et la qualité de reproduction des données de comptage.
4. On retourne à l'étape 1 en cas de résultat non satisfaisant

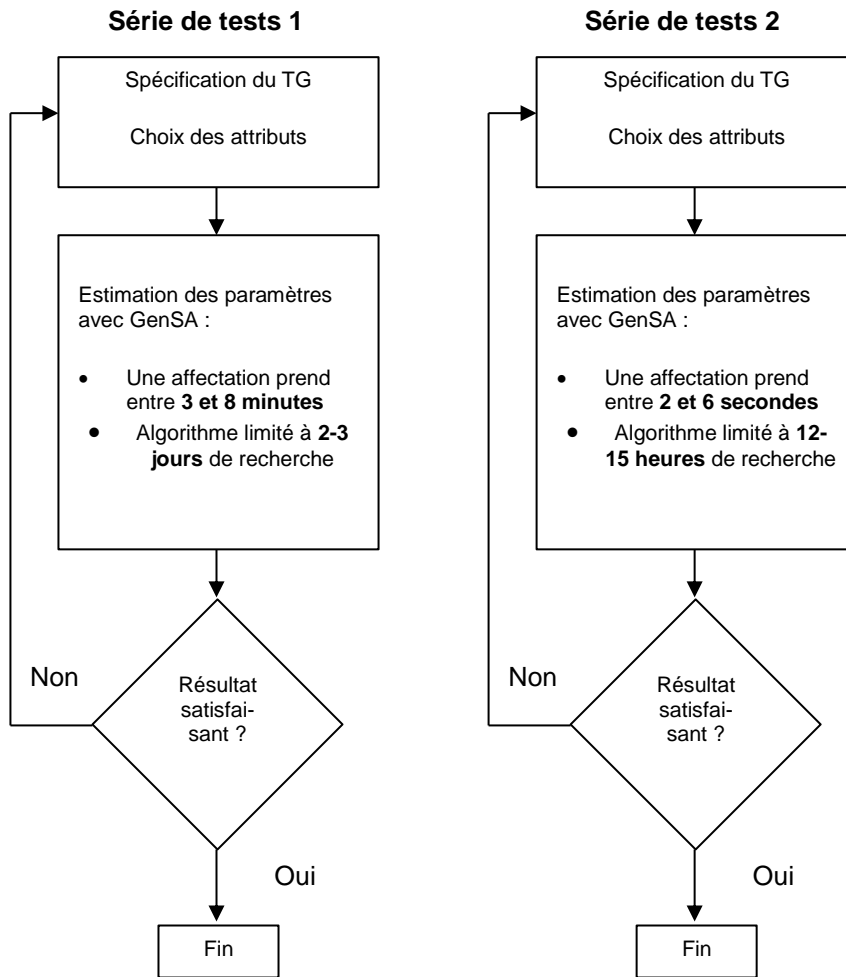


Fig. 46 Schéma décrivant la procédure de test utilisée

10.1.4 Spécifications testées

Les spécifications testées sont nommées avec un s , pour « spécification » un premier chiffre, 1 ou 2, selon la série et un deuxième chiffre correspondant à l'ordre de test au sein de la série. Par exemple s_{21} correspond à la première spécification utilisée dans la deuxième série de tests.

Première série de tests

Pour la première série de tests, sur l'ensemble du périmètre du MMT, deux spécifications sont les plus représentatives du travail réalisé. Pour simplifier la définition des fonctions d'utilité, on conserve la notation x_{ik} pour l'attribut numéro k du chemin i . Pour les attributs définis à l'échelle des tronçons, on note w_{kc} l'attribut k du tronçon c parmi. Si N est le nombre de tronçons dans le réseau, on a :

$$x_{ik} = \sum_{c=1}^N w_{kc} \delta_{ic} \quad (17)$$

où $\delta_{ic} = 1$ si le tronçon c appartient au chemin i , 0 sinon.

La première spécification, s_{11} , utilise uniquement la longueur de parcours comme variable explicative du choix de chemin. En utilisant la notation définie dans ce qui précède, l'utilité pour la spécification s_{11} est définie de la manière suivante :

$$V_i = \alpha_1 \cdot x_{i1} \quad (18)$$

où x_{i1} est la valeur de l'attribut 1 du chemin i .

La deuxième spécification, **s12**, utilise, en plus de la longueur du parcours la longueur des aménagements cyclables et celle de tronçons situés dans un environnement agréable. Tous les attributs sont utilisés à la fois pour la recherche des chemins et pour la répartition de la demande entre les chemins. Elle prend la forme suivante

$$V_i = \alpha_1 \cdot x_{i1} + \sum_{k=3}^8 \alpha_k \cdot x_{ik} + \alpha_{10} \cdot x_{i10} \quad (19)$$

Dans cette série de tests, la matrice affectée est celle issue de la modélisation du MMT. Il s'agit de la matrice qui utilise au mieux les informations disponibles. Cette matrice a été ajustée par un coefficient multiplicatif pour s'assurer de sa cohérence avec les comptages sur la ligne écran constituée par les points sur le Rhône.

Deuxième série de tests

L'objectif de la deuxième série de tests est de mieux contrôler les effets de bord, c'est à dire l'impact des déplacements d'échange et de transit sur le périmètre d'étude. L'utilisation d'un cordon permet également de réduire de manière importante les temps de calcul. Pour la définition du cordon, nous avons procédé de la manière suivante :

- L'affectation de départ est celle qui a obtenu les meilleurs résultats en termes de reproduction des charges. C'est à partir de cette affectation de départ que l'on peut définir la nouvelle matrice de demande à utiliser (rappelons que la définition d'un cordon consiste en la création de nouvelles zones pour représenter les déplacements entrants et sortants du périmètre.
- Les limites du cordon sont définies de manière à exploiter au mieux les données de comptages. Pour ce faire, le périmètre d'étude est légèrement modifié pour avoir un maximum de postes de comptages aux frontières du cordon.
- La matrice OD est ajustée marginalement par la procédure TFlowFuzzy pour :
 - Permettre de coller aux comptages aux frontières du cordon
 - Tout en contrôlant que les volumes traversant le Rhône dans les deux sens (Rive Droite–Rive Gauche et *vice-versa*) correspondent à ceux constatés sur cette ligne écran.

Avec cette configuration, les tests ont des résultats meilleurs que ceux de la première série de tests (voir sections suivantes avec les résultats des tests). Pour cette présentation, six spécifications qui permettent d'illustrer la démarche ont été retenues :

- **s21** : Cette spécification utilise pour la recherche des chemins les attributs 2 à 11. Pour la répartition de la demande elle ajoute les attributs 12 et 13. La fonction d'utilité est alors (équation (20))

$$V_i = \sum_{k=2}^{13} \alpha_k \cdot x_{ik} \quad (20)$$

Il convient de noter que dans cette configuration, on s'attend à ce que tous les coefficients associés aux aménagements cyclables aient le même signe (positif) car la longueur des tronçons n'est pas utilisée en tant qu'attribut (seulement les longueurs des différents types d'aménagements le sont et leur somme permet d'obtenir la longueur totale du chemin, à l'instar de la spécification A dans l'exemple de la section 9.6 (page 117).

- **s22** : Cette spécification s'intéresse à l'importance de ce que l'on considère comme les deux principales composantes environnementales : l'environnement agréable

(variable 10), introduit, avec la longueur, dans la recherche de chemins et la pente maximale (variable 12), utilisée seulement dans la répartition de la demande sur les chemins. Elle peut être vue comme une version de s21 avec certains paramètres fixés à 0 (équation (21))

$$V_i = \alpha_1 \cdot x_{i1} + \alpha_{10} \cdot x_{i10} + \alpha_{12} \cdot x_{i12} \quad (21)$$

- **s23** : Cette spécification est similaire en conception à s22 en ce qu'elle peut être considérée comme une version de s21 avec certains paramètres fixés à zéro. Elle intègre le dénivelé positif (variable 9) pour la recherche des chemins et que la dangerosité ponctuelle de certains tronçons (variable 13) pour la répartition de la demande seulement. Elle est donnée dans l'équation (22).

$$V_i = \alpha_1 \cdot x_{i1} + \alpha_{09} \cdot x_{i09} + \alpha_{13} \cdot x_{i13} \quad (22)$$

- **s24** : De manière analogue à s22 et s23, elle intègre l'impact du volume du trafic motorisé (variable 11) sur la recherche de chemins ainsi que la pente maximale (variable 12) et la dangerosité ponctuelle de certains tronçons (variable 13) seulement pour la répartition de la demande (équation (23))

$$V_i = \alpha_1 \cdot x_{i1} + \sum_{k=11}^{13} \alpha_k \cdot x_{ik} \quad (23)$$

- **s25** : Il s'agit d'une spécification où la recherche des chemins possibles ne prend en compte que la longueur des tronçons (variable 1). Tous les attributs disponibles pour la répartition de la demande sur les chemins sont utilisés. L'équation (24) donne la forme de cette spécification.

$$V_i = \alpha_1 \cdot x_{i1} + \sum_{k=3}^8 \alpha_k \cdot x_{ik} + \sum_{k=10}^{13} \alpha_k \cdot x_{ik} \quad (24)$$

- **s26** : Il s'agit d'une version simplifiée de s25 (seulement la variable 1 est utilisée pour la recherche des chemins), où l'on ne prend en compte que les variables explicatives considérées comme principales (équation (25)). Cette prise en compte se fait seulement sur la répartition de la demande parmi les chemins.

$$V_i = \alpha_1 \cdot x_{i1} + \alpha_3 \cdot x_{i3} + \alpha_{10} \cdot x_{i10} + \sum_{k=12}^{13} \alpha_k \cdot x_{ik} \quad (25)$$

Il convient de remarquer ici que les deux séries de tests sont le fruit d'une approche exploratoire. La difficulté pratique de réaliser des tests statistiques de significativité et les temps de calcul importants de la méthode de calage nous ont limités dans le choix des spécifications testées.

Les deux sections suivantes présentent les principaux résultats des deux séries de tests réalisés.

10.2 Résultats de la première série de tests : périmètre complet du MMT

La première série de tests, qui correspond à l'utilisation du périmètre complet du MMT2.2, s'est révélée très vite peu prometteuse. Les temps de calcul pour chaque affectation sont importants (de 3 à 8 minutes) alors que les résultats en termes de calage ne sont pas très bons.

La **Tab. 10** donne les coefficients utilisés dans les deux spécifications ainsi que le résultat obtenu, en termes de R^2 . Les coefficients retenus sont issus d'un ajustement manuel, à la marge, appliqué à ceux issus de l'algorithme GenSA. Cet ajustement cherchait à tester localement les possibilités d'amélioration des résultats.

Tab. 10 Paramétrage retenu pour les affectations vélo de la première série (les attributs utilisés pour la recherche de chemin sont en gris)

k	code	Spécification s11	Spécification s12
1	LONG	-1.850E-03	-1.850E-03
3	LONG_PISTE		2.917E-04
4	LONG_BANDE		8.333E-05
5	LONG_DEROG		-3.333E-04
6	LONG_VBUS		-1.167E-04
7	LONG_TRAM		-1.750E-04
8	LONG_CTSENS		-8.333E-05
10	ARG_BEAU_LONG		4.500E-04
	sigma	14.000	14.000
	R2	0.228	0.230

Les résultats du calage sont globalement mauvais puisque le R^2 a une valeur très faible. L'ajout d'attributs de tronçons n'améliore presque pas la situation. Par ailleurs, l'interprétation des coefficients n'est pas toujours en accord avec les attentes : certains coefficients, comme ceux associés à la dérogation pour les deux roues sont négatifs, ce qui indique un surplus de pénibilité.

La **Fig. 47** et la **Fig. 48** donnent un aperçu un peu plus détaillé des résultats.

La **Fig. 47** contient les diagrammes à 45 degrés, représentant les comptages et les charges journalières en section, avec la droite de régression. Les nuages de points des spécifications s11 et s12 sont très proches

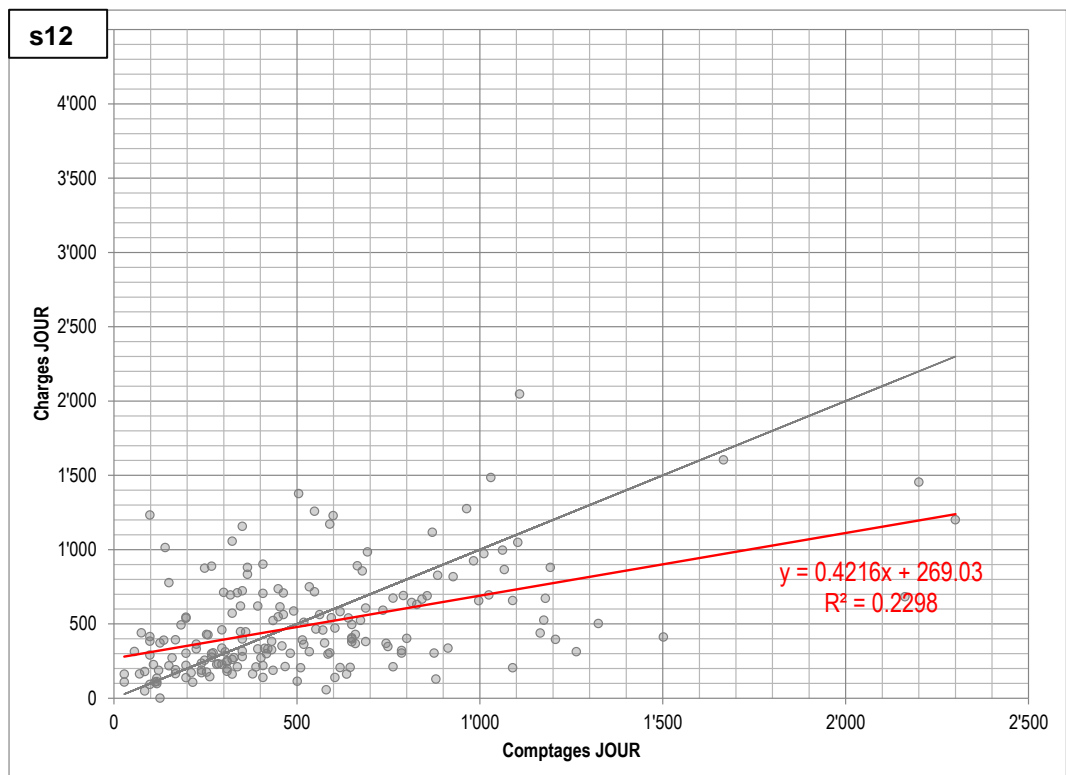
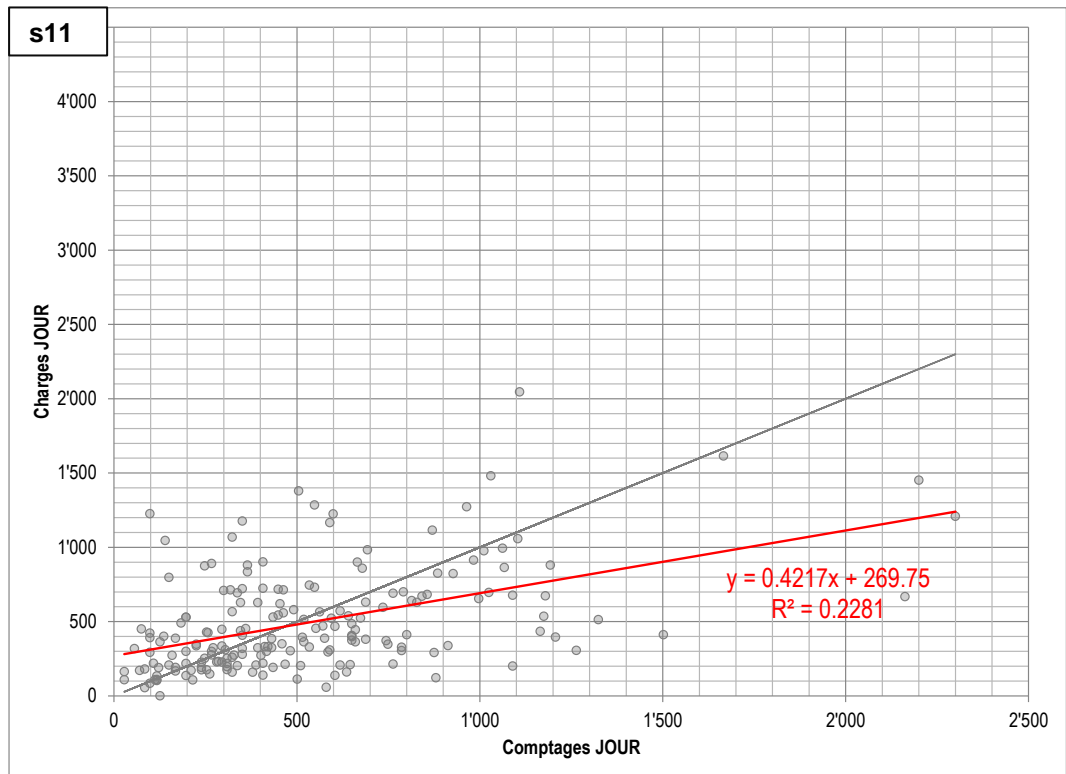


Fig. 47 Tests de calage en utilisant les attributs des tronçons. Diagramme de 45°

La figure ci-dessous présente les cartes de résultat d'affectation, avec les charges et l'écart relatif par rapport aux comptages là où ceux-ci sont disponibles. Les charges sont représentées par une barre proportionnelle. Celle-ci est grise lorsqu'il n'y a pas de comptage disponible, bleue (avec 3 niveaux) lorsque la charge est inférieure à la valeur du comptage et orange/rouge lorsque la charge est supérieure au comptage. La couleur jaune dénote un écart relatif inférieur à 10% en valeur absolue. Une nouvelle fois, les deux spécifications donnent des résultats très similaires, avec des sous-estimations de fréquentation d'axes majeurs comme le pont du Mont Blanc ou celui des Bergues ainsi que des surestimations au niveau de la rue des Moulins et la rue de la Tour de l'Île. De manière générale, on voit « peu » de jaune sur les cartes, ce qui montre que le niveau de reproduction de l'observé avec ces spécifications n'est pas acceptable.

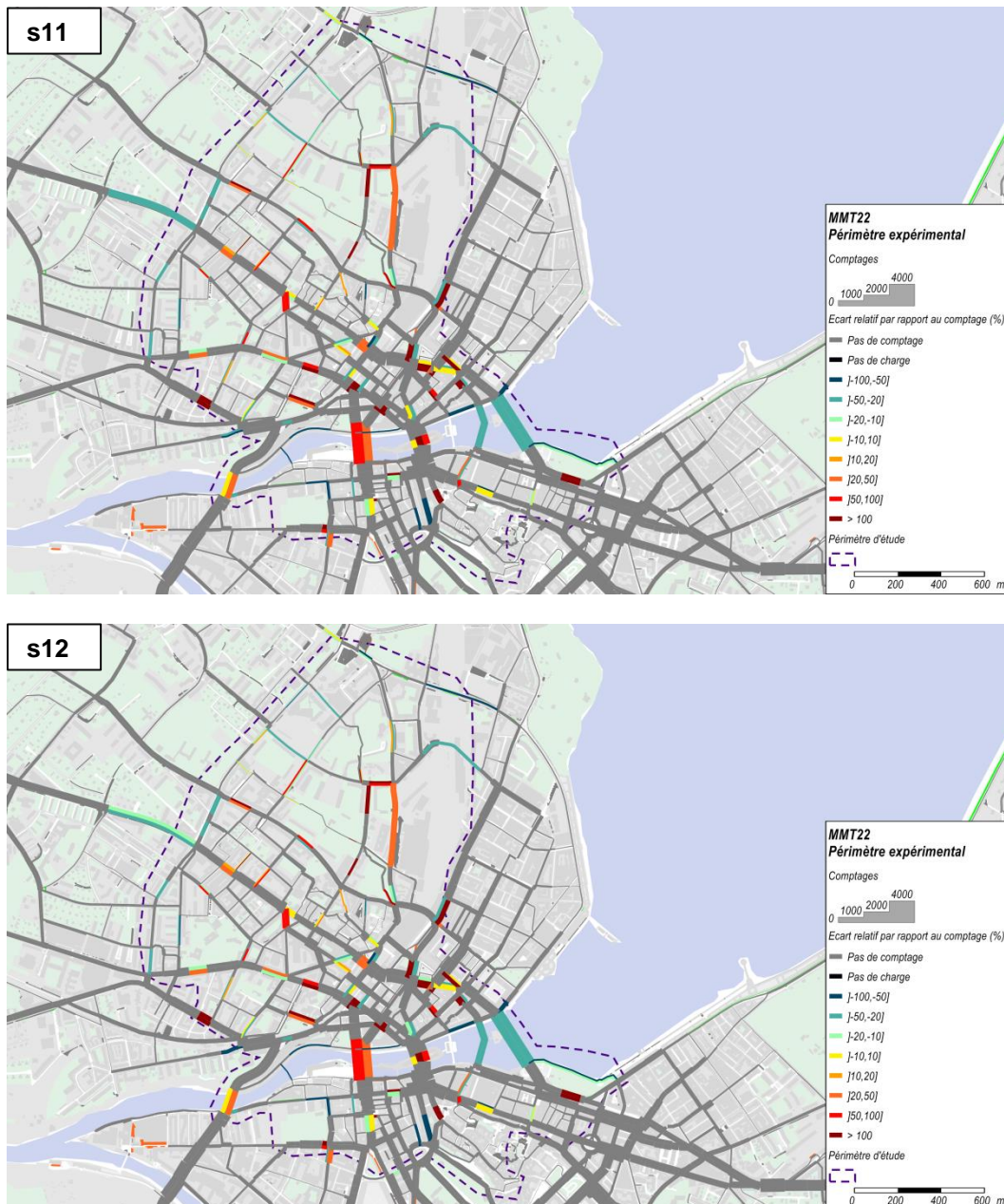


Fig. 48 Test de calage en utilisant les attributs des tronçons. Écart relatif des charges et comptages JOUR

Bien que la qualité de reproduction de l'observé dans cette série de tests est très médiocre, il est possible de tirer quelques enseignements. Le premier est l'impact faible

de l'introduction d'attributs supplémentaires dans la fonction de temps généralisé dans cette configuration. Comme le montrera la deuxième série de tests, les attributs autres que la distance jouent un rôle important. Dans le cas présent, le fait de ne pas avoir une codification de ces attributs sur la totalité du réseau pénalise leur prise en compte. Il y a une sorte de prédéfinition de l'ensemble des chemins possibles en amont et en aval (uniquement impactés par la distance). Cette prédéfinition est trop forte pour être compensée par les coefficients associés aux aménagements, qui eux ne sont codifiés que sur un périmètre limité. Dit autrement, un traitement spécifique des effets de bord est nécessaire pour l'affectation des vélos. Pour faire ce traitement, des comptages sur des lignes écran sont nécessaires.

10.3 Deuxième série de tests : définition d'un cordon

La deuxième série de tests correspond aux spécifications pour l'affectation de la matrice cordon.

La **Tab. 11** donne les coefficients obtenus ainsi que les $R2$ correspondants pour les 6 spécifications testées.

Tab. 11 Paramétrage retenu pour les affectations vélo de la deuxième série de tests (les attributs utilisés dans la recherche de chemins ont un fond gris)

k	Code	s21	S22	S23	S24	S25	S26
1	LONG		-4.82E-02	-6.48E-03	-2.60E-03	-5.81E-03	-3.17E-03
2	V_LONG	-2.38E-03					
3	LONG_PISTE	-9.26E-04				4.65E-03	4.80E-03
4	LONG_BANDE	-1.88E-03				2.37E-04	
5	LONG_DEROG	-1.39E-03				-1.37E-03	
6	LONG_VBUS	-1.61E-03				1.08E-03	
7	LONG_TRAM	-3.01E-03				-1.65E-03	
8	LONG_CTSSENS	-1.15E-04				7.07E-03	
9	DENIV_POSITIF	-3.60E-01		-1.15E+00			
10	AGR_BEAU_LONG	1.05E-03	1.52E-02			5.79E-03	3.51E-03
11	MV_CHGVPTRANSF	-8.97E-05			-1.76E-05	3.69E-03	
12	[MAX:TRONCONSIDPOSLONG]	-4.50E-01	-3.03E+00		-5.13E-01	-5.68E-01	-1.14E+00
13	[SUM:TRONCONSIDANGRT_LONG]	-7.11E-03		-6.81E-02	-9.28E-03	-6.69E-03	-6.85E-03
	sigma	14.094	2.352	5.051	4.557	17.829	9.928
	R2	0.589	0.559	0.420	0.470	0.662	0.609

Ces résultats représentent une amélioration importante par rapport à ceux de la première série de tests. Une partie de cette amélioration est liée au meilleur traitement des effets de bords, puisque même les spécifications s23 et s24, qui font intervenir un nombre faible de variables explicatives autres que la longueur atteignent un niveau de $R2$ presque 2 fois plus élevé que celui de la première série de tests.

Cependant, le meilleur traitement des effets de bord n'explique pas tout. Lorsqu'on s'intéresse aux spécifications qui introduisent des attributs autres que la longueur dans la recherche de chemins, notamment s21 et s22, on observe une amélioration importante du $R2$. L'agrément positif semble avoir un impact très fort tout comme la présence d'aménagements cyclables.

Les spécifications qui n'intègrent que la longueur dans la recherche de chemin, mais qui intègrent les autres variables dans la répartition de la demande sur les chemins permettent d'améliorer encore plus la reproduction de la situation observée puisque les $R2$ de s25 et s26 dépassent 0.6. Parmi ces 2 spécifications, s25 qui inclut plus de variables explicatives dispose du $R2$ le plus élevé. Lorsque l'on regarde les signes des coefficients, on remarque que certains attributs ont des signes qui ne sont pas en accord

avec ceux qu'on attend de manière intuitive. C'est le cas notamment de la variable 11, c'est-à-dire des véhicules kilomètres motorisés, qui devrait avoir un signe négatif. Parmi les aménagements cyclables, certains types ont des coefficients négatifs alors qu'on s'attendrait à obtenir des coefficients positifs. Dans la spécification s26, les signes sont plus en accord avec les attentes.

La Fig. 49, la Fig. 50 et la Fig. 51 présentent, comme pour la première série de tests un peu plus de détail sur la qualité de reproduction des comptages. La Fig. 49 donne les diagrammes de 45 degrés des six spécifications, la Fig. 50 donne la représentation cartographique des écarts relatifs pour s21, s22, et s23 et la Fig. 51 les donne pour s24, s25 et s26.

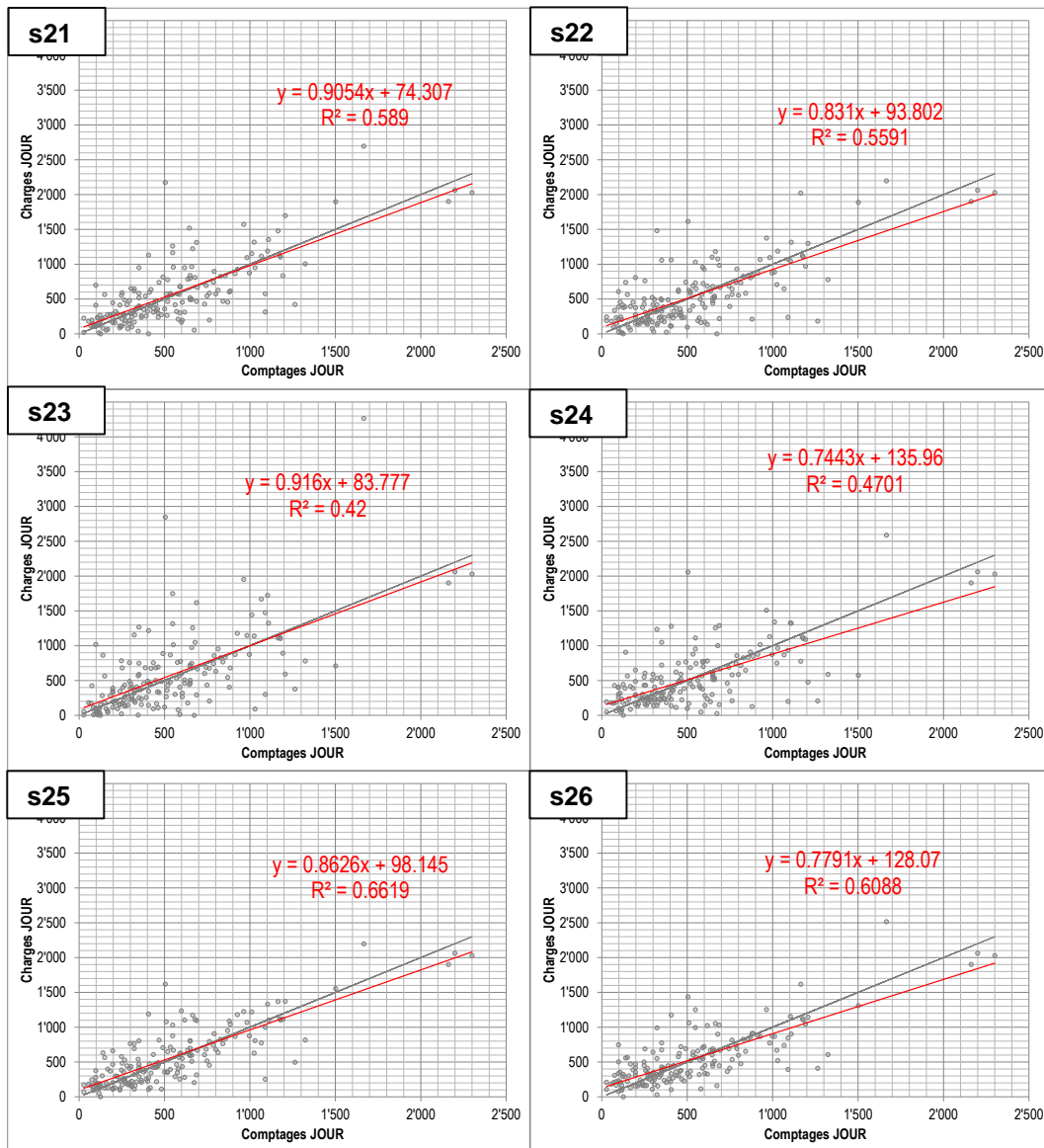


Fig. 49 Test de calage en utilisant un cordon. Diagramme de 45°

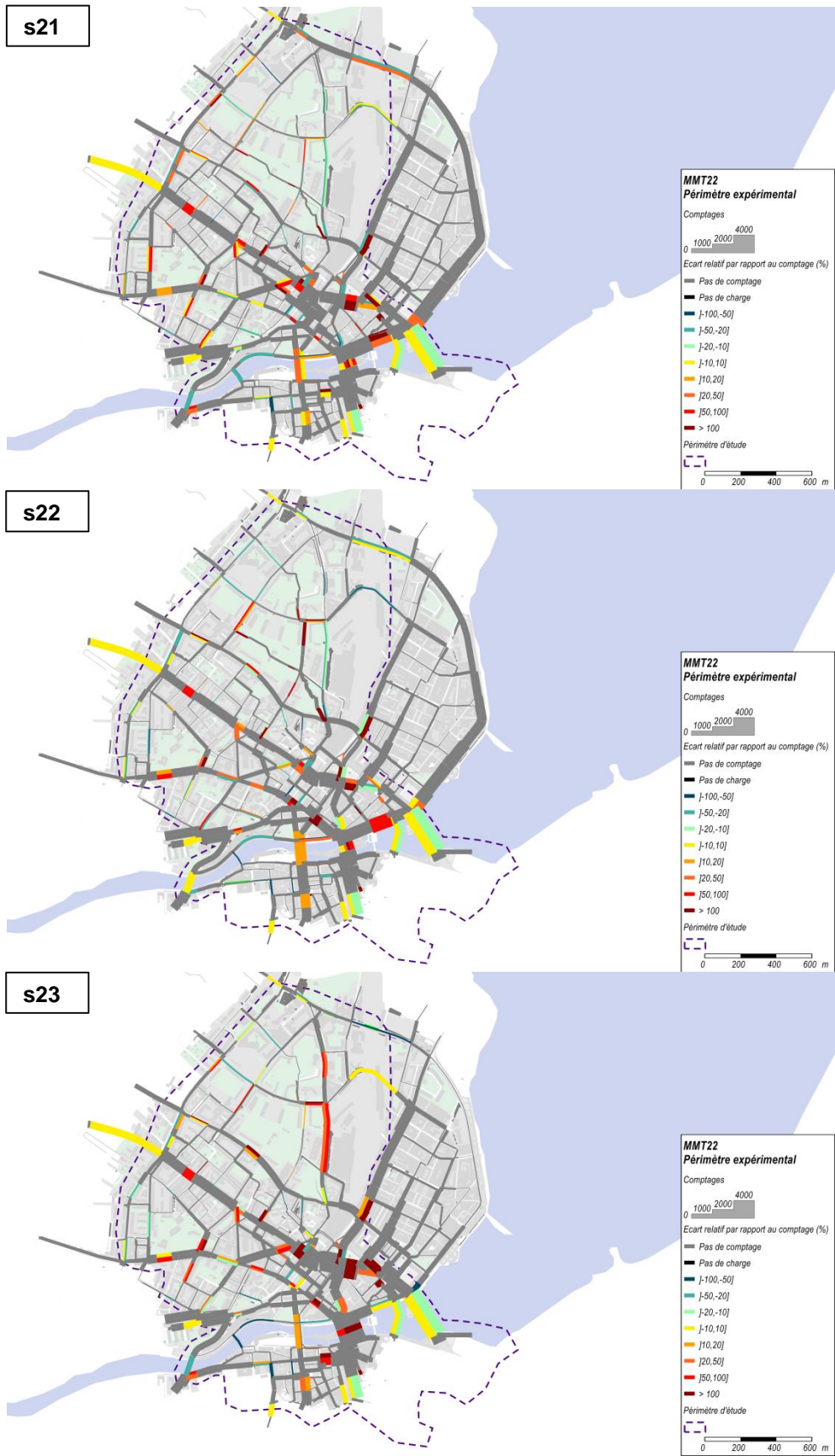


Fig. 50 Deuxième série de tests. de calage en utilisant un cordon. Écart relatif des charges et comptages JOUR (s21, s22 et s23)

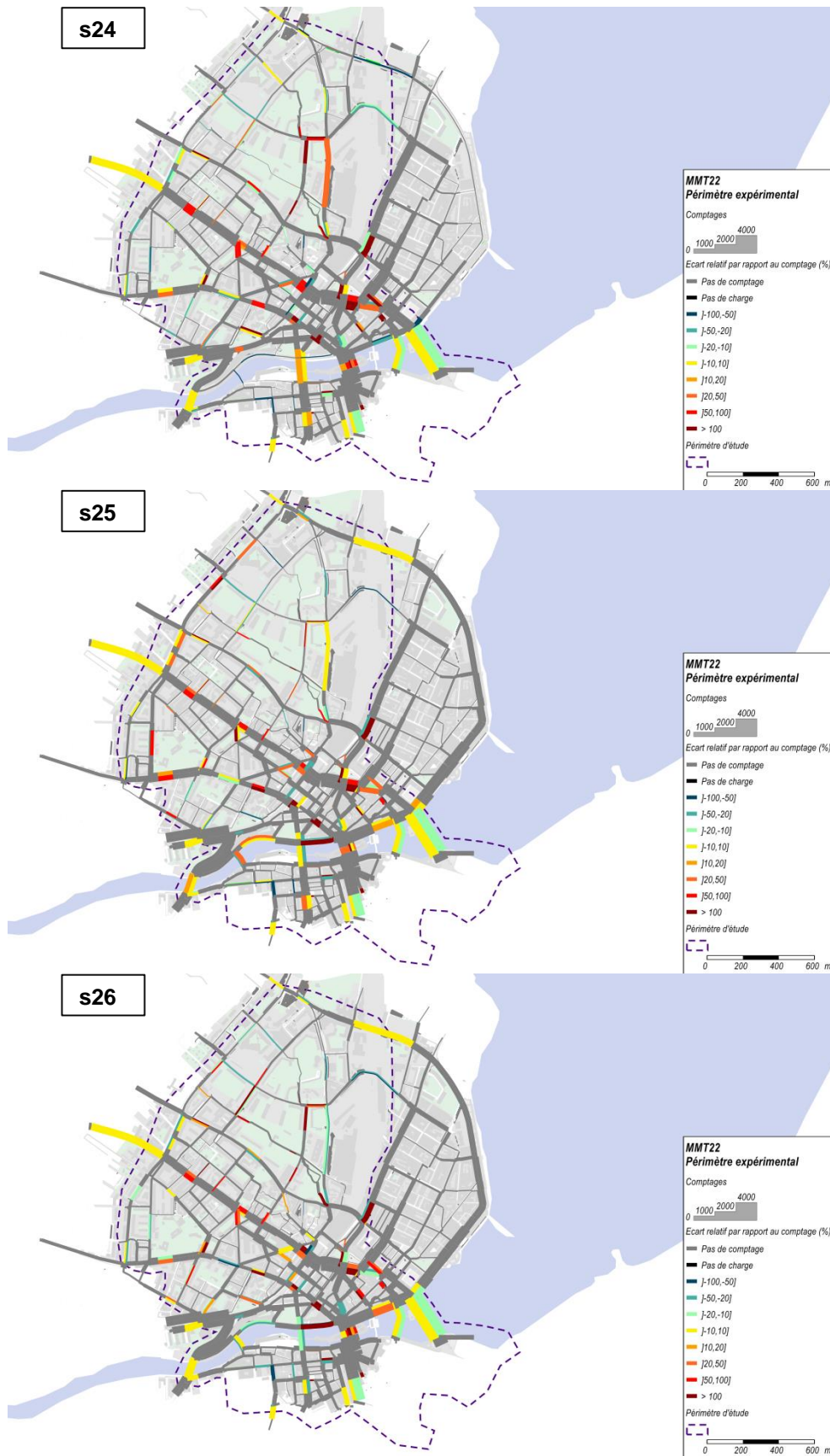


Fig. 51 Deuxième série de tests. de calage en utilisant un cordon. Écart relatif des charges et comptages JOUR (s24, s25 et s26)

La **Fig. 49** montre que le nuage de points autour de la diagonale est assez dispersé sauf pour la spécification s25, qui présente des caractéristiques plus conformes avec ce qui est recherché en phase de calage. Les différents points se répartissent à proximité de l'axe des 45° et on n'a pas de point le long de l'axe des abscisses ni des ordonnées. Cependant, quelques *outliers* persistent.

Au niveau des **Fig. 50** et **Fig. 51**, s25 a plus de points « en jaune », c'est-à-dire que les écarts relatifs avec les comptages sont inférieurs à 10%, notamment au niveau des axes qui ne sont pas à proximité de la gare. La reproduction des flux sur les différents ponts sur le Rhône est meilleure qu'avec les autres spécifications.

En comparant s22, s23 et s24, on remarque que l'itinéraire qui longe le lac Léman sur la Rive Droite n'est convenablement chargé qu'avec s22, et pas dans les autres cas. La qualification d'un tracé comme « agréable » permet d'améliorer sensiblement le calage par la prise en compte d'itinéraires plus longs.

Les résultats sont nettement meilleurs, principalement en raison de la meilleure reproduction au niveau des points d'entrée. Cependant, des écarts importants subsistent au niveau de la rive droite, entre les voies ferrées et le Rhône. Dans ce secteur, on observe des charges trop importantes par rapport aux données de comptage.

Compte tenu de la localisation des *outliers*, il se peut que la définition des aménagements cyclables nécessite un raffinement, une sorte d'abstraction. Dit autrement, il faudrait que l'information contenue dans le fait d'avoir ou non un certain type d'aménagement puisse être synthétisée d'une meilleure manière. La **Fig. 52** montre 3 rues qui sont parmi les principaux *outliers* de s25. Ces rues sont différentes : on a deux grands axes (rue de Lausanne et rue de Chantepoulet) et une rue de desserte (place Kléberg). La configuration de ces rues est différente mais elles ont en commun qu'il est difficile de les codifier à l'aide d'un seul attribut parmi ceux qui ont été utilisés ici. Pour les codifier « correctement » dans l'objectif d'améliorer le calage, il serait intéressant de tester une sorte d'attribut synthétique donnant le niveau de « cyclabilité » de chaque axe.



Fig. 52 Localisation des principaux outliers de s25 (photos : Google Maps)

En ce qui concerne la pondération des variables explicatives disponibles pour cette recherche, en analysant les résultats de la spécification s25, il convient de se demander si le degré de liberté permis par la multiplicité de paramètres est trop important par rapport au nombre de comptages à reproduire. Plus précisément, il se peut que les signes et ratios entre paramètres un peu surprenants (comme le signe de $k=11$, par exemple) soient liés à de l'*overfitting* issu de la méthode de calage, compte tenu du caractère un peu « indirect » de celle-ci (on ne cherche pas à reproduire des ensembles de chemins dans la fonction objectif mais des comptages en section).

10.4 Une spécification contrainte pour limiter l'*overfitting*

Dans le but de donner un jeu de paramètres qui soit plus cohérent (sans les signes surprenants de s25) pour qu'il puisse servir de référence, une nouvelle spécification s27 est estimée. Celle-ci est identique à s25 dans le choix des variables explicatives. Elle diffère de s25 par les contraintes appliquées lors de la recherche de paramètres par l'algorithme GenSA.

Pour le calage des spécifications s21 à s26, les intervalles de recherche des paramètres pour les aménagements cyclables n'imposent pas de contrainte sur les signes¹⁰. **Pour s27, une nouvelle définition des intervalles de recherche permet de contraindre les signes des coefficients ayant des signes inattendus dans s25** (pour plus de détails sur la manière de définir les intervalles de recherche pour GenSA et Visum, voir annexe p. 175).

Le calage de s27 s'est fait en 2 étapes. Une première étape consiste en l'application de l'algorithme GenSA avec les nouvelles contraintes. La deuxième est la modification manuelle pour le coefficient associé aux contre-sens cyclables (pour respecter la cohérence du rapport entre celui-ci et la longueur).

Les résultats obtenus avec s27, et leur comparaison avec ceux obtenus avec s25 sont donnés dans le tableau ci-dessous.

¹⁰ Il s'agit de la pratique usuelle : pour juger de la pertinence d'une spécification particulière, il est utile de savoir si les résultats d'estimation ont été obtenus sans contrainte particulière dans le système (résultats plus robustes).

Tab. 12 Comparatif des coefficients des fonctions d'utilité et des taux de substitution pour s25 et s27

Numéro (k)	Description (x_k)	Unité	Coefficient (α_k) s25	Coefficient (α_k) s27	Taux de substitution par rapport à la distance s25	Taux de substitution par rapport à la distance s27	Unité
1	Longueur	[m]	-5.81E-03	-1.96E-02	1.000	1.000	[-]
3	Longueur de piste cyclable	[m]	4.65E-03	9.41E-03	-0.800	-0.480	[-]
4	Longueur de bande cyclable	[m]	2.37E-04	1.10E-03	-0.041	-0.056	[-]
5	Longueur d'infrastructure piétonne autorisée aux vélos	[m]	-1.37E-03	1.40E-03	0.236	-0.071	[-]
6	Longueur de voie de bus autorisée aux vélos	[m]	1.08E-03	2.25E-03	-0.186	-0.115	[-]
7	Longueur de voie de tram autorisée aux vélos	[m]	-1.65E-03	-4.40E-03	0.284	0.224	[-]
8	Longueur de un contre-sens VP autorisé aux vélos	[m]	7.07E-03	1.40E-02	-1.216	-0.715	[-]
10	Longueur d'environnement agréable	[m]	5.79E-03	9.40E-03	-0.995	-0.479	[-]
11	Charge VP * longueur	[uvh * m]	3.69E-03	-3.69E-04	-0.635	0.019	[uvh]
12	Maximum du ratio dénivelé positif / longueur	[-]	-5.68E-01	-2.64E+00	97.662	134.481	[%/m]
13	Longueur des dangers ponctuels	[m]	-6.69E-03	-4.71E-03	1.151	0.240	[-]

Les coefficients de la fonction d'utilité obtenus avec s27 sont assez différents de ceux obtenus avec s25. Les taux de substitution sont plus cohérents, grâce à l'introduction des contraintes. En particulier, pour k=8 et pour k=10, les valeurs absolues des taux de substitution sont inférieures à 1. Pour k=11, la valeur du coefficient est positive, tout comme le taux de substitution. En complément à ces changements, les taux de substitution correspondant à d'autres variables ont également évolué et sont plus en accord avec l'intuition que dans s25. Ainsi, par exemple, le taux de substitution de k=3 (pistes cyclables) est plus faible qu'avec s25 (40%), ce qui le rend également plus réaliste. Pour k=5, le coefficient a changé de manière importante (changement de signe) alors qu'aucune contrainte particulière n'a été fixée pour celui-ci. Ce changement rend le

taux de substitution plus réaliste. Pour $k=12$, le taux de substitution s'est accru de 38%, mais la nouvelle valeur reste plausible.

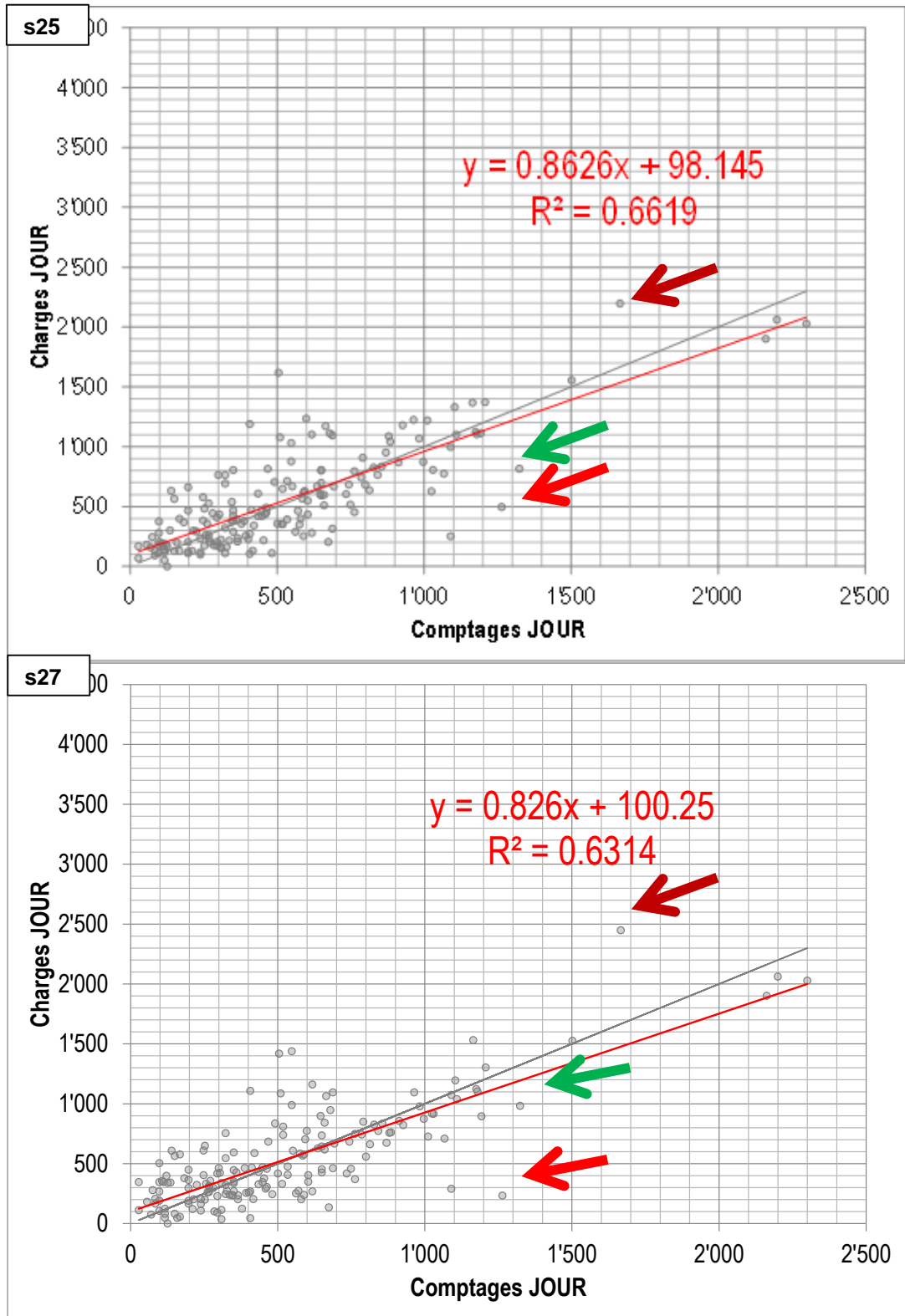


Fig. 53 Ajustement du modèle d'affectation (s25 en haut et s27 en bas)

Les nouvelles contraintes permettent d'améliorer la cohérence globale des pondérations des variables explicatives. Cependant, l'ajustement entre valeurs modélisées et comptages s'est un peu détériorée, même si la différence est faible (**Fig. 53**). Les flèches colorées dans la **Fig. 53** identifient les points où l'ajustement s'est amélioré (vert) ou détérioré (rouge, et rouge sombre). Les tronçons correspondants ont été identifiés par des flèches analogues dans la **Fig. 54**. Cette figure présente la localisation des comptages (barres blanches) et le niveau d'amélioration (vert) ou détérioration (rouge) de l'ajustement par rapport aux comptages. L'échelle pour les barres blanches vertes et rouges est la même. De manière générale, l'ajustement le long du Rhône se détériore avec s27. Des améliorations peuvent être observées dans le secteur du parc Geisendorf, où les infrastructures cyclables sont de type bande ou voie de bus).

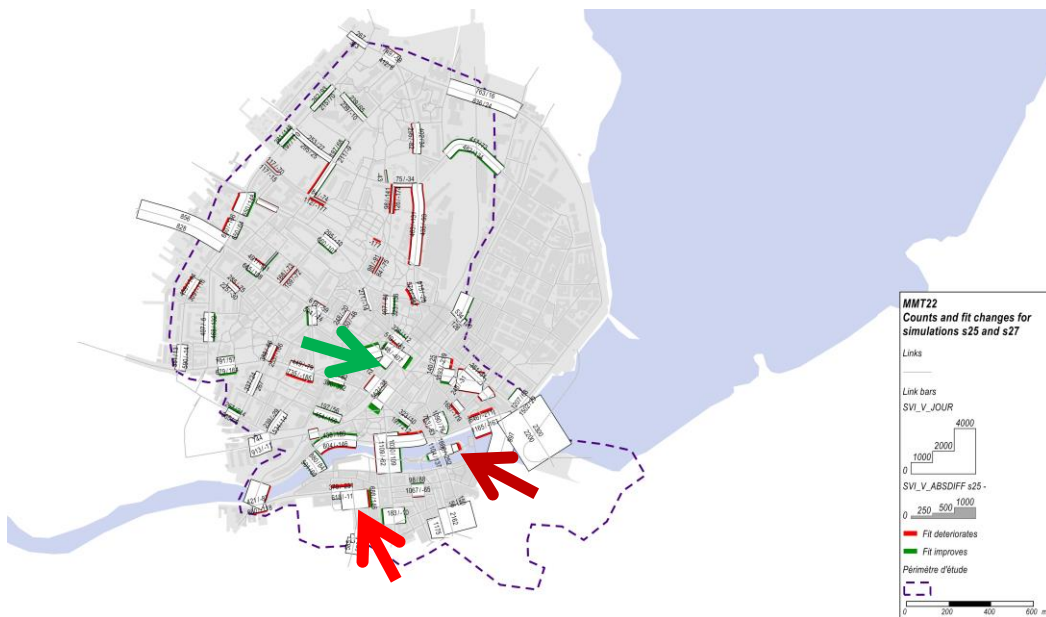


Fig. 54 Variation de l'ajustement entre s25 et s 27

10.5 Bilan

Les résultats des différents tests réalisés sont **très encourageants**.

Les modes doux sont plus présents aux centres des agglomérations qu'en périphérie. Il se peut que le périmètre pertinent pour la modélisation vélo ne soit pas le même que celui pour la modélisation des modes motorisés. Le choix de la méthode de mise en cohérence des différents périmètres et des matrices est primordial.

Lorsqu'on dispose seulement de données de comptages pour caractériser la situation à reproduire, on est obligé de procéder à un calage de type agrégé. Celui-ci nécessitant le calcul d'une affectation pour chaque évaluation de paramètres, il peut s'avérer extrêmement long.

D'autant plus long que le nombre de variables à inclure dans la fonction d'utilité est important. **Une procédure d'optimisation globale stochastique, même si elle ne garantit pas de trouver l'optimum dans tous les cas, est d'une aide précieuse.** Dans cas de Genève, les tests des différentes spécifications auraient été pratiquement impossibles à réaliser sans l'utilisation de l'algorithme GenSA.

En ce qui concerne les attributs à prendre en compte dans la fonction de temps généralisé, les spécifications s25 et s26 montrent que la prise en compte de toutes les

variables explicatives disponibles est la meilleure stratégie à suivre. Même dans le cas où :

- les effets de ces variables ne sont pris en compte que de manière partielle
- ou que la complexité des corrélations entre variables n'est pas parfaitement décomposée dans la spécification retenue,

il est important de toutes les inclure dans le processus de calage. Une prise en compte partielle est préférable à une non-prise en compte.

Le choix de bornes plus contraignantes pour la méthode d'estimation des paramètres peut être pertinent pour améliorer la cohérence de la pondération des variables explicatives. Dans cette recherche, une définition plus contraignante des intervalles de recherche des paramètres a permis d'améliorer la cohérence globale de la fonction d'utilité pour l'affectation.

Pour ce qui est de l'importance relative des différents facteurs explicatifs du choix d'itinéraire, nous ne pouvons donner ici qu'une appréciation qualitative. Ceci est dû à la difficulté pratique de procéder à une analyse des variances, dans le style des régressions *stepwise*. Dans les différentes expériences réalisées, la distance parcourue semble la variable la plus importante. Cette variable permet de définir l'ensemble des chemins possibles, à condition d'avoir une tolérance élevée d'écart par rapport à la distance minimale (voir l'importance de σ dans s25). Les autres variables importantes sont la présence d'aménagements cyclables, l'agrément positif et la présence d'éléments dangereux. La pente maximale permet d'écarter certains chemins. Le dénivelé positif semble jouer un rôle moins important dans l'affectation.

Pour mettre en perspective la cohérence des résultats obtenus, il est utile d'analyser les ratios entre coefficients. Cette analyse est proche de celle des taux de substitution dans les modèles de choix discret. La différence réside dans l'estimation agrégée des relations, à partir de données de comptage.

À partir des coefficients obtenus pour la meilleure spécification, nous avons établi des taux de de substitution entre les différentes variables explicatives. Ceux-ci sont donnés dans la **Tab. 13**.

Tab. 13 Taux de substitution entre variables explicatives à partir des résultats de s27

Numéro (k)	Description (x_k)	Unité	Coefficient (α_k)	Taux de substitution par rapport à la distance	Unité
1	Longueur	[m]	-1.96E-02	1.000	[-]
3	Longueur de piste cyclable	[m]	9.41E-03	-0.480	[-]
4	Longueur de bande cyclable	[m]	1.10E-03	-0.056	[-]
5	Longueur d'infrastructure piétonne autorisée aux vélos	[m]	1.40E-03	-0.071	[-]
6	Longueur de voie de bus autorisée aux vélos	[m]	2.25E-03	-0.115	[-]
7	Longueur de voie de tram autorisée aux vélos	[m]	-4.40E-03	0.224	[-]
8	Longueur de un contre-sens VP autorisé aux vélos	[m]	1.40E-02	-0.715	[-]
10	Longueur d'environnement agréable	[m]	9.40E-03	-0.479	[-]
11	Charge VP * longueur	[uvh * m]	-3.69E-04	0.019	[uvh]
12	Maximum du ratio dénivelé positif / longueur	[-]	-2.64E+00	134.481	[%/m]
13	Longueur des dangers ponctuels	[m]	-4.71E-03	0.240	[-]

Le taux de substitution est le taux qui permet d'échanger un type d'aménagement contre un autre, d'une longueur telle que l'itinéraire pour le cycliste reste indifférent.

Le signe négatif du taux de substitution indique que le type d'aménagement entraîne un avantage pour le cycliste (réduction de l'effort) et le signe positif indique un inconvénient pour le cycliste (effort supplémentaire).

Prenons trois exemples concrets pour illustrer les variables explicatives :

- Pour le cycliste, l'effort sur un parcours de 1 km sans aménagement est équivalent à celui d'un parcours de 1,048 km composé de 948 m sans aménagement et de 100 m de piste cyclable (100 m de piste cyclable correspond donc à 52 m de parcours sans aménagement). Le même raisonnement est applicable aux variables 4 à 10 et 13 du tableau 13.
- Pour la variable 11, la prise en compte du trafic se fait en considérant les km*véhicules par longueur d'itinéraire. Par exemple, si, sur un parcours de 1 km, le cycliste est confronté à une charge horaire d'une voiture supplémentaire, l'effort est équivalent à celui d'un parcours de 1,019 km.
- Pour la variable 12, le modèle prend en compte les pentes maximales par tronçon de 5 m et le raisonnement se fait en deux temps. Il faut d'abord calculer la pente pour chaque segment de 5 m (dénivelé positif / longueur). Ensuite, pour chaque chemin, on identifie le segment de celui-ci avec la pente positive maximale. Ceci permet d'obtenir une « pente maximale du chemin ». Ensuite, le calcul d'équivalence se fait de la manière suivante : si l'on part d'un chemin initial de 1 km avec un tronçon d'une pente maximale de 10%, les deux options suivantes représentent le même effort supplémentaire pour un cycliste moyen : un chemin de 1.134 km avec une pente maximale de 10% et un chemin de 1 km avec une pente maximale de 11%. Pour la prise en compte de la pente nous avons considéré uniquement les pentes maximales et pas le dénivelé total car ce sont bien les types de pentes rencontrées sur un

parcours qui incitent le cycliste à utiliser un parcours plutôt qu'un autre et non pas la différence d'altitude à franchir. En effet, passer du point A au point B situé à une altitude 50 m plus haute peut se faire de différentes manières mais la différence d'altitude à franchir est toujours de 50 m. Cette différence peut donc agir sur le choix du mode mais pas sur le choix de l'itinéraire.

10.6 Pistes pour améliorer l'ajustement du modèle d'affectation

Selon une approche systématique, quelles sont les sources possibles qui expliquent les écarts entre modèle et comptages ? Nous identifions les pistes de réflexion suivantes :

1. Erreur sur les comptages (position, relevés, etc.). -> Cette cause est peu probable, les comptages suspects ont été recomptés avec une forte attention en cours de processus
2. Nombre de comptages insuffisant, surtout dans les bords du périmètre étudié d'où une mauvaise prise en compte des flux entrants (respectivement sortant) du périmètre. -> Cette cause a été identifiée en cours de processus. Elle a été corrigée par l'apport de comptages complémentaires pour définir des flux entrants/sortants
3. Connaissance insuffisante de la variabilité des comptages (variation journalière, saisonnière, etc.) et donc des coefficients de redressement pour disposer de comptages homogènes et adaptés pour la modélisation. -> Le traitement statistique des comptages (passer de 3 x 20 min à 3 x 1 h puis à 24h) manque effectivement de recul pour garantir une représentativité parfaite.
4. Position inadéquate des sections de comptages. -> Ce risque est peu vraisemblable pour les comptages vélo mais possible pour les comptages piétons en raison de la très grande sensibilité des comptages à la position exacte des sections, surtout dans les rues animées.
5. Erreur sur la codification du réseau cyclable (sur les mouvements autorisés, sur les tronçons à considérer, sur les types d'aménagements, sur les pentes, etc.). -> Des contrôles poussés ont été réalisés et ont d'ailleurs permis de comprendre progressivement quels paramètres supplémentaires intégrer dans le modèle, cf. points suivants
6. Erreur sur les paramètres extérieurs au réseau cyclable (gêne du trafic routier, agrément du site, etc.). -> Idem
7. Choix de paramètres de réseau manquants (par exemple une pénalité par nœud pour tenir compte de la complexité de franchissement des carrefours). Il est effectivement toujours possible de complexifier les attributs mais la synthèse de la littérature montre que les paramètres essentiels ont été considérés dans le test sur le périmètre genevois
8. Pondération entre les paramètres qui n'est pas bonne. Ce point est le cœur de la recherche à poursuivre
9. Mauvaise prise en compte des continuités, donc des chemins. -> Des améliorations doivent effectivement être développées pour identifier les chemins possibles et pertinents pour l'affectation
10. Matrice de référence insuffisante ou fautive. -> La faiblesse des données à disposition constitue en tout cas une cause possible de difficulté à finaliser un bon calibrage
11. Erreur sur les données socio-économiques -> Cause peu vraisemblable
12. Découpage en zone et connecteurs inadaptés -> Cause peu vraisemblable

En synthèse, les causes les plus probables d'une affectation partiellement représentative des comptages découlent :

- D'une matrice trop lacunaire
- D'une pondération entre les attributs qui n'a pas pu être testée jusqu'à une amélioration de l'ajustement.
- D'une meilleure approche sur l'identification des chemins possibles et pertinents pour l'affectation

11 Répartition modale

Dans un cadre de planification des transports, l'enjeu principal de la construction d'un modèle de choix de mode est d'avoir une sensibilité « réaliste » aux variables caractéristiques des projets ou politiques visant à promouvoir ou décourager l'usage des modes modélisés. D'un point de vue méthodologique, la prise en compte des modes doux ne remet pas fondamentalement en question les approches de modélisation bien établies pour les modes motorisés. Cependant, les variables usuellement retenues dans ce cadre (coût et temps de parcours) sont insuffisantes pour la modélisation des modes doux. Pour ceux-ci, la littérature récente distingue deux champs de développement.

- Le premier concerne la prise en compte d'éléments observables et mesurables de l'environnement bâti et naturel.
- Le deuxième concerne la prise en compte d'éléments psychologiques, non observables.

Ce chapitre présente l'état des connaissances dans la prise en compte de ces deux éléments dans des modèles de répartition modale, mais évoque également les facteurs plus classiques. Il prend appui sur deux travaux récents de revue de la littérature [147], [148].

De même manière que pour le choix d'itinéraire, les études réalisées sur le sujet portent plus sur les déplacements à vélo que sur ceux à pied.

11.1 Les facteurs classiques

Cette section porte sur les attributs inclus classiquement dans les modèles de choix de mode.

11.1.1 Caractéristiques socioéconomiques

La plupart des études retenues dans [147], [148] identifient le sexe, l'âge et la disponibilité d'une voiture comme des facteurs importants dans le choix de marcher ou de se déplacer à vélo. Ces trois facteurs ont un impact consistant sur la majorité des études ([27], [46], [55], [149]–[152], entre autres). Ainsi, la probabilité de prendre le vélo ou de marcher augmente quand on est un homme et qu'on est jeune. C'est en tout cas la tendance aux USA mais probablement qu'en Suisse l'impact est moins fort. La probabilité d'utiliser le vélo ou de marcher diminue aussi lorsque l'on est équipé d'une voiture. La plupart du temps, ces facteurs ont le même impact sur la marche et le vélo (par exemple, le fait d'être jeune augmente la probabilité de prendre le vélo et de marcher). Dans les études où les modes sont testés indépendamment, le sexe est plus corrélé avec l'usage du vélo qu'avec la marche.

La segmentation des habitants en sous-groupes homogènes dont un concernant les enfants allant à l'école a également été testé par [153].

Le revenu et le niveau d'études sont souvent utilisés comme prédicteurs, mais leur impact n'est pas consistant selon les études (voir également section 2.1.2)

D'autres variables utilisées incluent le statut professionnel [27] ou le type de ménage (nombre d'enfants).

11.1.2 Caractéristiques du déplacement et des alternatives

La distance ou le temps de parcours sont toujours retenus, sous une forme ou une autre, comme facteurs explicatifs du choix de mode (voir [149], [150], [154]–[164],

entre autres), avec un impact négatif sur la part des modes doux. En général, le temps de déplacement est déduit de la distance en appliquant une vitesse moyenne. Pour la marche, on retient en général une vitesse de 3–5 km/h et pour le vélo on retient entre 12 et 20 km/h (voir [29], [155], [164]–[168]). Seulement quelques études font des distinctions à partir de l'âge des cyclistes [168] ou la pente [29] pour la définition des vitesses.

Compte tenu des distances de déplacement relativement courtes des modes doux par rapport aux modes motorisés, les méthodes de calcul de distance utilisées peuvent avoir un impact sur les résultats (notamment pour la marche à pied, voir section 4.2.)

Le coût du déplacement est un élément important dans le traitement des modes motorisés. Généralement, il est fait l'hypothèse **qu'un déplacement à pied ou à vélo a un coût négligeable**. Plusieurs études intègrent le coût des VP et des TC ([150], [155], [166], [168], [169]). Il existe aussi des références concernant le choix modal pour l'accès à la gare ([170]).

Le motif du déplacement est également un élément important. Il est souvent traité de deux manières :

- Par l'estimation de modèles séparés selon le motif ([150], [168], [171])
- Par l'inclusion d'une constante spécifique par motif ([21], [155], [166], [169], [172])

D'autres variables étudiées incluent la période à laquelle se fait le déplacement : semaine / week-end ([21], [172], [173]), période de pointe / période creuse ([155], [167]), jour / nuit [21].

L'information sur l'enchaînement des déplacements peut également avoir un impact. En particulier, des éléments pénalisants qui auraient lieu sur un autre déplacement ou activité (pente forte sur un déplacement précédent ou suivant [29], besoin de transporter des biens [171], proximité de l'école de l'itinéraire domicile-travail [174]...).

11.2 Les facteurs d'environnement

L'une des principales caractéristiques des modes doux est que lors du déplacement, le piéton ou le cycliste est en contact direct avec l'environnement extérieur. Dans les modes motorisés, le véhicule utilisé pour le déplacement crée une séparation avec cet environnement. Par ailleurs, l'absence de moteur requiert un effort physique qu'il est nécessaire de prendre en compte.

La littérature sur l'impact de l'environnement, naturel ou bâti, dans le choix de mode, donne plusieurs variables et donc plusieurs manières de les prendre en compte dans les modèles. Généralement, les éléments environnementaux sont pris en compte sous la forme de caractéristiques à l'origine ou à la destination des déplacements. Il peut s'agir de variables établies à l'aide d'un zonage, ou par la définition de tampons.

Les travaux les plus récents utilisent des données de traces GPS pour définir des variables environnementales sur ou autour de l'itinéraire.

11.2.1 Environnement naturel

Parmi les éléments d'environnement naturel, le plus important pour le choix modal des modes doux, et en particulier du vélo, est la pente ou le dénivelé. Celui-ci peut être calculé à partir du lieu d'origine et de destination des déplacements, dans certains cas. Dans d'autres cas, les dénivelés maximums correspondent à des points intermédiaires, et une approche différente est nécessaire, à l'image de ce qui a été fait dans la présente étude pour le cas de Genève (section 7.1.2) ou de [147] qui a utilisé une méthode similaire sur Portland. D'après [148], **la quasi-totalité des études qui intègrent la variable pente au niveau de la répartition modale** ([21], [29], [151], [175], [176])

trouvent un impact négatif sur la probabilité de choisir le vélo, avec des coefficients significativement différents de zéro.

Les recherches récentes¹¹ sur l'impact de l'utilisation des VAE (vélos à assistance électrique) montrent que l'assistance électrique a pour effet d'estomper l'impact des facteurs liés à l'effort (franchissement de pentes et distances plus longues).

Les conditions météorologiques ont également un impact sur le choix de mode [177].

D'autres éléments ont été introduits par [178], sous la forme d'un indice de « marchabilité » tenant en compte la propreté, la présence de partie à l'ombre, la beauté de paysage, le calme, etc.

11.2.2 Environnement bâti

D'après [147], l'environnement bâti comprend l'usage du sol, les infrastructures de transport et le design urbain. Dans la grande majorité des cas, les modèles de choix de mode intègrent les éléments d'environnement à l'une ou aux deux extrémités du déplacement. Pour les modes motorisés, cette manière de procéder est adéquate, dans la mesure où le contact avec l'extérieur pendant le déplacement est limité. Pour les modes doux, le contact avec l'extérieur se déroule pendant la totalité du déplacement.

Parmi les 25 études recensées par [147], seulement cinq utilisent des variables relatives à l'itinéraire ([29], [165], [174], [179], [180]). En l'absence de modèles d'affectation ou de choix de chemin, l'itinéraire entre l'origine et la destination est déterminé soit à partir du plus court chemin, soit par la disponibilité de cette information dans le jeu de données (déclaration).

Lorsque la prise en compte de l'environnement bâti se fait à l'origine ou à la destination, les principales variables retenues sont :

- Usage du sol : densité des emplois et populations, selon des zones ou des tampons, mixité de l'usage du terrain (pourcentages de différents types d'usages, par zone et par tampon également ;
- Système de transport : nombre de culs-de-sac à l'origine, densité des intersections à l'origine et à la destination, densité des trottoirs ;
- Design urbain : taille des pâtés de maisons (bloc size), densité des immeubles, âge des immeubles.

Lorsque l'on prend en compte l'environnement de la route entre l'origine et la destination, les principales variables retenues concernent les infrastructures de transport : présence d'aménagements cyclables, de « raccourcis » piétons, le nombre de carrefours à haut débit à traverser, etc. Des variables telles que la densité des rues et des trottoirs ont été introduites par [181]. [178] intègrent des variables liées à l'itinéraire (présence de restaurants, magasins, arrêts de bus, etc.), les obstacles dans l'environnement (autoroutes, routes avec trafic dense, etc.) la condition des trottoirs (largeur, état général, séparation du trafic, etc.).

Le travail de [147] a montré que la prise en compte des attributs d'environnement est très variée dans les approches. En effet, il y a peu de variables qui sont partagées sur plusieurs études (il y a des variables proches dans la logique, mais dont la construction est différente). Il a également mis en évidence que l'inclusion des attributs environnementaux à l'échelle des chemins, pour le choix de mode, améliore le niveau d'ajustement du modèle.

¹¹ Recherche en cours. SVI 2014/003.

11.3 Les facteurs psychologiques

Selon [148], le développement d'une recherche autour des variables psychologiques est liée au constat que les éléments classiques de concurrence entre modes motorisés, temps et coût, ne permettent pas d'expliquer l'attractivité des modes doux par rapport aux modes motorisés. Cette recherche, centrée sur l'attractivité du vélo, souligne que les facteurs psychologiques peuvent s'avérer les principaux facteurs explicatifs du choix de mode.

La modélisation des facteurs psychologiques se fait suivant deux approches :

- La première approche fait appel à des **modèles de choix discret et inclut directement dans la fonction d'utilité des indicateurs psychologiques. Ces indicateurs sont traités comme des variables discrètes ou continues, mais il n'y a pas de construction explicite de variables latentes**¹². Parmi les travaux utilisant cette approche, on peut citer [55] qui utilise la pluie et le trafic automobile comme des indicateurs de risque, ou des indicateurs plus abstraits comme le confort des vêtements ou la commodité du déplacement à vélo. Dans leur étude, [46] incluent plusieurs indicateurs subjectifs liés notamment à la sécurité du trajet, celle du lieu de destination pour garer le vélo, l'importance accordée à l'environnement et l'effort réalisé. La principale limite de cette approche est la multicollinéarité qui peut naître de l'utilisation des indicateurs.
- La deuxième approche **inclut les variables psychologiques sous forme de variables latentes**. Parmi les attitudes et perceptions étudiées, on peut citer la pression sociale au travail [171], la perception des difficultés de conduire, l'influence sociale, la sensibilité environnementale, etc.[181], la perception sur les alternatives disponibles [156], les pratiques des autres, le statut social du cycliste, la conscience écologique [182], [183].

11.4 Bilan pour une application pratique

Les attributs « objectifs » ont toujours un impact important sur la conception d'un modèle de choix de mode.

La disponibilité de données de trace GPS permet d'améliorer la description de l'environnement dans lequel se réalise le déplacement, ce qui permet d'améliorer l'ajustement des modèles de choix de mode.

Les facteurs psychologiques, comme les attitudes, les normes... ont une incidence forte sur le comportement d'utilisation des modes doux. Leur prise en compte fait appel à des modèles structurels permettant la prédiction de ces variables. Cependant, les variables latentes étant stochastiques, cela augmente le niveau de complexité des modèles, qui deviennent des mixtures de modèles simples, exigeant des techniques d'intégration numérique ou par simulation Monte-Carlo.

¹² Les variables latentes sont des variables non-observables, déduites à partir d'indicateurs observables.

12 Procédure recommandée pour constituer un modèle macroscopique piéton-vélo

Deux méthodes se distinguent dans la réalisation d'un modèle macroscopique des piétons et des vélos. La possibilité du choix de l'une au l'autre des méthodes dépend uniquement de l'existence ou non d'un modèle macroscopique sur le périmètre. Un tel modèle peut-être monomodal ou multimodal (par exemple, le travail effectué sur le périmètre du centre-ville de Genève, dans le cadre de ce mandat, s'est basé sur le modèle multimodal transfrontalier existant).

Dans les deux cas, la constitution d'un modèle modes doux doit passer par plusieurs étapes essentielles :

12.1 Constitution d'un zonage

Cas d'un modèle préexistant sur le périmètre	Cas d'un modèle créé de toute pièce
<p>En fonction de la finesse du zonage du modèle existant, il peut être nécessaire de le redécouper ou non.</p> <p>400m*400m partout où l'on veut analyser les résultats d'une affectation vélo et 200*200 m pour les piétons (voir chapitre 5)</p>	<p>Le zonage sera à réaliser. Celui-ci doit répondre à plusieurs critères (voir chapitre 5) :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Taille des zones en lien avec la distance des déplacements ; • Limiter les déplacements intrazonaux ; • Disposer de données permettant de caractériser les zones sur le maillage choisi (données socio-économiques, données scolaires, données de densité...)

12.2 Constitution de l'offre

Cas d'un modèle préexistant sur le périmètre	Cas d'un modèle créé de toute pièce
<p>Il s'agit de compléter le réseau existant. Plusieurs types de compléments s'imposent :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Des compléments du réseau viaire. Dans les modèles les réseaux sont en général simplifiés. Modéliser les modes doux et en particulier les piétons implique d'avoir une certaine exhaustivité dans la description des voiries (y compris réservées aux modes doux) ; • Intégration sur chacun des tronçons des caractéristiques impactant les usagers des modes doux. Parmi les caractéristiques importantes à retenir : <ul style="list-style-type: none"> ○ Les longueurs des aménagements cyclables (de préférence selon la décomposition en pistes, bandes, voies partagées avec les piétons, voies partagées avec les TC). ○ Les longueurs de certains tronçons traversant des espaces ayant un attrait esthétique particulier, comme les bords des rivières ou des lacs. ○ Le dénivelé. Les données les plus précises pour la définition de cet attribut sont les modèles numériques de Terrain et surface. Le temps de traitement de ces données est important • Intégration sur les nœuds ou les mouvements au nœud de 	<p>Il est nécessaire d'importer l'intégralité du réseau, à partir d'une ou plusieurs bases existantes. Il est rare d'avoir des graphes modes doux complets (en général les graphes sont créés pour des besoins de navigation). Des graphes modes doux sont construits par les administrations publiques mais leur exploitation demande de compléter et retravailler le graphe.</p> <p>La codification du graphe mode doux demande un temps de codification manuelle important.</p> <p>Concernant le réseau viaire, plusieurs sources de données sont disponibles et décrites au chapitre 3. Ce réseau viaire doit intégrer les caractéristiques impactant les usagers modes doux.</p> <p>Il est également nécessaire d'importer les générateurs de trafic importants et leurs caractéristiques (par exemple les arrêts TC).</p> <p>Enfin, disposer de comptages routiers sur les voiries existantes est très utile pour qualifier la typologie des voiries et les nuisances liées au mode routier (sentiment d'insécurité, bruit, pollution).</p>

12.3 Constitution de matrices de demande de préchargement

Cas d'un modèle préexistant sur le périmètre	Cas d'un modèle créé de toute pièce
<p>S'il existe un modèle multimodal sur le périmètre, cela offre deux possibilités de constitution des matrices :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Utiliser matrices calculées par le modèle (cas d'un modèle multimodal) • Utiliser les données d'enquête et des comptages <p>Les matrices peuvent ainsi être constituées conformément aux propositions faites au chapitre 8.</p>	<p>Dans ce cas, il est nécessaire de concevoir les modèles de Génération, Distribution et Répartition modale avant de faire l'affectation. Les données disponibles ne permettent pas de créer une matrice sans faire un nombre important d'hypothèses et de rapprochements de jeux de données, comme les comptages et les données de population.</p>

12.4 Calage de l'affectation

Une fois l'offre, le zonage et les matrices de demande constitués la méthodologie de calage de l'affectation est la même, qu'un modèle soit préexistant ou non.

1. Collecter des données qui permettront de valider la qualité du calage (comptages)
2. Paramétrer le modèle d'affectation voir chapitres 9 et 10.
 - a. Si seulement des données de comptage sont disponibles, utiliser une méthode d'optimisation stochastique. Le nombre de paramètres étant important, cette méthode facilite la recherche de combinaisons de paramètres pour l'affectation
 - b. Si des données GPS sont aussi disponibles : estimer un modèle de choix d'itinéraire pour déterminer les taux de substitution puis, lors de l'affectation dans le réseau déterminer le paramètre d'échelle permettant de coller au mieux aux comptages
3. Valider le calage du modèle en comparant les charges modélisées et les comptages disponibles.

12.5 Calage du choix modal

L'introduction des modes doux dans un modèle de choix modal existant ou la création d'un modèle les intégrant demande de ré estimer un modèle de choix de mode. La littérature distingue les facteurs explicatifs principaux suivants (en plus des facteurs usuellement utilisés pour les modes motorisés) :

- Les facteurs classiques, entre lesquels on a notamment :
 - Caractéristiques socioéconomiques comme :
 - L'âge
 - Le sexe
 - Le niveau de motorisation
 - Le niveau d'équipement en vélos
 - Caractéristiques du déplacement et des alternatives comme
 - La distance
 - Coût
 - Motif
 - L'enchaînement des déplacements
- Les variables d'environnement, que ce soit à l'origine, la destination ou sur le parcours. À noter que les variables d'environnement étaient souvent utilisées à l'origine et à la destination et beaucoup plus rarement sur l'itinéraire. Avec un modèle d'affectation en place, cette prise en compte devient possible et est recommandée. Les variables d'environnement peuvent être catégorisées en 2 groupes :
 - Environnement naturel, les plus importantes étant :
 - La pente
 - La météo
 - Environnement bâti :
 - A l'origine ou à la destination :
 - Densité de population d'emploi
 - Densité des intersections
 - Taille des pâtés de maisons
 - Sur le parcours :
 - Présence d'aménagements cyclables
- Les facteurs psychologiques : leur modélisation demande de faire appel à des variables latentes, donc à des modèles structurels, et à un recueil de données spécifiques.

13 Conclusions finales et recommandations de recherches ultérieures

13.1 Bilan de la recherche, les éléments acquis et non acquis

Les principaux enseignements de la recherche sont :

13.1.1 Généralités

La réalisation d'un modèle de prévision macroscopique pour les vélos et pour les piétons est possible à partir d'un modèle multimodal préexistant (modèle pour TIM et/ou TC) moyennant un certain nombre d'adaptations ou être développée à partir de rien.

Les expériences accumulées en matière de modélisation vélos sont presque suffisantes pour établir un modèle de prévision avec une affectation calibrée précise. Par contre, de nombreux éléments théoriques ou issus d'expérimentations manquent encore pour les modèles d'affectation piétonne.

Une problématique spécifique de ces modèles est liée à la courte distance des trajets à pied ou à vélo. Il est nécessaire d'affiner la granulométrie usuelle des modèles, soit la finesse de la combinaison de trois éléments: la taille des zones, la densité du réseau, la position et la taille des connecteurs. Ces trois éléments sont interdépendants.

Une autre grande difficulté de ces modèles est liée aux données nécessaires au calibrage, tant le nombre et la qualité des comptages en section que la finesse et la représentativité d'une matrice. Les matrices à disposition sont généralement très peu représentatives pour les vélos en raison d'un trop faible échantillonnage des enquêtes. Cette réalité renforce d'ailleurs l'intérêt de développer des modèles pour la prédiction des flux cyclistes puisque la modélisation permet justement de construire des matrices et des flux à partir de sources disparates et de données comportementales issues du micro-recensement.

Les techniques automatiques de relevé (Bluetooth, suivi GPS, etc.) font des progrès rapides et constituent déjà des sources d'informations très intéressantes. La représentativité de ces données n'est cependant pas suffisante. Si ces sources de données sont utilisées pour la construction d'un modèle, il faut impérativement les combiner avec des comptages classiques ou d'autres moyens de redresser les données.

Pour l'affectation des modes doux, un algorithme stochastique est préférable à un algorithme du plus court chemin, afin de mieux tenir compte de la dispersion des comportements, qui dépendent de plusieurs facteurs comme l'effort lié aux dénivelés et le type d'infrastructure en plus de la distance ou le temps de parcours.

L'affectation doit faire intervenir des caractéristiques de tronçon, de nœuds et de chemin (ensemble du parcours possible de l'origine à la destination).

13.1.2 Enseignements pour les modèles vélos

Pour la modélisation des vélos, une taille de zone d'environ 400 m x 400 m semble adaptée. Dans le cas de Genève, une telle résolution de zone permet d'identifier environ 98% des déplacements cyclistes comme étant des déplacements interzones.

Avec une telle finesse de zone, il semble nécessaire de représenter toutes les voies circulables par les cyclistes. Les connecteurs ne peuvent pas être ceux des modes TIM ni ceux des TC. Les tests ont montré la nécessité d'avoir des connecteurs courts pour maximiser l'affectation sur les réseaux.

Les principaux paramètres de réseau à considérer pour l'affectation sont dans l'ordre : la distance (facteur déterminant), les aménagements cyclables (le type d'aménagement ne semble pas très déterminant sauf les contre-sens cyclables qui permettent de raccourcir les trajets et surtout les pistes cyclables), les éléments d'agrément positif (rive de cours d'eau, parc significatif), la pression du trafic (synthétisée par les charges de trafic et éventuellement par la vitesse), et la pente par tronçon.

Plusieurs attributs de réseau sont facilement disponibles avec les bases de données actuelles. Par contre, le calcul des pentes par tronçon avec un modèle de terrain implique de calculer les pentes sur des tronçons relativement court de de 5 à 10 m pour être représentatif et nécessite de nombreux contrôles chronophages. Il est donc recommandé de définir un attribut de pente uniquement pour les rues qui sont a priori critiques pour les cyclistes (approche pragmatique plutôt que systématique).

Plusieurs facteurs peuvent réduire le nombre de chemins possibles, par exemple certains mouvements interdits ou impossibles aux carrefours, un tronçon à pente trop forte, un risque localisé comme un franchissement difficile de voies de tram avec fort trafic, etc. Il faut pouvoir en tenir compte dans l'affectation.

Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la spécification s27. Celle-ci utilise seulement la distance pour la recherche des chemins possibles, avec un élément aléatoire important. Elle utilise comme variables explicatives les aménagements cyclables, les éléments d'agrément positif, la pression du trafic et la pente maximale.

En ce qui concerne l'établissement d'une matrice de base, pour pallier au sous-échantillonnage du micro-recensement de Genève, le meilleur résultat a été obtenu en utilisant une matrice modélisée dans le MMT, ajustée selon les données de comptages :

- en limite de périmètre
- sur la ligne écran constituée par la traversée du Rhône

La mise en perspective de ce travail réalisé sur la matrice OD a permis d'en tirer des enseignements en matière de recueil de données. En effet :

- Le développement d'un modèle d'affectation vélo fait nécessairement appel à la réalisation de comptages spécifiques, puisque les comptages réalisés habituellement représentent un nombre d'observations trop faible pour le calage de l'affectation.
- Avant la réalisation de ces comptages spécifiques, il faut prévoir la définition d'un certain nombre de lignes écran :
 - Celles-ci peuvent être constituées à partir de coupures naturelles ou artificielles du territoire. Elles doivent être définies selon un découpage de l'aire d'étude permettant de les comparer aux flux de la matrice OD
 - Toutes les sections coupant la ligne écran sont dotées d'un poste de comptage (idéalement d'un comptage 24h).
- De cette manière, les comptages peuvent être utilisés non seulement pour valider les charges, mais aussi pour fiabiliser la matrice OD à affecter.

La définition de lignes écran pour fiabiliser la matrice OD est plus importante pour les affectations vélo que pour les affectations modes motorisés, en raison de l'incertitude plus grande sur la matrice OD vélo issue des données d'enquêtes déplacements et des éventuels retraitements à partir d'autres données auxiliaires.

13.1.3 Enseignements pour les modèles piétons

Pour les piétons et dans le cas de Genève, la taille des zones doit être inférieure à 400 m X 400 m car cette résolution ne permet de couvrir que 80% des déplacements réalisés intégralement à pied. Il semble qu'une taille de 200 m X 200 m soit déjà satisfaisante. Pour éviter un tel découpage ou pour améliorer la qualité de l'affectation il est recommandé d'ajouter des générateurs ponctuels tels que gares, centres commerciaux,

écoles, etc. Une autre stratégie qui n'a pas pu être testée consiste à ajouter du « bruit », soit une proportion de déplacements courts qui viennent charger le réseau piétonnier.

La plus grande complexité pour les piétons découle de la très grande hétérogénéité des zones sous l'angle piéton, de la difficulté à localiser des sections de comptages représentatives de la zone et de la forte proportion de trajets piéton liés à des étapes complémentaires à un autre mode (accès à un parking, accès à un arrêt de transport public).

La construction du réseau piétonnier n'est pas triviale. Si les bases de données usuelles apportent une grande partie des informations disponibles, les raccourcis, multiples passages au travers de parcs, de centres commerciaux ou de gares doivent être ajoutés à la main.

Plus encore que pour les vélos, les connecteurs doivent être courts et multiples afin de forcer à l'affectation sur le réseau.

Une autre difficulté est liée au fait que les modèles affectent des déplacements et non pas des étapes alors que le piéton est souvent un mode de déplacement complémentaire (autrement dit une étape dans une chaîne de déplacement). En effet, sur la base du MRMT de Genève, les étapes issues de déplacements intermodaux représentent environ 40% du total des km parcourus par les piétons. Ces étapes échappent donc à la modélisation et rendent la comparaison avec les comptages difficiles s'il n'y a pas d'astuce pour les prendre en compte. Par exemple, les déplacements piétons d'accès aux arrêts peuvent être calculés directement par un modèle multimodal (si celui-ci préexiste). Par contre cela demande plus de travail pour le calage du modèle TC qui est généralement construit de manière à connecter directement les zones aux arrêts TC.

13.2 Recommandation pour des recherches ultérieures

Selon notre expérience, des recherches doivent être prioritairement entreprises dans les domaines suivants :

- Disposer de bases statistiques et de comptages suffisants. Cela signifie en particulier compléter les recommandations existantes (cf., le rapport de recherche SVI 2001/503 [184]) sur la densité de comptages à réaliser, sur la méthode d'échantillonnage (comptages courts ou de 60 minutes avec les règles de redressement), sur la localisation dans la ville pour être représentatif (cf. 3.5.1, 3.5.3 et 3.5.4).
- Établir des courbes de variation journalières caractéristiques de flux piétons et cyclables selon les sites et le contexte (cf. 3.5.2 et 3.5.5).
- Disposer de matrice O-D très nettement enrichies pour les flux cyclistes
- Améliorer les modèles de choix d'itinéraire pour des déplacements piétons ou cyclables, et les simplifier dans le processus d'affectation.
- Mieux comprendre la sensibilité aux caractéristiques de réseau pour 4 catégories de cyclistes : ceux prioritairement sensibles à la distance (par exemple les pendulaires), ceux prioritairement sensibles à l'effort, notamment la pente, ceux prioritairement sensibles à la sécurité et aux risques de parcours (apparemment avec une surreprésentation des femmes), ceux prioritairement sensibles à l'agrément. Examiner si la proportion de ces 4 catégories est liée à la « culture » vélo d'une ville ou à l'importance de la part modale vélo.
- Poursuivre les tests d'une pondération adaptés des attributs dans le choix d'itinéraires jusqu'à convergence des résultats de modélisation avec les valeurs observées sur site
- Utiliser une approche basée sur les chaînes de déplacement (prise en compte des étapes) et non sur les OD.

La littérature évoque un grand nombre de paramètres explicatifs pour le choix des chemins et accessoirement pour le choix modal. Peu de paramètres sont unanimement

reconnus par les auteurs. Notre intuition est que les paramètres explicatifs sont en grande partie liés au contexte local, notamment au « stade de développement et de pratique du vélo » des sites observés.

Sur cette intuition ou ce postulat, les facteurs explicatifs sont différents selon les phases de développement¹³ du vélo dans une ville, donc la pondération à utiliser pour l'affectation évolue dans le temps. Lorsque les cyclistes sont minorisés, la sécurité et la continuité des aménagements cyclables importent beaucoup. Au fur et à mesure que les cyclistes deviennent un mode de déplacement reconnu et respecté dans l'espace public, le critère de distance semble être déterminant et dominant

¹³ Par niveau de développement il faut comprendre la mixité du trafic, le rapport de force des cyclistes avec les autres modes dans l'espace public, la généralisation de l'usage du vélo à toutes les couches d'âge et de classes sociales, etc)

Annexes

I	Présentation du modèle multimodal transfrontalier (MMT)	155
I.1	Contexte historique	155
I.2	Contexte technique : principales caractéristiques du MMT	155
II	Autres modèles examinés	157
II.1	Modèle multimodal du Grand Lyon	157
II.2	Modèle multimodal de Berne	157
II.3	Modèle multimodal de Grenoble	158
II.4	Modèle de Bâle	158
III	Niveau de développement des logiciels	159
III.1	Visum (PTV)	159
III.2	EMME (INRO)	159
III.3	SATURN (Atkins)	160
III.4	TransCAD (Caliper).....	160
III.5	Cube (Citilabs).....	161
IV	Compléments	163
IV.1	Courbes types de répartition des déplacements piétons sur 24h.....	163
IV.2	Courbes types de répartition des déplacements vélo sur 24h.....	168
IV.3	Analyse Micro-recensement transport 2010	173
V	Calage final des paramètres de choix de route	175
V.1	Précisions sur la définition des bornes pour la recherche de paramètres avec GenSA.	175
V.2	Script R (pour s27)	176

I Présentation du modèle multimodal transfrontalier (MMT)

I.1 Contexte historique

Le Modèle Multimodal Transfrontalier (MMT) a été développé par le bureau d'étude Citec à l'échelle du « Grand Genève », pour le compte de plusieurs partenaires suisses et français, dès 2009. La maîtrise d'ouvrage est constituée des principales collectivités présentes sur le territoire de l'agglomération : État de Genève, État de Vaud, Syndicat Mixte d'Études de Transport et des Déplacements, Région Rhône-Alpes, DRE Rhône-Alpes, CG de l'Ain et CG de la Haute-Savoie.

Dès sa mise en place, le MMT a contribué à des prévisions pour des études partenariales, et aussi pour le programme d'agglomération (SA2). Il a également servi pour des prévisions de fréquentation de projets TC (extensions de tramway, BHNS, CEVA) et aussi pour des grands projets d'infrastructures routières. Enfin, le MMT a été utilisé dans une multitude d'études d'impact et de circulation à des échelles plus fines.

Le MMT a connu des améliorations successives depuis sa conception. Actuellement, un travail de calibration pour l'année 2014 par la DGT est en cours de finalisation. La version du modèle issue de ce recalage, MMT 2.2, est celle sur laquelle l'étude expérimentale de la modélisation des modes doux prend appui.

I.2 Contexte technique : principales caractéristiques du MMT

Le détail des caractéristiques techniques du MMT peut être trouvé dans le rapport [127].

C'est un modèle multimodal macroscopique sur 946 zones (881 internes et 65 externes). Il a été construit avec le logiciel VISUM de PTV. Celui-ci permet d'effectuer tous les calculs relatifs à la simulation. Il permet de produire les matrices OD par mode par l'intermédiaire du Module VISEM, et de calculer les itinéraires sur les réseaux TC (affectation selon la cadence) et VP (affectation à l'équilibre).

Le calcul des prévisions de trafic se fait sur les heures de pointes pour les VP et sur les périodes de pointe pour les TC. Le choix modal comporte 4 modes : VP, TC, vélo, piéton et les affectations ne se font que pour les VP et les TC.

II Autres modèles examinés

II.1 Modèle multimodal du Grand Lyon

Le modèle du Grand Lyon propose un calcul de choix modal pour les déplacements marche-à-pied et vélo qui reposent essentiellement sur le temps de déplacement avec le mode concernée et la densité de population et d'emplois.

De plus, une affectation est réalisée pour les cycles. Cette dernière a été calée sur la base de 379 postes de comptages qui se trouvent essentiellement sur des axes circulés. La fonction du temps généralisé définie ainsi :

Tps généralisé = 100 x tps vélo + 100 x tps advélo + bonusmalus

avec :

- *tps vélo* le temps de parcours de la distance avec une vitesse de 15 km/h,
- *tps advélo* un temps additionnel ajouté sur chaque tronçon et dépendant de l'aménagement cyclables défini ainsi :

Tab. 1 Modèle du Grand Lyon : Classes de cyclabilité et temps additionnel

Aménagement	Cyclabilité	Vitesse (km/h)	Temps additionnel par rapport à la voie verte pour 1 km (s)
Aucun	0	12	136
Mixité	1	13	113
Double sens cyclable	2	14	93
Couloir bus non élargi	4	16	61
Bande cyclable	6	18	36
Couloir bus élargi	6	18	36
Piste cyclable	10	22	0
Voie verte	10	22	0

- *Bonusmalus* un temps additionnel ajouté ou soustrait aux mouvements aux nœuds (+ 5s pour les mouvements de tourne-à-gauche et -10s pour les mouvements de tourne-à-droite).

Retours d'expérience

Les comptages étant peu nombreux, le calage s'est révélé assez simple. Par ailleurs, les comptages se trouvent principalement sur des axes circulés, la qualification du réseau est donc également plus simple.

II.2 Modèle multimodal de Berne

Le modèle de Berne tient compte des vélos et piétons comme modes de transports pour la génération et la distribution, mais ne les affecte pas. Les données socio-économiques utilisées sont : population, nombre d'actif, nombre d'emplois, nombre de scolaires, surfaces commerciales, offre culturelle, offre de loisir, hôtels et restaurant, possession d'une place de parking, d'une voiture, d'un abonnement TC. Les temps de parcours à pied et à vélo sont utilisés pour le calcul de la fonction d'utilité servant à la distribution et au choix modal. Le modèle effectue la distribution et le choix modal dans un même procédé « Nested-Logit » dans lequel le coût généralisé pour les déplacements à vélo et à pied tient compte d'un temps de parcours calculé avec les vitesses de 9km/h pour les vélos et 4km/h pour les piétons, mais aussi de l'altitude de la destination par rapport à l'origine. Selon le motif de déplacement ce paramètre est pris en compte différemment.

II.3 Modèle multimodal de Grenoble

Le modèle de Grenoble a été utilisé pour comprendre l'évolution de l'usage du vélo sur les autres modes en partant du constat suivant : dans de nombreuses agglomérations l'évolution de la part modale vélo attendue pour les années à venir ne s'explique pas que par une amélioration de l'offre. Elle est aussi issue d'une évolution des comportements de mobilité des usagers (conscience écologique, développement du vélo électrique, sport...)

II.4 Modèle de Bâle

Le modèle de la Région Bâle (Gesamt Verkehr der Region Basel) est opérationnel depuis l'été 2015. Il a été conçu avec le logiciel transcad. Le périmètre de calibration correspond au district tri-national Eurodistrict Basel mais le périmètre d'influence comprend Bâle, Mulhouse et Fribourg. Le modèle est constitué de 25'000 zones et les matrices totalisent 0.4 milliards de relations.

Le but du modèle est de disposer d'un outil de planification des transports et d'aménagement du territoire qui permette d'étudier des variantes d'infrastructures et d'urbanisation. En ce qui concerne les vélos, l'ambition est d'identifier les principaux flux et itinéraires de déplacement sans trop attacher d'importance à l'exactitude des volumes de déplacement. Le modèle doit permettre, par exemple, de répondre à la question de la pertinence de nouveaux raccourcis vélo (pont sur le Rhin). Il doit aussi permettre d'identifier les impacts sur le choix modal puisque l'on observe une forte concurrence modale entre vélo, TC et TI.

Les modes considérés pour la demande sont : piéton, vélo, TC+piéton, TC+vélo, TC+TI, TI. Pour l'affectation, le modèle traite les modes suivants : TI, TC, vélo (somme de la matrice vélo et vélo en rabatement sur les TC).

Sur le district tri-national, **la taille des zones** est de 1 ha en agglomération (Bâle Ville) et de 4 ha en campagne. Les données socio-économiques utilisées sont les habitants (3 classes d'âge, 2 classes d'actifs), les places de travail (4 classes selon le motif : alimentaire-commerces, formation, loisirs, tertiaire et autres), la possession d'une voiture ou d'un abonnement TC.

Les **attributs de réseau** utilisés sont la distance (12 km/h pour le cycliste) et un *bonus-malus* classant les rues en 5 catégories : rues favorables ou à faible trafic (par exemple zone 30, bonus 20%), rues principales avec aménagements (piste cyclable, bande cyclable, bonus 10%), rues principales sans aménagements (malus -10%), quelques tronçons de zone piétonne (malus -75%) et des tronçons avec vélo au pas (4 km/h). Ces catégories sont définies selon le plan vélo et non pas selon le comportement effectif sur le terrain.

Le modèle n'a pas été calibré pour les cyclistes. Environ 15 comptages en section auraient été disponibles. L'affectation s'est basée sur le plus court chemin (en temps de parcours). **Le choix modal** se base sur le temps de parcours. Les paramètres associés aux motifs de déplacements sont issus du microrecensement et une enquête de type préférence déclarée pour les motifs formation, achat, pendulaire, loisir, déplacement utilitaire.

Retours d'expérience : Le modèle a permis de bien connaître la concurrence entre les modes. Il a une bonne fiabilité du comportement modal. Il fournit des informations correctes sur les grands flux surtout lorsqu'il y a des points de franchissement contraints. Les qualités spécifiques du modèle sont le choix modal, le module de bike and ride la prise en compte du stationnement B+R aux gares. Par contre, pour d'autres usages il faudra améliorer l'affectation vélo et la codification du réseau (donner des catégories d'aménagement, prendre en compte les sens uniques, etc.).

III Niveau de développement des logiciels

Le modèle de Genève est basé sur le logiciel VISUM, de la société PTV. Mais d'autres logiciels existent sur le marché. Afin de donner une image un peu plus complète, nous avons contacté d'autres fournisseurs de logiciel afin qu'ils nous décrivent les possibilités en matière de modélisation de piétons et de vélos. Nous re prenons ci-dessous leurs réponses, traduites et simplifiées.

En résumé, il semble que EMME et TransCAD soient bien avancés dans l'intégration des modes piétons et vélos. C'est moins clair pour Cube, où la description reçue est plus commerciale que technique. Il semble qu'il soit possible de modéliser les vélos, mais pas les piétons. SATURN n'inclut pas de fonctionnalité spécifique pour ces modes. AIMSUN propose un outil de simulation microscopique de trafic, qui possède quelques fonctionnalités pour les vélos, et interface avec un autre logiciel pour les piétons. TransCAD propose aussi un outil microscopique (TransModeler) qui modélise les vélos et, en partie, les piétons.

Noter que la liste de logiciels choisie n'est certainement pas exhaustive, mais représente les outils les plus utilisés par les professionnels dans le monde, à la connaissance des auteurs.

III.1 Visum (PTV)

Page web : <http://vision-traffic.ptvgroup.com>

Source : Andreas Koeglmaier

Visum intègre une procédure d'affectation stochastique conçue spécifiquement pour les vélos. Elle permet d'intégrer les attributs du chemin dans la fonction de temps généralisé (et pas seulement ceux des tronçons).

Possibilité d'interface avec des modules de microsimulation dynamique des piétons (Viswalk)

III.2 EMME (INRO)

Page web: www.inrosoftware.com

Source: Daniel Florian, CEO of INRO

Le trafic piéton peut-être modélisé comme un mode « auto auxiliaire », qui permet d'affecter la demande piétonne sur un sous-ensemble piétonnier du réseau routier, en utilisant une affectation déterministe (tout ou rien) ou stochastique (logit, probit, uniforme). Les temps de marche peuvent être spécifiés par arc pour prendre en compte les pentes des rues, etc. En principe, le réseau piéton devrait inclure toutes les possibilités de marche, ce qui le rend significativement plus grand que le réseau routier.

En définissant un mode « marche » de cette façon, il est possible d'intégrer la demande piétonne avec le réseau routier (véhicules) et les déplacements combinés (marche-voiture-marche), qui peuvent être modélisés et affectés en utilisant la procédure de « *trip-chaining* » de Emme.

Il est également monnaie courante d'intégrer le mode « marche » avec le transport en commun à l'aide d'un « mode transport en commun auxiliaire » pour représenter les déplacements piétons qui se connectent à des services de transport en commun. Si une option "marche uniquement" s'avère attractive, elle peut être sélectionnée par les voyageurs (cette fonctionnalité est configurable). Ainsi, les itinéraires en transport en commun pourront régulièrement inclure des portions de marche à pied sur toute l'étendue du réseau de marche, et pas seulement aux arrêts de transport en commun.

Le mode combiné (marche-transport public-marche) peut aussi être modélisé et affecté comme décrit ci-dessus.

Il y a également eu des tentatives d'utilisation des fonctions de performance (volume/retard) pour prendre en compte la congestion des piétons sur les liens gérés autour des arrêts de transport public.

Le trafic de vélos peut également être modélisé de différentes manières. Si le modèle de demande est *path-based* (path-size logit, ou équivalent), il est possible de générer un ensemble de chemins sur un réseau de vélo qui contient tous les arcs accessibles et toutes les variables pertinentes dans le modèle de demande (pente, nombres de carrefours, pistes cyclables, etc.)

III.3 SATURN (Atkins)

Page web: www.saturnsoftware.co.uk

Source: Dirk Van Vliet

Tout d'abord, les piétons. Essentiellement, ils ne sont modélisés dans SATURN que d'une manière très indirecte, voire pas du tout. Pour le moment, les utilisateurs peuvent inclure des phases de piétons aux feux (et en effet il est assez commun en pratique de le faire), mais ces temps ne seront pas influencés par la demande des piétons. Même chose concernant les capacités aux carrefours.

Les vélos peuvent être modélisés plus directement. Traffic for London (TfL) utilise cette fonctionnalité. Ils utilisent une matrice de demande pour les vélos qu'ils affectent sur le réseau, qui comprend des pistes cyclables et autres infrastructures spécifiques pour les vélos.

III.4 TransCAD (Caliper)

Page web: www.caliper.com

Source: Howard Slavin, président of Caliper.

TransCAD est régulièrement utilisé pour les modèles de flux de piétons et les cyclistes. TransCAD comprend des fonctionnalités pour la construction de réseaux séparés ou multimodaux incorporant ces modes. Il pourrait également être utilisé pour construire un réseau multimodal combinant vélos et bus, même si je ne suis pas sûr que quiconque l'ait déjà fait. En ce qui concerne les modèles spécifiques pour la fréquence des déplacements, le choix de la destination, et le choix de mode, tous les outils sont prévus pour la simplification du réseau, et l'estimation et l'application de modèles agrégés et désagrégés. En ce qui concerne l'affectation de trafic, TransCAD supporte les fonctions volume/retard écrites par l'utilisateur pour les modèles d'affectation macroscopiques, et la définition de pistes cyclables. TransCAD fournit également une méthode d'affectation multimodale, multi-classes, basée sur les chemins. La SIG et la base de données relationnelle intégrée dans TransCAD rendent la cartographie et l'analyse de gros fichiers GPS assez simple.

Bien sûr, les modèles « macro » ont des limitations considérables pour représenter la dynamique de la circulation. Dans notre simulateur de trafic microscopique (TransModeler), nous modélisons explicitement les vélos en tant que composants de l'ensemble du trafic. Ils interagissent avec les modes motorisés explicitement. Nous modélisons également les passages piétons et les cycles piétons des feux de circulation. Nous allons ajouter des capacités supplémentaires de simulation des piétons à l'avenir.

III.5 Cube (Citilabs)

Page web: www.citilabs.com

Source: Robert Kohler, North America Sales Manager

Voici des exemples dans lesquels CUBE a été utilisé pour les piétons et la modélisation de vélos, dans le cadre de projets à Marikina, Philippines et à Londres, en Angleterre. Projet Marikina; le modèle CUBE a permis d'évaluer différents choix politiques et les scénarios. Cela comprenait des éléments tels que les emplacements et l'efficacité des pistes cyclables et des stratégies d'apaisement de la circulation. CUBE a été utilisé pour répartir les déplacements quotidiens totaux dans des matrices origine-destination (OD), et de les intégrer dans les affectations sur autoroute, transport en commun, et vélos. CUBE a également été utilisé pour évaluer la probabilité d'utilisation de vélos et d'obtenir une meilleure compréhension de l'ensemble du système de transport. Ce modèle a permis de comprendre le potentiel de la promotion des transports non motorisés, ainsi que de fournir un support à la décision pour l'analyse des différentes alternatives de politique des transports.

Projet de Londres: le modèle CUBE va être utilisé pour l'évaluation des impacts des changements de l'infrastructure et la politique cyclable sur le niveau de service de vélo, et le flux de la circulation. Un modèle d'affectation de cycliste est aussi envisagé, avec la capacité de produire des estimations fiables de temps de parcours cyclistes et les flux pour l'année de base ainsi que des années de prévision.

IV Compléments

IV.1 Courbes types de répartition des déplacements piétons sur 24h

Cette annexe présente les tableaux de répartition journalière des flux piétons qui ont été utilisés pour le redressement des comptages (cf point 3.4.4 et figure 7). Ces tableaux donnent les valeurs sur les sections jugées représentatives de certaines catégories de flux. Les comptages ont été réalisés en octobre 2015 des jours ouvrables représentatifs.

Tab. 2 Répartition des déplacements piétons. Avenue Commerciale (Servette)

heure	Vers Centre-Ville			Depuis Centre-Ville			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	6	0.15%	0.15%	18	0.47%	0.47%	24	0.31%	0.31%
01:00	12	0.30%	0.45%	18	0.47%	0.94%	30	0.38%	0.69%
02:00	3	0.07%	0.52%	6	0.16%	1.10%	9	0.11%	0.80%
03:00	3	0.07%	0.59%	2	0.05%	1.15%	5	0.06%	0.87%
04:00	6	0.15%	0.74%	5	0.13%	1.28%	11	0.14%	1.01%
05:00	17	0.42%	1.16%	20	0.52%	1.81%	37	0.47%	1.48%
06:00	36	0.89%	2.06%	43	1.13%	2.94%	79	1.01%	2.48%
07:00	82	2.03%	4.09%	16	2.78%	5.71%	18	2.39%	4.88%
08:00	141	3.49%	7.58%	193	5.06%	10.77%	334	4.25%	9.13%
09:00	215	5.33%	12.91%	202	5.29%	16.06%	417	5.31%	14.44%
10:00	254	6.29%	19.20%	239	6.26%	22.33%	493	6.28%	20.72%
11:00	270	6.69%	25.89%	260	6.81%	29.14%	530	6.75%	27.47%
12:00	341	8.45%	34.33%	328	8.60%	37.74%	669	8.52%	35.99%
13:00	253	6.27%	40.60%	294	7.70%	45.44%	547	6.97%	42.95%
14:00	302	7.48%	48.08%	252	6.60%	52.04%	554	7.05%	50.01%
15:00	300	7.43%	55.51%	382	10.01%	62.05%	682	8.68%	58.69%
16:00	356	8.82%	64.33%	348	9.12%	71.17%	704	8.96%	67.66%
17:00	488	12.09%	76.42%	365	9.56%	80.74%	853	10.86%	78.52%
18:00	448	11.10%	87.52%	327	8.57%	89.31%	775	9.87%	88.39%
19:00	195	4.83%	92.35%	157	4.11%	93.42%	352	4.48%	92.87%
20:00	120	2.97%	95.32%	122	3.20%	96.62%	242	3.08%	95.95%
21:00	79	1.96%	97.28%	58	1.52%	98.14%	137	1.74%	97.70%
22:00	64	1.59%	98.86%	41	1.07%	99.21%	105	1.34%	99.03%
23:00	46	1.14%	100.00%	30	0.79%	100.00%	76	0.97%	100.00%

Tab. 3 Répartition des déplacements piétons. Quartier résidentiel (Carteret)

heure	Vers Centre-Ville			Depuis Centre-Ville			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	3	0.19%	0.19%	7	0.47%	0.47%	10	0.33%	0.33%
01:00	3	0.19%	0.39%	2	0.13%	0.61%	5	0.16%	0.49%
02:00	1	0.06%	0.45%	0	0.00%	0.61%	1	0.03%	0.53%
03:00	0	0.00%	0.45%	1	0.07%	0.67%	1	0.03%	0.56%
04:00	2	0.13%	0.58%	5	0.34%	1.01%	7	0.23%	0.79%
05:00	12	0.77%	1.35%	3	0.20%	1.21%	15	0.49%	1.28%
06:00	32	2.05%	3.40%	14	0.94%	2.16%	46	1.51%	2.79%
07:00	101	6.48%	9.88%	72	4.85%	7.01%	173	5.69%	8.48%
08:00	124	7.96%	17.84%	101	6.81%	13.81%	225	7.40%	15.88%
09:00	142	9.11%	26.96%	81	5.46%	19.27%	223	7.33%	23.21%
10:00	96	6.16%	33.12%	101	6.81%	26.08%	197	6.48%	29.68%
11:00	96	6.16%	39.28%	84	5.66%	31.74%	180	5.92%	35.60%
12:00	89	5.71%	44.99%	88	5.93%	37.67%	177	5.82%	41.42%
13:00	99	6.35%	51.35%	97	6.54%	44.20%	196	6.44%	47.86%
14:00	81	5.20%	56.55%	99	6.67%	50.88%	180	5.92%	53.78%
15:00	105	6.74%	63.29%	82	5.53%	56.40%	187	6.15%	59.93%
16:00	114	7.32%	70.60%	101	6.81%	63.21%	215	7.07%	67.00%
17:00	110	7.06%	77.66%	125	8.42%	71.63%	235	7.73%	74.72%
18:00	100	6.42%	84.08%	107	7.21%	78.84%	207	6.80%	81.53%
19:00	100	6.42%	90.50%	119	8.02%	86.86%	219	7.20%	88.72%
20:00	64	4.11%	94.61%	74	4.99%	91.85%	138	4.54%	93.26%
21:00	37	2.37%	96.98%	54	3.64%	95.49%	91	2.99%	96.25%
22:00	33	2.12%	99.10%	39	2.63%	98.11%	72	2.37%	98.62%
23:00	14	0.90%	100.00%	28	1.89%	100.00%	42	1.38%	100.00%

Tab. 4 Répartition des déplacements piétons. Accès Gare (Croquettes)

heure	Vers Gare			Depuis Gare			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	0	0.00%	0.00%	3	0.61%	0.61%	3	0.26%	0.26%
01:00	0	0.00%	0.00%	1	0.20%	0.81%	1	0.09%	0.34%
02:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.81%	0	0.00%	0.34%
03:00	2	0.30%	0.30%	0	0.00%	0.81%	2	0.17%	0.52%
04:00	3	0.45%	0.75%	0	0.00%	0.81%	3	0.26%	0.77%
05:00	2	0.30%	1.05%	1	0.20%	1.01%	3	0.26%	1.03%
06:00	8	1.20%	2.24%	4	0.81%	1.82%	12	1.03%	2.06%
07:00	39	5.83%	8.07%	10	2.02%	3.84%	49	4.21%	6.27%
08:00	44	6.58%	14.65%	32	6.46%	10.30%	76	6.53%	12.80%
09:00	39	5.83%	20.48%	25	5.05%	15.35%	64	5.50%	18.30%
10:00	38	5.68%	26.16%	19	3.84%	19.19%	57	4.90%	23.20%
11:00	37	5.53%	31.69%	22	4.44%	23.64%	59	5.07%	28.26%
12:00	44	6.58%	38.27%	41	8.28%	31.92%	85	7.30%	35.57%
13:00	34	5.08%	43.35%	28	5.66%	37.58%	62	5.33%	40.89%
14:00	49	7.32%	50.67%	55	11.11%	48.69%	104	8.93%	49.83%
15:00	39	5.83%	56.50%	29	5.86%	54.55%	68	5.84%	55.67%
16:00	67	10.01%	66.52%	47	9.49%	64.04%	114	9.79%	65.46%
17:00	65	9.72%	76.23%	47	9.49%	73.54%	112	9.62%	75.09%
18:00	77	11.51%	87.74%	53	10.71%	84.24%	130	11.17%	86.25%
19:00	38	5.68%	93.42%	21	4.24%	88.48%	59	5.07%	91.32%
20:00	23	3.44%	96.86%	19	3.84%	92.32%	42	3.61%	94.93%
21:00	10	1.49%	98.36%	15	3.03%	95.35%	25	2.15%	97.08%
22:00	9	1.35%	99.70%	18	3.64%	98.99%	27	2.32%	99.40%
23:00	2	0.30%	100.00%	5	1.01%	100.00%	7	0.60%	100.00%

Tab. 5 Répartition des déplacements piétons. Accès Parc (Beaulieu)

heure	Vers Parc			Depuis Parc			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
01:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
02:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
03:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
04:00	1	0.19%	0.19%	0	0.00%	0.00%	1	0.10%	0.10%
05:00	2	0.38%	0.57%	4	0.78%	0.78%	6	0.58%	0.68%
06:00	6	1.14%	1.71%	3	0.59%	1.37%	9	0.87%	1.55%
07:00	23	4.38%	6.10%	21	4.12%	5.49%	44	4.25%	5.80%
08:00	33	6.29%	12.38%	43	8.43%	13.92%	76	7.34%	13.14%
09:00	30	5.71%	18.10%	28	5.49%	19.41%	58	5.60%	18.74%
10:00	25	4.76%	22.86%	27	5.29%	24.71%	52	5.02%	23.77%
11:00	27	5.14%	28.00%	23	4.51%	29.22%	50	4.83%	28.60%
12:00	33	6.29%	34.29%	33	6.47%	35.69%	66	6.38%	34.98%
13:00	49	9.33%	43.62%	38	7.45%	43.14%	87	8.41%	43.38%
14:00	45	8.57%	52.19%	34	6.67%	49.80%	79	7.63%	51.01%
15:00	37	7.05%	59.24%	50	9.80%	59.61%	87	8.41%	59.42%
16:00	35	6.67%	65.90%	30	5.88%	65.49%	65	6.28%	65.70%
17:00	41	7.81%	73.71%	45	8.82%	74.31%	86	8.31%	74.01%
18:00	45	8.57%	82.29%	46	9.02%	83.33%	91	8.79%	82.80%
19:00	38	7.24%	89.52%	32	6.27%	89.61%	70	6.76%	89.57%
20:00	34	6.48%	96.00%	25	4.90%	94.51%	59	5.70%	95.27%
21:00	10	1.90%	97.90%	12	2.35%	96.86%	22	2.13%	97.39%
22:00	8	1.52%	99.43%	11	2.16%	99.02%	19	1.84%	99.23%
23:00	3	0.57%	100.00%	5	0.98%	100.00%	8	0.77%	100.00%

Tab. 6 Répartition des déplacements piétons. Accès Ecole primaire (Chandieu)

heure	Vers Ecole			Depuis Ecole			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
01:00	1	0.22%	0.22%	1	0.21%	0.21%	2	0.22%	0.22%
02:00	3	0.66%	0.88%	0	0.00%	0.21%	3	0.32%	0.54%
03:00	2	0.44%	1.33%	2	0.42%	0.63%	4	0.43%	0.97%
04:00	0	0.00%	1.33%	0	0.00%	0.63%	0	0.00%	0.97%
05:00	0	0.00%	1.33%	2	0.42%	1.06%	2	0.22%	1.19%
06:00	3	0.66%	1.99%	2	0.42%	1.48%	5	0.54%	1.73%
07:00	53	11.73%	13.72%	29	6.13%	7.61%	82	8.86%	10.59%
08:00	28	6.19%	19.91%	21	4.44%	12.05%	49	5.30%	15.89%
09:00	16	3.54%	23.45%	33	6.98%	19.03%	49	5.30%	21.19%
10:00	10	2.21%	25.66%	12	2.54%	21.56%	22	2.38%	23.57%
11:00	29	6.42%	32.08%	38	8.03%	29.60%	67	7.24%	30.81%
12:00	29	6.42%	38.50%	60	12.68%	42.28%	89	9.62%	40.43%
13:00	95	21.02%	59.51%	30	6.34%	48.63%	125	13.51%	53.95%
14:00	25	5.53%	65.04%	24	5.07%	53.70%	49	5.30%	59.24%
15:00	27	5.97%	71.02%	35	7.40%	61.10%	62	6.70%	65.95%
16:00	29	6.42%	77.43%	41	8.67%	69.77%	70	7.57%	73.51%
17:00	35	7.74%	85.18%	56	11.84%	81.61%	91	9.84%	83.35%
18:00	30	6.64%	91.81%	50	10.57%	92.18%	80	8.65%	92.00%
19:00	17	3.76%	95.58%	12	2.54%	94.71%	29	3.14%	95.14%
20:00	2	0.44%	96.02%	9	1.90%	96.62%	11	1.19%	96.32%
21:00	14	3.10%	99.12%	7	1.48%	98.10%	21	2.27%	98.59%
22:00	2	0.44%	99.56%	5	1.06%	99.15%	7	0.76%	99.35%
23:00	2	0.44%	100.00%	4	0.85%	100.00%	6	0.65%	100.00%

IV.2 Courbes types de répartition des déplacements vélo sur 24h

Cette annexe présente les tableaux de répartition journalière des flux vélo qui ont été utilisés pour le redressement des comptages (cf point 3.4.4 et figure 7). Ces tableaux donnent les valeurs sur les sections jugées représentatives de certaines catégories de flux. Les comptages ont été réalisés en octobre 2015 des jours ouvrables représentatifs.

Tab. 7 Répartition des déplacements vélo. Avenue Commerciale (Servette)

heure	Vers Centre-Ville			Depuis Centre-Ville			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	1	0.18%	0.18%	1	0.25%	0.25%	2	0.21%	0.21%
01:00	1	0.18%	0.36%	4	0.99%	1.23%	5	0.52%	0.72%
02:00	2	0.36%	0.71%	0	0.00%	1.23%	2	0.21%	0.93%
03:00	0	0.00%	0.71%	1	0.25%	1.48%	1	0.10%	1.03%
04:00	0	0.00%	0.71%	1	0.25%	1.72%	1	0.10%	1.14%
05:00	2	0.36%	1.07%	5	1.23%	2.96%	7	0.72%	1.86%
06:00	8	1.43%	2.50%	13	3.20%	6.16%	21	2.17%	4.03%
07:00	36	6.42%	8.91%	30	7.39%	13.55%	66	6.83%	10.86%
08:00	47	8.38%	17.29%	56	13.79%	27.34%	103	10.65%	21.51%
09:00	6	1.07%	18.36%	20	4.93%	32.27%	26	2.69%	24.20%
10:00	20	3.57%	21.93%	7	1.72%	33.99%	27	2.79%	26.99%
11:00	41	7.31%	29.23%	13	3.20%	37.19%	54	5.58%	32.57%
12:00	31	5.53%	34.76%	8	1.97%	39.16%	39	4.03%	36.61%
13:00	29	5.17%	39.93%	20	4.93%	44.09%	49	5.07%	41.68%
14:00	29	5.17%	45.10%	15	3.69%	47.78%	44	4.55%	46.23%
15:00	40	7.13%	52.23%	34	8.37%	56.16%	74	7.65%	53.88%
16:00	39	6.95%	59.18%	37	9.11%	65.27%	76	7.86%	61.74%
17:00	64	11.41%	70.59%	41	10.10%	75.37%	105	10.86%	72.60%
18:00	86	15.33%	85.92%	28	6.90%	82.27%	114	11.79%	84.38%
19:00	35	6.24%	92.16%	13	3.20%	85.47%	48	4.96%	89.35%
20:00	26	4.63%	96.79%	12	2.96%	88.42%	38	3.93%	93.28%
21:00	12	2.14%	98.93%	13	3.20%	91.63%	25	2.59%	95.86%
22:00	4	0.71%	99.64%	23	5.67%	97.29%	27	2.79%	98.66%
23:00	2	0.36%	100.00%	11	2.71%	100.00%	13	1.34%	100.00%

Tab. 8 Répartition des déplacements vélo. Quartier résidentiel (Carteret)

heure	Vers Centre-Ville			Depuis Centre-Ville			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
01:00	0	0.00%	0.00%	2	1.56%	1.56%	2	0.79%	0.79%
02:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	1.56%	0	0.00%	0.79%
03:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	1.56%	0	0.00%	0.79%
04:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	1.56%	0	0.00%	0.79%
05:00	0	0.00%	0.00%	1	0.78%	2.34%	1	0.39%	1.18%
06:00	4	3.17%	3.17%	7	5.47%	7.81%	11	4.33%	5.51%
07:00	2	1.59%	4.76%	1	0.78%	8.59%	3	1.18%	6.69%
08:00	8	6.35%	11.11%	16	12.50%	21.09%	24	9.45%	16.14%
09:00	5	3.97%	15.08%	14	10.94%	32.03%	19	7.48%	23.62%
10:00	3	2.38%	17.46%	4	3.13%	35.16%	7	2.76%	26.38%
11:00	5	3.97%	21.43%	8	6.25%	41.41%	13	5.12%	31.50%
12:00	11	8.73%	30.16%	8	6.25%	47.66%	19	7.48%	38.98%
13:00	12	9.52%	39.68%	9	7.03%	54.69%	21	8.27%	47.24%
14:00	14	11.11%	50.79%	16	12.50%	67.19%	30	11.81%	59.06%
15:00	3	2.38%	53.17%	14	10.94%	78.13%	17	6.69%	65.75%
16:00	17	13.49%	66.67%	1	0.78%	78.91%	18	7.09%	72.83%
17:00	17	13.49%	80.16%	10	7.81%	86.72%	27	10.63%	83.46%
18:00	15	11.90%	92.06%	12	9.38%	96.09%	27	10.63%	94.09%
19:00	4	3.17%	95.24%	1	0.78%	96.88%	5	1.97%	96.06%
20:00	2	1.59%	96.83%	2	1.56%	98.44%	4	1.57%	97.64%
21:00	2	1.59%	98.41%	0	0.00%	98.44%	2	0.79%	98.43%
22:00	2	1.59%	100.00%	1	0.78%	99.22%	3	1.18%	99.61%
23:00	0	0.00%	100.00%	1	0.78%	100.00%	1	0.39%	100.00%

Tab. 9 Répartition des déplacements vélo. Accès Gare (Croquettes)

heure	Vers Gare			Depuis Gare			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	0	0.00%	0.00%	1	1.11%	1.11%	1	0.59%	0.59%
01:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	1.11%	0	0.00%	0.59%
02:00	0	0.00%	0.00%	1	1.11%	2.22%	1	0.59%	1.18%
03:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	2.22%	0	0.00%	1.18%
04:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	2.22%	0	0.00%	1.18%
05:00	0	0.00%	0.00%	1	1.11%	3.33%	1	0.59%	1.76%
06:00	0	0.00%	0.00%	2	2.22%	5.56%	2	1.18%	2.94%
07:00	7	8.75%	8.75%	7	7.78%	13.33%	14	8.24%	11.18%
08:00	15	18.75%	27.50%	9	10.00%	23.33%	24	14.12%	25.29%
09:00	5	6.25%	33.75%	7	7.78%	31.11%	12	7.06%	32.35%
10:00	5	6.25%	40.00%	2	2.22%	33.33%	7	4.12%	36.47%
11:00	4	5.00%	45.00%	2	2.22%	35.56%	6	3.53%	40.00%
12:00	3	3.75%	48.75%	5	5.56%	41.11%	8	4.71%	44.71%
13:00	4	5.00%	53.75%	1	1.11%	42.22%	5	2.94%	47.65%
14:00	0	0.00%	53.75%	6	6.67%	48.89%	6	3.53%	51.18%
15:00	2	2.50%	56.25%	4	4.44%	53.33%	6	3.53%	54.71%
16:00	5	6.25%	62.50%	5	5.56%	58.89%	10	5.88%	60.59%
17:00	8	10.00%	72.50%	9	10.00%	68.89%	17	10.00%	70.59%
18:00	12	15.00%	87.50%	9	10.00%	78.89%	21	12.35%	82.94%
19:00	7	8.75%	96.25%	8	8.89%	87.78%	15	8.82%	91.76%
20:00	2	2.50%	98.75%	3	3.33%	91.11%	5	2.94%	94.71%
21:00	0	0.00%	98.75%	0	0.00%	91.11%	0	0.00%	94.71%
22:00	1	1.25%	100.00%	5	5.56%	96.67%	6	3.53%	98.24%
23:00	0	0.00%	100.00%	3	3.33%	100.00%	3	1.76%	100.00%

Tab. 10 Répartition des déplacements vélo. Accès Parc (Beaulieu)

heure	Vers Parc			Depuis Parc			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
00:00	0	0.00%	0.00%	1	1.49%	1.49%	1	0.74%	0.74%
01:00	1	1.45%	1.45%	0	0.00%	1.49%	1	0.74%	1.47%
02:00	0	0.00%	1.45%	0	0.00%	1.49%	0	0.00%	1.47%
03:00	0	0.00%	1.45%	0	0.00%	1.49%	0	0.00%	1.47%
04:00	0	0.00%	1.45%	0	0.00%	1.49%	0	0.00%	1.47%
05:00	0	0.00%	1.45%	0	0.00%	1.49%	0	0.00%	1.47%
06:00	0	0.00%	1.45%	0	0.00%	1.49%	0	0.00%	1.47%
07:00	3	4.35%	5.80%	2	2.99%	4.48%	5	3.68%	5.15%
08:00	14	20.29%	26.09%	7	10.45%	14.93%	21	15.44%	20.59%
09:00	8	11.59%	37.68%	10	14.93%	29.85%	18	13.24%	33.82%
10:00	7	10.14%	47.83%	4	5.97%	35.82%	11	8.09%	41.91%
11:00	1	1.45%	49.28%	4	5.97%	41.79%	5	3.68%	45.59%
12:00	3	4.35%	53.62%	3	4.48%	46.27%	6	4.41%	50.00%
13:00	0	0.00%	53.62%	3	4.48%	50.75%	3	2.21%	52.21%
14:00	2	2.90%	56.52%	0	0.00%	50.75%	2	1.47%	53.68%
15:00	4	5.80%	62.32%	1	1.49%	52.24%	5	3.68%	57.35%
16:00	2	2.90%	65.22%	4	5.97%	58.21%	6	4.41%	61.76%
17:00	7	10.14%	75.36%	8	11.94%	70.15%	15	11.03%	72.79%
18:00	9	13.04%	88.41%	13	19.40%	89.55%	22	16.18%	88.97%
19:00	1	1.45%	89.86%	4	5.97%	95.52%	5	3.68%	92.65%
20:00	5	7.25%	97.10%	0	0.00%	95.52%	5	3.68%	96.32%
21:00	1	1.45%	98.55%	0	0.00%	95.52%	1	0.74%	97.06%
22:00	0	0.00%	98.55%	1	1.49%	97.01%	1	0.74%	97.79%
23:00	1	1.45%	100.00%	2	2.99%	100.00%	3	2.21%	100.00%

Tab. 11 Répartition des déplacements vélo. Accès Ecole primaire (Chandieu)

heure	Vers Ecole			Depuis Ecole			Cumul 2 sens		
	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul	Nombre	Part	Cumul
00:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
01:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
02:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
03:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
04:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
05:00	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%	0	0.00%	0.00%
06:00	0	0.00%	0.00%	1	1.10%	1.10%	1	0.52%	0.52%
07:00	5	4.90%	4.90%	10	10.99%	12.09%	15	7.77%	8.29%
08:00	9	8.82%	13.73%	15	16.48%	28.57%	24	12.44%	20.73%
09:00	11	10.78%	24.51%	1	1.10%	29.67%	12	6.22%	26.94%
10:00	7	6.86%	31.37%	4	4.40%	34.07%	11	5.70%	32.64%
11:00	9	8.82%	40.20%	5	5.49%	39.56%	14	7.25%	39.90%
12:00	5	4.90%	45.10%	2	2.20%	41.76%	7	3.63%	43.52%
13:00	3	2.94%	48.04%	4	4.40%	46.15%	7	3.63%	47.15%
14:00	5	4.90%	52.94%	3	3.30%	49.45%	8	4.15%	51.30%
15:00	5	4.90%	57.84%	4	4.40%	53.85%	9	4.66%	55.96%
16:00	9	8.82%	66.67%	13	14.29%	68.13%	22	11.40%	67.36%
17:00	11	10.78%	77.45%	8	8.79%	76.92%	19	9.84%	77.20%
18:00	7	6.86%	84.31%	15	16.48%	93.41%	22	11.40%	88.60%
19:00	4	3.92%	88.24%	5	5.49%	98.90%	9	4.66%	93.26%
20:00	5	4.90%	93.14%	1	1.10%	100.00%	6	3.11%	96.37%
21:00	3	2.94%	96.08%	0	0.00%	100.00%	3	1.55%	97.93%
22:00	1	0.98%	97.06%	0	0.00%	100.00%	1	0.52%	98.45%
23:00	3	2.94%	100.00%	0	0.00%	100.00%	3	1.55%	100.00%

IV.3 Analyse Micro-recensement transport 2010

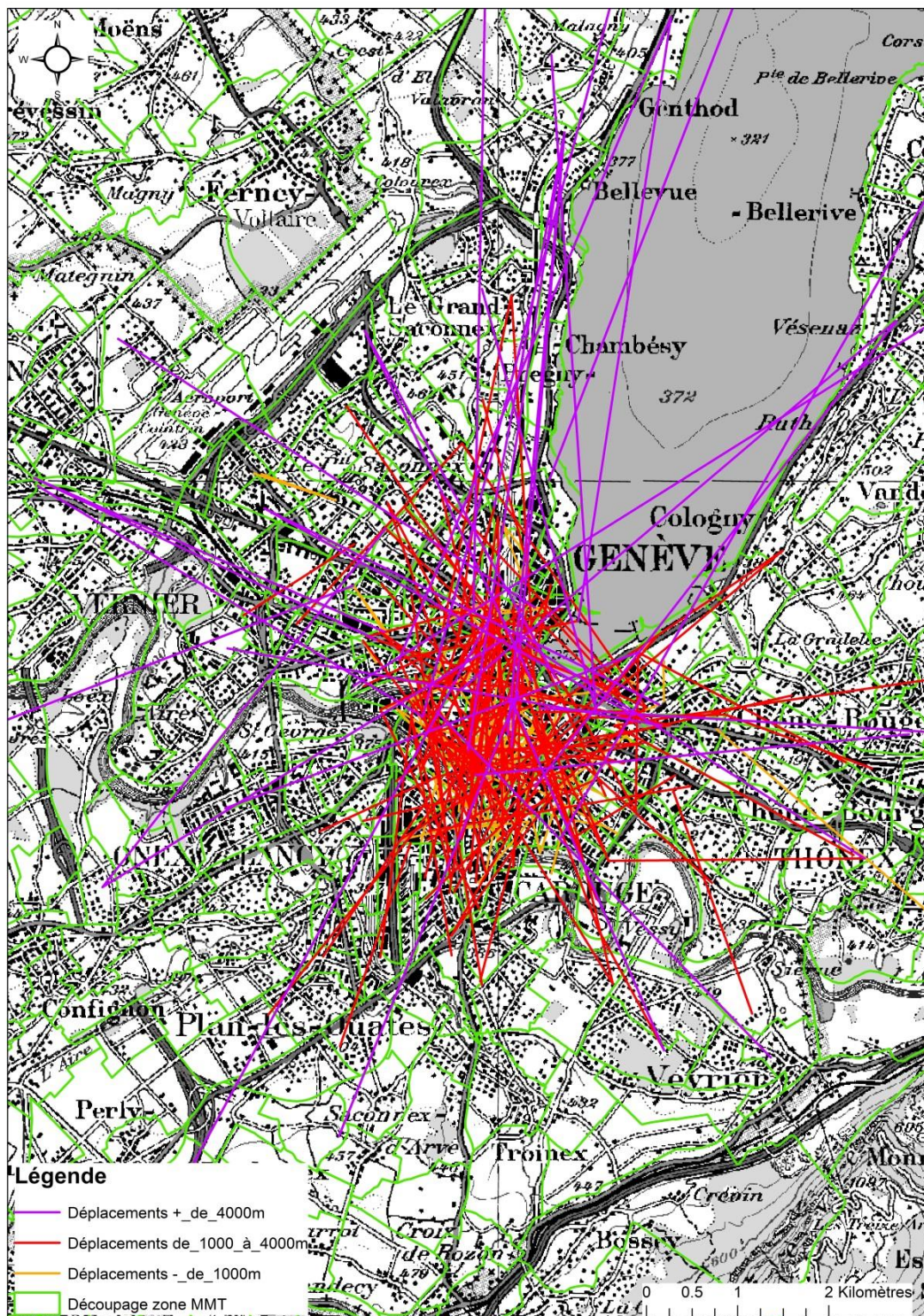


Fig. 1 Représentation graphique des déplacements vélos de moins de 4 km en relation avec la ville de Genève (chaque trait correspond à une relation origine-destination)

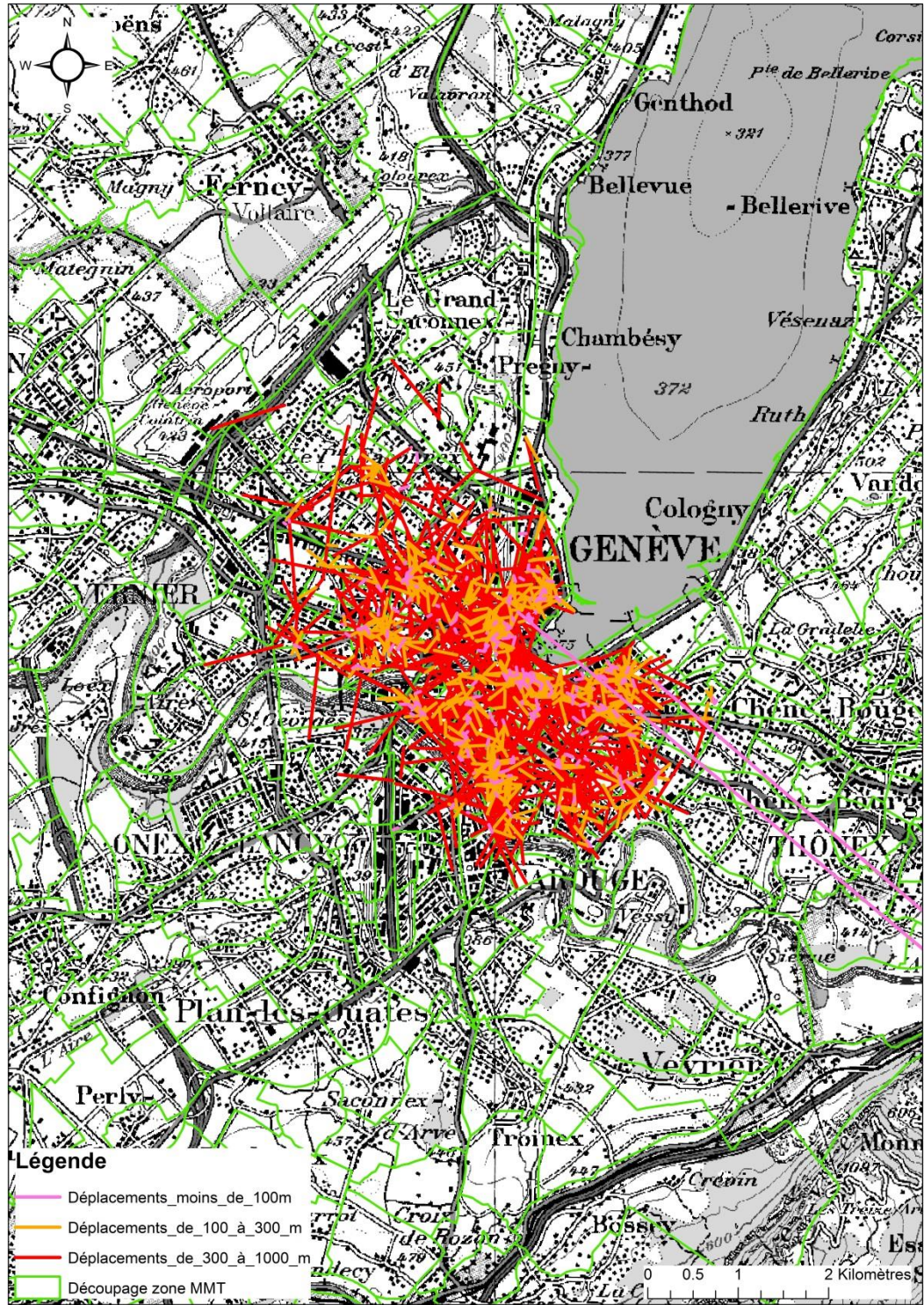


Fig. 2 Représentation graphique des déplacements piétons de moins de 1 km en relation avec la ville de Genève (chaque trait correspond à une origine-destination)

V Calage final des paramètres de choix de route

V.1 Précisions sur la définition des bornes pour la recherche de paramètres avec GenSA

Pour expliquer la définition des bornes pour la recherche des paramètres avec l'algorithme GenSA, il faut présenter avant la manière de paramétrer l'affectation dans Visum.

L'équation (8) de la section 9.5.3, permet d'illustrer la définition des paramètres dans Visum. Cette équation comporte non seulement les paramètres de la fonction d'utilité, mais elle comporte aussi deux paramètres positifs : ξ et β (valeur strictement positive). Ces paramètres agissent comme des coefficients de proportionnalité permettant de passer des paramètres de la fonction d'utilité à ceux de la fonction de temps généralisé de Visum.

Pour l'utilisation de l'algorithme GenSA, les bornes sont définies au niveau de la fonction de temps généralisé de Visum, ce qui veut dire que les coefficients ξ et β sont intégrés dans la définition des coefficients et des bornes de recherche. Plus précisément, en prenant l'exemple de s25, où $\xi = 1/60$ et $\beta=0.117$, le coefficient de la fonction d'utilité pour la longueur ($k=1$) est $-5.81E-03$. Le coefficient saisi dans Visum est : $-(-5.81E-03) / (\xi*\beta) = 2.994$. Les bornes définies dans GenSA pour obtenir les coefficients Visum sont données dans le tableau suivant.

Tab. 12 Taux de substitution entre variables explicatives à partir des résultats de s25

Numéro (k)	Description (x_k)	Unité	Coefficient (α_k)	Coefficient Visum Temps Généralisé	Borne inf	Borne sup
1	Longueur	[m]	-5.81E-03	2.994	0	4
3	Longueur de piste cyclable	[m]	4.65E-03	-2.395	-4	1
4	Longueur de bande cyclable	[m]	2.37E-04	-0.122	-4	1
5	Longueur d'infrastructure piétonne autorisée aux vélos	[m]	-1.37E-03	0.708	-4	1
6	Longueur de voie de bus autorisée aux vélos	[m]	1.08E-03	-0.557	-4	1
7	Longueur de voie de tram autorisée aux vélos	[m]	-1.65E-03	0.852	-4	1
8	Longueur de contre-sens VP autorisé aux vélos	[m]	7.07E-03	-3.641	-4	1
10	Longueur d'environnement agréable	[m]	5.79E-03	-2.981	-4	1
11	Charge VP * longueur	[uvh * m]	3.69E-03	-1.903	-4	1
12	Maximum du ratio dénivelé positif / longueur	[-]	-5.68E-01	292.400	0	1000
13	Longueur des dangers ponctuels	[m]	-6.69E-03	3.446	0	10

Lors de l'exécution de l'algorithme GenSA, le paramètre β est également inclus dans la recherche de l'optimum. Ce paramètre permet de « relâcher » la contrainte qu'imposent les bornes fixes. L'intervalle de variation de β est [0.05; 0.8].

Dans la définition des bornes, les paramètres liés aux aménagements cyclables ($k = \{3; \dots; 7\}$) peuvent être positifs ou négatifs. Pour s27, les modifications apportées aux bornes sont les suivantes :

- Pour $k = 8$, l'intervalle de recherche $[-4; 1]$ est modifié et devient $[-2.9; 0]$. La valeur 2.9 a été choisie à partir de la valeur du coefficient pour $k = 1$ dans s25. L'idée est de faire en sorte que le paramètre pour $k = 8$ soit inférieur (en valeur absolue) à celui pour $k = 1$, pour avoir un taux de substitution compris entre 0 et 1 (en valeur absolue)¹⁴. En utilisant 0 comme borne, le signe du coefficient est contraint.
- Pour $k = 10$, le nouvel intervalle de recherché est identique à celui pour $k = 8$
- Pour $k = 11$, l'intervalle utilisé dans s25 était $[-4; 1]$. L'intervalle pour s27 est $[0; 2]$. Comme pour $k=8$, le signe du coefficient est contraint.

Le paramètre β est inclus dans la recherche de la combinaison optimale par GenSA avec le même intervalle d'évolution que pour s25, $[0.05; 0.8]$.

V.2 Script R (pour s27)

```
library(GenSA) # generalized stochastic anealing
library(RDCOMClient) # connexion COM a visum
library(reshape2) # modifier forme de tableaux
library(plyr) # pour dply
library(ggplot2) # permet de faire de beaux graphiques
library(data.table) # permet de manipuler des tableaux de donnees
library(XML) # pour lire et ecrire les fichiers de config visum

#####
# On donne les noms des paths
pfdPath <- 'C:/Users/jd/AppData/Roaming/PTV Vision/PTV Visum 15' # chemin absolu
namePfd <- '14114.0 testgeneral.pfd'
verPath <- 'D:/AffairesJD/14114.0/4 Etude/7 Modele/envoi à JD/SharedData/ver'
verName <- '14114.0 PPTF affect troncon chemin LOGIQUE GA pour rapport.ver'
parPath <- 'D:/AffairesJD/14114.0/4 Etude/7 Modele/envoi à JD /SharedData/par'
parName <- 'veloStochasCordonTestRapport7.xml'
tronPath <- 'D:/AffairesJD/14114.0/4 Etude/7 Modele/envoi à JD /SharedData/att'
tronName <- 'tronconsAffectStochV2GA.att'
filPath <- 'D:/AffairesJD/14114.0/4 Etude/7 Modele/envoi à JD /SharedData/fil'
filName <- '14114.0 filtreTronSVI_OLS.fil'

#####
# On lit le fichier de parametres de procedures
sviPar <- xmlParse(file = paste(parPath, parName, sep = '/'))
root <- xmlRoot(sviPar)
saveXML(root, file = paste(parPath, 'veloStochasCordonTestRapport7_Old.xml', sep = '/'))

#####
# On prepare les parametres pour le calage

#####
# Attributs troncon modifie
# mlxpath <- "//OPERATION/ATTRIBUTEFORMULAPARA[@NETOBJECTTYPE='LINK']"
# modlinkFormule <- sapply(getNodeSet(root, mlxpath), xmlGetAttr, name =
'FORMULA')
# parModlink <- as.numeric(gsub(pattern = '.{1,},(.{1,})\\..{1,})\\)', replacement = '\\1', x = modlinkFormule)
# parModlinkName <- paste(sapply(getNodeSet(root, mlxpath), xmlGetAttr, name =
'RESULTATTRNAME'), 2, sep = '_')
```

¹⁴ Il aurait été possible de définir des contraintes strictes sur les taux de substitution mais cela aurait impliqué de modifier le script de calage (notamment la lecture / écriture des fichiers xml permettant de faire l'interface entre R et Visum. Pour des raisons d'ordre pratique, seulement une modification des bornes a été employée.

```
# modlinkFormAttr <- gsub(pattern = '(.{1,},){1,}\\..{1,}\\)', replacement =
'\|1', x = modlinkFormule)
# pModLink <- xmlApply(sviPar[mlxpath], xmlAttrs) # contient les attr pour
recreer des xmlNodes

#####
# Attributs de la fonction générale de temps generalise des troncons pour velo
lxpath <-
"//IMPEDANCEFUNCTIONS[@TSSYSOURCE='Velo']/LINCMB[@NETOBJECTTYPE='LINK']/LINCMBITEM"
parLink <- as.numeric(sapply(getNodeSet(root, lxpath), xmlGetAttr, name =
'FIRSTATTRCOEFF'))
parLinkName <- sapply(getNodeSet(root, lxpath), xmlGetAttr, name =
'FIRSTATTRNAME')
pLink <- xmlApply(sviPar[lxpath], xmlAttrs) # contient les attr pour recreer des
xmlNodes

#####
# Attributs des chemins
cxpath <- "//STOCHIMPEDANCESEGPARA/STOCHIMPEDANCEITEM"
chemFormule <- sapply(getNodeSet(root, cxpath), xmlGetAttr, name = 'FORMULA')
parChem <- as.numeric(gsub(pattern = '(.{1,})\\*.{1,}', replacement = '\\|1', x =
chemFormule))
parChemName <- gsub(pattern = '{1,}\\..{1,}\\)', replacement = '\\|1', x =
chemFormule)
chemFormAttr <- gsub(pattern = '{1,}\\.*{1,}', replacement = '\\|1', x =
chemFormule)
pChem <- xmlApply(sviPar[cxpath], xmlAttrs)

#####
# Attributs de la sequence de procedures ex : apres "operations" le numero 11
fait ref a la procedure 11
sxpath <- "//STOCHRANDOMPARA"
sigmaRech <- as.numeric(sapply(getNodeSet(root, sxpath),
xmlGetAttr, name = 'SIGMACOEFF')) # sigma

recherche chemins
sigmaRechName <- 'SIGMACOEFF'
pSig <- xmlApply(sviPar[sxpath], xmlAttrs)

logxpath <- "//STOCHCHOICEPARA"
logitExp <- as.numeric(sapply(getNodeSet(root, logxpath),
xmlGetAttr, name = 'LOGITEXP')) # coefficient logit

repartition
logitExpName <- 'LOGITEXP'
pLogxp <- xmlApply(sviPar[logxpath], xmlAttrs)

#####
# definition de la localisation des parametres
limtg <- 1:length(parLink)
limchem <- (length(parLink) + 1):(length(parLink) + length(parChem))
limsig <- (max(limchem) + 1):(max(limchem) + length(sigmaRech))
# limml <- (max(limtg) + 1):(max(limtg) + length(parModlink))
# limsig <- (max(limml) + 1):(max(limml) + length(sigmaRech))
limlog <- (max(limsig) + 1):(max(limsig) + length(logitExp))

#####
# Vecteur de parametres
parDF <- data.frame(names = c(parLinkName, parChemName, sigmaRechName,
logitExpName),
values = c(parLink, parChem, sigmaRech, logitExp))
# parDF <- data.frame(names = c(parLinkName, parModlinkName, sigmaRechName,
logitExpName),
# values = c(parLink, parModlink, sigmaRech, logitExp))

#####
# Definition des max et min. Cette partie est 'manuelle'
# rang 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14
```

```

# minCoeffs <- c(0,0,0,0,0,0,0, 0, -4, 0, 0, 0, 1.5, 0.05)
# maxCoeffs <- c(4,4,4,4,4,4,4,1000, 0, 4, 1000, 10, 20 , 0.8)
minCoeffs <- c(0, 0, 0,-4,-4,-4,-4,-4,-2.9,-2.9, 0, 1.5, 0.05)
maxCoeffs <- c(4,1000, 10, 0, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 2, 20 , 0.8)
parDF <- data.frame(parDF, minCoeffs, maxCoeffs)

#####
# Fonction d'écriture du xml
RepValTGObj <- function(xmlNodeL, value){
  xmlNodeL['FIRSTATTRCOEFF'] <- value
  xmlNodeL
}
RepValAttrMod <- function(xmlNodeL, value, modlinkAttr){
  xmlNodeL['FORMULA'] <- paste(modlinkAttr, ' ', value, ')', sep = '')
  xmlNodeL
}
RepValChem <- function(xmlNodeL, value, chemAttr){
  xmlNodeL['FORMULA'] <- paste(value, chemAttr, sep = '*')
  xmlNodeL
}
RepValSigm <- function(xmlNodeL, value){
  xmlNodeL['SIGMACOEFF'] <- value
  xmlNodeL
}
RepValLE <- function(xmlNodeL, value){
  xmlNodeL['LOGITEXP'] <- value
  xmlNodeL
}
ModifParXML <- function(vectC){
  link <- mapply(RepValTGObj, pLink, vectC[limtg], SIMPLIFY = FALSE)
  route <- mapply(RepValChem, pChem, vectC[limchem], chemFormAttr, SIMPLIFY =
FALSE)
  # modlink <- mapply(RepValAttrMod, pModLink, vectC[limml], modlinkFormAttr,
SIMPLIFY = FALSE)
  sigmarech <- mapply(RepValSigm, pSig, vectC[limsig], SIMPLIFY = FALSE)
  logexp <- mapply(RepValLE, pLogxp, vectC[limlog], SIMPLIFY = FALSE)
  AssignXmlAttr <- function(x,y){xmlAttrs(x) <- y}
  mapply(AssignXmlAttr, sviPar[lxpath], link, SIMPLIFY = FALSE)
  mapply(AssignXmlAttr, sviPar[cxpath], route, SIMPLIFY = FALSE)
  # mapply(AssignXmlAttr, sviPar[mlxpath], modlink, SIMPLIFY = FALSE)
  mapply(AssignXmlAttr, sviPar[sxpath], sigmarech, SIMPLIFY = FALSE)
  mapply(AssignXmlAttr, sviPar[logxpath], logexp, SIMPLIFY = FALSE)
  list(link, route, sigmarech, logexp)
  # list(link, modlink, sigmarech, logexp)
}

#####
# On execute visum
svi <- COMCreate("Visum.Visum.150")
svi$LoadVersion(paste(verPath, verName, sep = "/"))
svi[["Graphic"]]$ShowMaximized()
svi$LoadPathFile(paste(pfdPath, namePfd, sep = '/'))

ExecModel <- function(vectCoeffs){
  ModifParXML(vectCoeffs)
  saveXML(sviPar, file = paste(parPath, parName, sep = '/'))

  svi[["Procedures"]]$OpenXmlWithOptions(paste(parPath, parName, sep = "/"))
  svi[["Procedures"]]$Execute()
  sviListTron <- svi[["Lists"]]$CreateLinkList()
  svi[["Filters"]]$Open(paste(filPath, filName, sep = "/"))
  sviListTron$SetObjects("true") # true pour objets actifs, false sinon
  # sviListTron$Show()
  sviListTron$OpenLayout("sviTronGoodnessFit.lla") # marche avec le pfd
  sviListTron$SaveToAttributeFile(paste(tronPath, tronName, sep = "/"), 59, 0) #
separateurs 59 = ;
  tron <- read.table(file = paste(tronPath, tronName, sep = "/"), sep = ";",
header = TRUE, skip = 12, quote = "")
  colnames(tron)[1] <- "NUM"
}

```

```

tron <- as.data.table(tron)
regres <- lm(CHGVEH.SEGD.VELO.PA. ~ SVI_V_JOUR, data = tron)
R2 <- summary(regres)$r.squared
abs(1 - R2)
}

gsa <- GenSA(par = parDF$values, fn = ExecModel, lower = minCoeffs, upper =
maxCoeffs, control=list(max.time = 15*3600))

gsa$par

tron <- read.table(file = paste(tronPath, tronName, sep = "/"), sep = ";",
header = TRUE, skip = 12, quote = "")
colnames(tron)[1] <- "NUM"
colnames(tron)[(ncol(tron)-1):ncol(tron)] <- c("Comptages", "Charges")
tron <- as.data.table(tron)

ggplot(data = tron, aes(x=Comptages, y=Charges)) +
  geom_point(shape=1, fill = 'grey', alpha = 0.3) + # Use hollow circles
  geom_smooth(method=lm, color = 'red', size = 1)+
  coord_fixed(ratio=1)# Add linear regression line
# (by default includes 95% confidence region)

ModifParXML(gsa$par)
saveXML(sviPar, file = paste(parPath, parName, sep = '/'))

```


Glossaire

Terme	Signification
BHNS	Bus à Haut Niveau de Service
CG	Conseil Général
DGT	Direction Générale des Transports
DRE	Direction Régionale de l'Équipement
GPS	Global Positioning System
HPM	Heure de Pointe du Matin
HPS	Heure de Pointe du Soir
MAP	Marche, marche à pied
MAUP	Modifiable areal unit problem
MD	Mobilités douces
MMT	Modèle multimodal transfrontalier
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
MRMT	Microrecensement mobilité et transport
OD	Origine-Destination
PPM	Période de Pointe du Matin
PPS	Période de Pointe du Soir
SIG	Système d'information Géographique
SITG	Système d'Information du Territoire à Genève
TC	Transports en commun
TG	Temps généralisé
TIM	Transport/trafic individuel motorisé
TJM	Trafic journalier moyen
TJOM	Trafic Journalier Ouvrable Moyen (lundi à vendredi sans jours fériés)
uv	Unité-véhicule
uv/h	Unité-véhicule par heure
VAE	Vélo à assistance électrique
VP	Véhicule particulier

Bibliographie

- [1] E. Fishman, « Cycling as transport », *Transport Reviews*, vol. 36, n° 1, p. 1-8, janv. 2016.
- [2] M. A. Stinson et C. Bhat, « Frequency of bicycle commuting: internet-based survey analysis », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1878, p. 122-130, 2004.
- [3] E. Heinen, B. van Wee, et K. Maat, « Commuting by Bicycle: An Overview of the Literature », *Transport Reviews*, vol. 30, n° 1, p. 59-96, janv. 2010.
- [4] J. Dekoster et U. Schollaert, *Cycling: the way ahead for towns and cities*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Commission, 1999.
- [5] K. Van Hout, « BYPAD Cycling - The European approach. Annex I. Literature search bicycle use and influencing factors in Europe. », Instituut voor Mobiliteit - Universiteit Hasselt, 2008.
- [6] J. Dill et J. Gliebe, « Understanding and measuring bicycling behavior: A focus on travel time and route choice », Oregon Transportation Research and Education Consortium (OTREC), Final report OTREC-RR-08-03, 2008.
- [7] TRB, *Metropolitan Travel Forecasting: Current Practice and Future Direction*. Washington, DC: Transportation Research Board. Special Report 288. National Academy of Sciences, 2007.
- [8] J. de D. Ortúzar et L. G. Willumsen, *Modelling Transport*, 4^e éd. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2011.
- [9] 6t bureau de recherche, « Le vélo à assistance électrique: un nouveau mode métropolitain ? », 2015.
- [10] I. N. Sener, N. Eluru, et C. Bhat, « Who Are Bicyclists? Why and How Much Are They Bicycling? », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2134, p. 63-72, déc. 2009.
- [11] J. R. Kuzmyak, J. Walters, M. Bradley, et K. M. Kockelman, *NCHRP Report 770: Estimating bicycling and walking for planning and project development*. Washington, DC: Transportation Research Board, 2014.
- [12] B. E. Saelens, J. F. Sallis, et L. D. Frank, « Environmental correlates of walking and cycling: Findings from the transportation, urban design, and planning literatures », *Annals of Behavioral Medicine*, vol. 25, n° 2, p. 80-91, 2003.
- [13] J. Parkin, T. Ryley, et T. J. Jones, « Barriers to cycling: an exploration of quantitative analyses », *Cycling and society*, p. 67-82, 2007.
- [14] J. D. Hunt et J. E. Abraham, « Influences on bicycle use », *Transportation*, vol. 34, n° 4, p. 453-470, juin 2007.
- [15] J. M. Casello et V. Usyukov, « Modeling Cyclists' Route Choice Based on GPS Data », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2430, p. 155-161, 2014.
- [16] R. Ewing et R. Cervero, « Travel and the Built Environment: A Meta-Analysis », *Journal of the American Planning Association*, vol. 76, n° 3, p. 265-294, juin 2010.
- [17] R. Cervero et K. Kockelman, « Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 2, n° 3, p. 199-219, sept. 1997.
- [18] J. Parkin, M. Wardman, et M. Page, « Estimation of the determinants of bicycle mode share for the journey to work using census data », *Transportation*, vol. 35, n° 1, p. 93-109, 2008.
- [19] J. Pucher et R. Buehler, « Why Canadians cycle more than Americans: A comparative analysis of bicycling trends and policies », *Transport Policy*, vol. 13, n° 3, p. 265-279, mai 2006.
- [20] J. Dill et K. Voros, « Factors affecting bicycling demand: Initial survey findings from the Portland, Oregon, Region », vol. 2031, p. 9-17, 2007.
- [21] R. Cervero et M. Duncan, « Walking, Bicycling, and Urban Landscapes: Evidence From the San Francisco Bay Area », *American Journal of Public Health*, vol. 93, n° 9, p. 1478-1483, sept. 2003.
- [22] J. Pucher, C. Komanoff, et P. Schimek, « Bicycling renaissance in North-America? Recent trends and alternative policies to promote bicycling », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 33, n° 7-8, p. 625-654, 1999.

- [23] J. Pucher, R. Buehler, et M. Seinen, « Bicycling renaissance in North America? An update and re-appraisal of cycling trends and policies », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 45, n° 6, p. 451-475, juill. 2011.
- [24] J. Zacharias, « Non-motorized transportation in four Shanghai districts », *International Planning Studies*, vol. 10, n° 2-3, p. 323-340, 2005.
- [25] M. L. Baltés, « Factors Influencing Nondiscretionary Work Trips by Bicycle Determined from 1990 U.S. Census Metropolitan Statistical Area Data », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1536, p. 96-101, 1996.
- [26] M. Winters, M. C. Friesen, M. Koehoorn, et K. Teschke, « Utilitarian Bicycling: A Multilevel Analysis of Climate and Personal Influences », *American Journal of Preventive Medicine*, vol. 32, n° 1, p. 52-58, 2007.
- [27] A. V. Moudon *et al.*, « Cycling and the built environment, a US perspective », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 10, n° 3, p. 245-261, mai 2005.
- [28] M. Räsänen et H. Summala, « Attention and expectation problems in bicycle-car collisions: an in-depth study », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 30, n° 5, p. 657-666, 1998.
- [29] D. A. Rodríguez et J. Joo, « The relationship between non-motorized mode choice and the local physical environment », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 9, n° 2, p. 151-173, 2004.
- [30] P. O. Plaut, « Non-motorized commuting in the US », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 15, n° 5, p. 347-356, 2005.
- [31] J. Garrard, G. Rose, et S. K. Lo, « Promoting transportation cycling for women: The role of bicycle infrastructure », *Preventive Medicine*, vol. 46, n° 1, p. 55-59, janv. 2008.
- [32] M. A. Stinson et C. R. Bhat, « A comparison of the route preferences of experienced and inexperienced bicycle commuters », *Transportation Research Board Paper*, n° 05-1434, 2005.
- [33] K. Halldórsdóttir, L. Christensen, T. C. Jensen, et C. G. Prato, « Modelling mode choice in short trips-shifting from car to bicycle », in *Proceedings of the European Transport Conference 2011*, Glasgow, United Kingdom, 2011.
- [34] Y. Xing, S. L. Handy, et T. J. Buehler, « Factors associated with bicycle ownership and use: A study of 6 small US cities », in *Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC*, 2008.
- [35] K. W. Axhausen et R. L. Smith Jr., « Bicyclist link evaluation: a stated-preference approach », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1085, p. 7-15, 1986.
- [36] B. Gatersleben et K. M. Appleton, « Contemplating cycling to work: Attitudes and perceptions in different stages of change », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 41, n° 4, p. 302-312, 2007.
- [37] I. Salomon et M. Ben-Akiva, « The use of the life-style concept in travel demand models », *Environment and Planning A*, vol. 15, n° 5, p. 623-638, 1983.
- [38] R. B. Noland, « Perceived risk and modal choice: risk compensation in transportation systems », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 27, n° 4, p. 503-521, 1995.
- [39] W. C. Wilkinson, A. Clarke, B. Epperson, et R. Knoblauch, « The Effects of bicycle accommodations on bicycle/motor vehicle safety and traffic operations », Federal Highway Administration, Washington, DC, FHWA-RD-92-069, 1994.
- [40] J. Forester, *Bicycle Transportation, Second Edition. A Handbook for Cycling Transportation Engineers*, 2^e éd. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1994.
- [41] A. Daly, S. Hess, B. Patruni, D. Potoglou, et C. Rohr, « Using ordered attitudinal indicators in a latent variable choice model: a study of the impact of security on rail travel behaviour », *Transportation*, vol. 39, n° 2, p. 267-297, 2012.
- [42] R. Maldonado-Hinarejos, A. Sivakumar, et J. W. Polak, « Exploring the role of individual attitudes and perceptions in predicting the demand for cycling: a hybrid choice modelling approach », *Transportation*, vol. 41, n° 6, p. 1287-1304, nov. 2014.
- [43] M. Stinson et C. Bhat, « An Analysis of Commuter Bicyclist Route Choice Using a Stated Preference Survey », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1828, p. 107-115, 2003.
- [44] B. Epperson, « Evaluating suitability of roadways for bicycle use: towards a cycling level-of-service standard », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1438, p. 9-16, 1994.

- [45] A. Sorton et T. W. Walsh, « Bicycle stress level as a tool to evaluate urban and sub-urban bicycle compatibility », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1438, p. 17-24, 1994.
- [46] D. Taylor et H. Mahmassani, « Analysis of Stated Preferences for Intermodal Bicycle-Transit Interfaces », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1556, p. 86-95, janv. 1996.
- [47] J. E. Abraham, S. McMillan, A. T. Brownlee, et J. D. Hunt, « Investigation of Cycling Sensitivities », in *Investigation of Cycling Sensitivities Transportation Research Board Annual Conference, January 2002, Washington, DC*, Washington, DC, 2002.
- [48] J. Dill et T. Carr, « Bicycle commuting and facilities in major US cities: if you build them, commuters will use them », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n° 1828, p. 116-123, 2003.
- [49] A. Nelson et D. Allen, « If you build them, commuters will use them: the association between bicycle facilities and bicycle commuting », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1578, p. 79-83, 1997.
- [50] M. Frulanu, G. de Munck, et H. Voerknecht, Éd., *Cycling in the Netherlands*. Pays Bas: Ministerie van Verkeer en Waterstaat (Ministry of Transport, Public Works and Water Management) Directorate-General for Passenger Transport. Fietsberaad (Expertise Centre for Cycling Policy), 2009.
- [51] J. Fajans et M. Curry, « Why Bicyclists Hate Stop Signs », *Access*, vol. 10, p. 21-22, 2001.
- [52] P. de Roulet, « itiVélo : Développement d'un calculateur d'itinéraires vélo pour Genève », Mémoire. Certificat complémentaire de géomatique, Université de Genève, Genève, 2012.
- [53] P. Rietveld et V. Daniel, « Determinants of bicycle use: do municipal policies matter? », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 38, n° 7, p. 531-550, août 2004.
- [54] A. Bergström et R. Magnusson, « Potential of transferring car trips to bicycle during winter », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 37, n° 8, p. 649-666, 2003.
- [55] R. B. Noland et H. Kunreuther, « Short-run and long-run policies for increasing bicycle transportation for daily commuter trips », *Transport Policy*, vol. 2, n° 1, p. 67-79, 1995.
- [56] B. de Geus, « Cycling to work: Psychosocial and environmental factors associated with cycling and the effect of cycling on fitness and health indexes in an untrained working population », Doctoral dissertation submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor in Physical Education, Vrije Universiteit Brussel, Bruxelles, 2007.
- [57] J. E. Dickinson, S. Kingham, S. Copley, et D. J. P. Hougie, « Employer travel plans, cycling and gender: will travel plan measures improve the outlook for cycling to work in the UK? », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 8, n° 1, p. 53-67, 2003.
- [58] M. Southworth, « Designing the Walkable City », *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 131, n° 4, p. 246-257, 2005.
- [59] R. Ververs et A. Ziegelaar, « Verklaringsmodel voor fietsgebruik gemeenten », Research voor beleid bv, B3031, 2006.
- [60] G. Menghini, N. Carrasco, N. Schüssler, et K. W. Axhausen, « Route choice of cyclists in Zurich », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 44, n° 9, p. 754-765, nov. 2010.
- [61] J. Broach, J. Dill, et J. Gliebe, « Where do cyclists ride? A route choice model developed with revealed preference GPS data », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 46, n° 10, p. 1730-1740, déc. 2012.
- [62] J. Hood, E. Sall, et B. Charlton, « A GPS-based bicycle route choice model for San Francisco, California », *Transportation Letters: The International Journal of Transportation Research*, vol. 3, n° 1, p. 63-75, janv. 2011.
- [63] M. Nankervis, « The effect of weather and climate on bicycle commuting », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 33, n° 6, p. 417-431, août 1999.
- [64] K. R. Shafizadeh et D. A. Niemeier, « Bicycle Journey-to-Work: Travel Behavior Characteristics Spatial Attributes », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1578, p. 84-90, 1997.
- [65] K. J. Krizek, « Two Approaches to Valuing Some of Bicycle Facilities' Presumed Benefits: Propose a session for the 2007 National Planning Conference in the City of Brotherly Love », *Journal of the American Planning Association*, vol. 72, n° 3, p. 309-320, sept. 2006.
- [66] N. Y. Tilahun, D. M. Levinson, et K. J. Krizek, « Trails, lanes, or traffic: Valuing bicycle facilities with an adaptive stated preference survey », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 41, n° 4, p. 287-301, mai 2007.

- [67] L. M. Aultman-Hall, « Commuter bicycle route choice: analysis of major determinants and safety implications », PhD dissertation. Department of Civil Engineering, McMaster University, Hamilton, Ontario, 1996.
- [68] M. Flamm, « Etude sur les choix d'itinéraires des cyclistes à Genève », Rapport interne pour le compte de la Direction Générale des Transports de l'Etat de Genève, 2014.
- [69] C. L. Antonakos, « Environmental and travel preferences of cyclists », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1438, p. 25-33, 1994.
- [70] M. A. Bradley et P. H. L. Bovy, « A stated preference analysis of bicyclist route choice », présenté à Planning and Transport Research and Computation Summer Annual Meeting, Brighton, Royaume-Uni, 1984, p. 39-53.
- [71] City of Calgary Transportation et City of Calgary Transportation Department, « Calgary Commuter Cyclist Survey, 1992/1993; Final Results », Calgary, 1993.
- [72] J. D. Copley et D. B. Pelz, « The City of Davis experience—what works », in *Transportation Congress: Civil Engineers - Key to the World's Infrastructure*, New York, 1995, vol. 2, p. 1116-1125.
- [73] S. Goldsmith, *Estimating the Effect of Bicycle Facilities on VMT and Emissions*. Seattle: City of Seattle Engineering Department, 1996.
- [74] M. Guttenplan et R. Patten, « Off-Road But On Track: Using Bicycle And Pedestrian Trails For Transportation », *Transportation Research News*, vol. 178, n° 3, p. 7-11, 1995.
- [75] Harris and Associates, *Pathways for people. Rodale Press Survey*. Emmaus, Pennsylvania: Rodale Press Survey, 1991.
- [76] B. Kroll et M. Ramey, « Effects of Bike Lanes on Driver and Bicyclist Behavior », *Journal of Transport Engineering*, vol. 103, n° 2, p. 243-253, 1977.
- [77] B. Kroll et R. Sommer, « Bicyclist response to urban bikeways », *Journal of the American Institute of Planners*, vol. 42, n° 1, p. 42-51, 1976.
- [78] B. W. Landis, V. R. Vattikiti, et M. T. Brannick, « Real-time human perceptions: towards a bicycle level of service », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1578, p. 119-126, 1997.
- [79] D. F. Lott, T. Tardiff, et D. Y. Lott, « Evaluation by experienced riders of a new bicycle lane in an established bikeway system », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 683, p. 40-46, 1978.
- [80] J. H. Mars et M. I. Kyriakides, *Reasons and Recommendations: A Profile of Adult Cyclists in Toronto*. Toronto: City of Toronto Planning and Development Department, 1986.
- [81] D. W. Sacks, « Greenways as Alternative Transportation Routes: A Case Study of Selected Greenways in the Baltimore-Washington Area », Master of Science, Towson State University, Towson, Maryland, 1994.
- [82] W. J. Davis, « Bicycle test route evaluation for urban road conditions », in *Transportation Congress: Civil Engineers - Key to the World's Infrastructure*, New York, 1995, vol. 2, p. 1063-1076.
- [83] City and County of Denver, *Denver Bicycle Master Plan*. Denver, Colorado: City and County of Denver, 1993.
- [84] R. Shepherd, « Road and path quality for cyclists », in *Proceedings of the 17th Australian Road Research Board Conference*, Gold-Coast, Queensland, 1995, p. 133-147.
- [85] A. Sorton, « Measuring the bicyclist stress level of streets », in *Transportation Congress: Civil Engineers - Key to the World's Infrastructure*, New York, 1995, vol. 2, p. 1077-1088.
- [86] B. Teichgraeber, « Wegewhal von Radfahrern », Master Thesis, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Allemagne, 1982.
- [87] P. Ambrosius, « Nachfrage im Fahrradverkehr – Ansätze zur Quantifizierung des Einflusses von Radverkehrsanlagen », PhD Thesis, Ruhr Universität Bochum, Allemagne, 1984.
- [88] G. G. Wynne, « National Bicycling and Walking Study; Case Study 16: A Study of Bicycle and Pedestrian Programs in European Countries », Federal Highway Administration, Washington, DC, FHWA-PD-92-037, 1992.
- [89] P. M. Parajuli, « Analysis of Line Haul Transit Systems with Low Cost Feeder Modes », PhD dissertation. Department of Civil Engineering, University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, 1996.
- [90] P. M. Parajuli et S. C. Wirasinghe, « Line Haul Interstation Spacing For Low Cost Feeder Modes », *Transportation Planning and Technology*, vol. 24, n° 4, p. 309-348, 2001.

- [91] M. Ben-Akiva et T. J. Atherton, « Methodology for Short-Range Travel Demand Predictions: Analysis of Carpooling Incentives », *Journal of Transport Economics and Policy*, vol. 11, n° 3, p. 224-261, 1977.
- [92] M. Ben-Akiva et S. R. Lerman, *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1985.
- [93] K. Halldórsdóttir, N. Rieser-Schussler, K. W. Axhausen, O. A. Nielsen, et C. G. Prato, « Efficiency of choice set generation methods for bicycle routes », *European journal of transport and infrastructure research*, vol. 14, n° 4, p. 332-348, 2014.
- [94] E. Ravalet, D. P. Christie, S. Munafò, et V. Kaufmann, « D'un quartier à l'autre : analyse quantitative de la marche dans la Suisse urbaine », in *La ville sous nos pieds : Connaissances et pratiques favorables aux mobilités piétonnes*, Montréal, Canada, 2014, p. 39-50.
- [95] J. Desyllas, E. Duxbury, J. Ward, et A. Smith, « Pedestrian demand modelling of large cities: an applied example from London ». University College London. CENTRE FOR ADVANCED SPATIAL ANALYSIS Working Paper Series, 2003.
- [96] A. Danalet, B. Farooq, et M. Bierlaire, « Towards an activity-based model for pedestrian facilities », in *13th Swiss Transport Research Conference*, 2013.
- [97] M. Bierlaire et T. Robin, « Pedestrians Choices », in *Pedestrian Behavior. Models, Data Collection and Applications*, H. Timmermans, Éd. Bingley, Royaume-Uni: Emerald Group Publishing Limited, 2009, p. 1-26.
- [98] E. S. Ampt, A. J. Richardson, et W. Brög, Éd., *New Survey Methods in Transport: 2nd International Conference, Hungerford Hill, Australia, 1983*. Utrecht, the Netherlands: VNU Science Press, 1985.
- [99] A. J. Richardson, E. S. Ampt, et A. H. Meyburg, *Survey methods for transport planning*. Melbourne, Australia: Eucalyptus Press, University of Melbourne, 1995.
- [100] Observatoire universitaire de la mobilité et Transportation Center, « Microrecensement Mobilité et Transports 2010 : La mobilité des Genevois et des Vaudois », UNIGE et EPFL, 2014.
- [101] Office fédéral de la statistique, *La mobilité en Suisse : résultats du microrecensement mobilité et transports 2010*. Neuchâtel: Office fédéral de la statistique, 2012.
- [102] Cambridge Systematics, Inc, Dowling Associates, Inc., System Metrics Group, Inc., et Texas Transportation Institute, *NCHRP Report 618: Cost-effective performance measures for travel time delay, variation, and reliability*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2008.
- [103] M. Risse, P. Regli, et J. Leuba, *Pour que la marche compte : Les systèmes de comptages piétons et leurs applications*. Zurich: Mobilité piétonne Suisse avec le soutien de l'Office fédéral des routes OFROU, Domaine mobilité douce, 2015.
- [104] SFCTA, « Site internet présentant le projet « CycleTracks » », 2016. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.sfcta.org/modeling-and-travel-forecasting/cycletracks-iphone-and-android>. [Consulté le: 22-févr-2016].
- [105] J. Strauss, L. F. Miranda-Moreno, et P. Morency, « Mapping cyclist activity and injury risk in a network combining smartphone GPS data and bicycle counts », *Accident Analysis & Prevention*, vol. 83, p. 132-142, oct. 2015.
- [106] J. Strauss et L. F. Miranda-Moreno, « Speed, Travel Time and Delay for Intersections and Road Segments in Montreal using Cyclist Smartphone GPS Data », in *TRB, 95th Annual Meeting Compendium of Papers DVD*, Washington DC, 2016.
- [107] K. Watkins, R. Ammanamanchi, J. LaMondia, et C. A. LeDantec, « Comparison of Smartphone-based Cyclist GPS Data Sources », in *TRB, 95th Annual Meeting Compendium of Papers DVD*, Washington DC, 2016.
- [108] P. Ryus et al., *NCHRP Report 797: Guidebook on Pedestrian and Bicycle Volume Data Collection*. Washington, DC: Transportation Research Board, 2014.
- [109] P. Widmer, P. Aemisegger, M. Ruesch, G. Moreni, M. Wagner, et K. W. Axhausen, « Anforderungen an zukünftige Mobilitätserhebungen », SVI, Bern : UVEK-ASTRA Bericht No 1549, Forschungsprojekt SVI 2011/015 auf Antrag der Schweizerischen Vereinigung der Verkehrsingenieure und Verkehrsexperten (SVI) SVI 2011/015, 2016.
- [110] S. Zangenehpour, L. F. Miranda-Moreno, et N. Saunier, « Automated classification based on video data at intersections with heavy pedestrian and bicycle traffic: Methodology and application », *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 56, p. 161-176, juill. 2015.

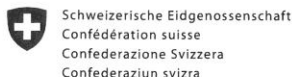
- [111] A. Alahi, M. Bierlaire, et P. Vandergheynst, « Robust real-time pedestrians detection in urban environments with low-resolution cameras », *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 39, p. 113-128, févr. 2014.
- [112] F. Proulx, R. Schneider, et L. Miranda-Moreno, « Performance Evaluation and Correction Functions for Automated Pedestrian and Bicycle Counting Technologies », *J. Transp. Eng.*, vol. 142, n° 3, p. 04016002, janv. 2016.
- [113] A. Danalet, « Activity choice modeling for pedestrian facilities », Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2015.
- [114] S. Kritzinger *et al.*, « Messen des Nutzens von Massnahmen mit Auswirkungen auf den Langsamverkehr - Vorstudie », OFROU, SVI, Bern, SVI2010/004, déc. 2013.
- [115] SMO, « Résultats du microrecensement 2010 sur le comportement de la population fribourgeoise en matière de transports », Service de la Mobilité du Canton de Fribourg, Fribourg, 2013.
- [116] W. E. Deming et F. F. Stephan, « On Least Squares Adjustment of a Sampled Frequency Table When the Expected Marginal Totals are Known », *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 11, n° 4, p. 427-444, 1940.
- [117] T. T. Ton et D. A. Hensher, *A spatial and statistical approach for imputing origin-destination matrices from household travel survey data: a Sydney case study*. Institute of Transport Studies, 2002.
- [118] P. Robillard, « Estimating the O-D matrix from observed link volumes », *Transportation Research*, vol. 9, n° 2-3, p. 123-128, juill. 1975.
- [119] O. Z. Tamin et L. G. Willumsen, « Transport demand model estimation from traffic counts », *Transportation*, vol. 16, n° 1, p. 3-26, 1989.
- [120] M. Bierlaire et P. . Toint, « Meuse: An origin-destination matrix estimator that exploits structure », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 29, n° 1, p. 47-60, févr. 1995.
- [121] E. Cascetta et S. Nguyen, « A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 22, n° 6, p. 437-455, déc. 1988.
- [122] E. Cascetta et M. N. Postorino, « Fixed Point Approaches to the Estimation of O/D Matrices Using Traffic Counts on Congested Networks », *Transportation Science*, vol. 35, n° 2, p. 134-147, mai 2001.
- [123] H. Spiess, « A maximum likelihood model for estimating origin-destination matrices », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 21, n° 5, p. 395-412, oct. 1987.
- [124] W. Xu et Y. Chan, « Estimating an origin-destination matrix with fuzzy weights. Part I: Methodology », *Transportation Planning and Technology*, vol. 17, n° 2, p. 127-144, avr. 1993.
- [125] W. Xu et Y. Chan, « Estimating an origin-destination matrix with fuzzy weights. Part II: Case studies », *Transportation Planning and Technology*, vol. 17, n° 2, p. 145-163, avr. 1993.
- [126] Zhejun Gong, « Estimating the urban OD matrix: A neural network approach », *European Journal of Operational Research*, vol. 106, n° 1, p. 108-115, avr. 1998.
- [127] Citec Ingénieurs Conseils, « MMT 2.0 – Modèle Multimodal Transfrontalier – Rapport technique du calage de l'état existant 2010 », 2013.
- [128] M. Iacono, K. J. Krizek, et A. El-Geneidy, « Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution », *Journal of Transport Geography*, vol. 18, n° 1, p. 133-140, janv. 2010.
- [129] J. E. Abraham, « Parameter Estimation in Urban Models: Theory and Application to a Land Use Transport Interaction Model of the Sacramento, California Region », PhD thesis, University of Calgary, Calgary, Canada, 2000.
- [130] T.-Q. TANG, H.-J. HUANG, et H.-Y. SHANG, « A DYNAMIC MODEL FOR THE HETEROGENEOUS TRAFFIC FLOW CONSISTING OF CAR, BICYCLE AND PEDESTRIAN », *Int. J. Mod. Phys. C*, vol. 21, n° 02, p. 159-176, févr. 2010.
- [131] R. B. Dial, « A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration », *Transportation Research*, vol. 5, n° 2, p. 83-111, juin 1971.
- [132] C. F. Daganzo et Y. Sheffi, « On Stochastic Models of Traffic Assignment », *Transportation Science*, vol. 11, n° 3, p. 253-274, 1977.
- [133] M. Fosgerau, E. Frejinger, et A. Karlstrom, « A link based network route choice model with unrestricted choice set », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 56, p. 70-80, oct. 2013.

- [134] T. Mai, M. Fosgerau, et E. Frejinger, « A nested recursive logit model for route choice analysis », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 75, p. 100-112, mai 2015.
- [135] P. H. L. Bovy et S. Fiorenzo-Catalano, « Stochastic route choice set generation: Behavioral and probabilistic foundations », *Transportmetrica*, vol. 3, n° 3, p. 173-189, 2007.
- [136] E. Frejinger, M. Bierlaire, et M. Ben-Akiva, « Sampling of alternatives for route choice modeling », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 43, n° 10, p. 984-994, déc. 2009.
- [137] G. Flötteröd et M. Bierlaire, « Metropolis–Hastings sampling of paths », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 48, p. 53-66, févr. 2013.
- [138] M. Ben-Akiva et M. Bierlaire, « Discrete choice methods and their applications to short term travel decisions », in *Handbook of Transportation Science*, R. Hall, Éd. Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 1999, p. 5-34.
- [139] E. Cascetta, A. Nuzzolo, F. Russo, et A. Vitetta, « A modified logit route choice model overcoming path overlapping problems. Specification and some calibration results for interurban networks », in *TRANSPORTATION AND TRAFFIC THEORY. PROCEEDINGS OF THE 13TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TRANSPORTATION AND TRAFFIC THEORY, LYON, FRANCE, 24-26 JULY 1996*, Lyon, France, 1996, p. 697-711.
- [140] P. Vovsha et S. Bekhor, « Link-Nested Logit Model of Route Choice: Overcoming Route Overlapping Problem », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1645, p. 133-142, janv. 1998.
- [141] X. Lai et M. Bierlaire, « Specification of the cross-nested logit model with sampling of alternatives for route choice models », *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 80, p. 220-234, oct. 2015.
- [142] S. D. Clark et D. P. Watling, « A FRAMEWORK FOR ESTIMATING CONFIDENCE INTERVALS FOR PROBIT TRAFFIC ASSIGNMENT ».
- [143] M. G. H. Bell et Y. Iida, « Stochastic User Equilibrium Assignment », in *Transportation Network Analysis*, John Wiley & Sons, Ltd., 1997, p. 113-148.
- [144] C. Yang, A. Chen, X. Xu, et S. C. Wong, « Sensitivity-based Uncertainty Analysis of a Combined Travel Demand Model », *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 80, p. 395-415, juin 2013.
- [145] Y. Xiang, S. Gubian, B. Suomela, et J. Hoeng, « Generalized Simulated Annealing for Global Optimization: The GenSA Package. An Application to Non-Convex Optimization in Finance and Physics », *The R Journal*, vol. 5, n° 1, p. 13-28, 2013.
- [146] R Core Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2015.
- [147] J. P. Broach, « Travel Mode Choice Framework Incorporating Realistic Bike and Walk Routes », PhD dissertation. Department of Urban Studies, Portland State University, 2016.
- [148] B. Muñoz, A. Monzon, et R. A. Daziano, « The Increasing Role of Latent Variables in Modelling Bicycle Mode Choice », *Transport Reviews*, vol. 36, n° 6, p. 737-771, nov. 2016.
- [149] G. Rose et H. Marfurt, « Travel behaviour change impacts of a major ride to work day event », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 41, n° 4, p. 351-364, mai 2007.
- [150] L. Frank, M. Bradley, S. Kavage, J. Chapman, et T. K. Lawton, « Urban form, travel time, and cost relationships with tour complexity and mode choice », *Transportation*, vol. 35, n° 1, p. 37-54, 2008.
- [151] M. Winters, M. Brauer, E. M. Setton, et K. Teschke, « Built Environment Influences on Healthy Transportation Choices: Bicycling versus Driving », *Journal of Urban Health*, vol. 87, n° 6, p. 969-993, 2010.
- [152] K. J. Clifton, P. A. Singleton, C. D. Muhs, R. J. Schneider, et P. Lagerway, « Improving the Representation of the Pedestrian Environment in Travel Demand models -- Phase I », Oregon Transportation Research and Education Consortium, OTREC-RR-510, 2013.
- [153] R. B. Noland, H. Park, L. A. Von Hagen, et D. G. Chatman, « A mode choice analysis of school trips in New Jersey », *Journal of Transport and Land Use*, vol. 7, n° 2, p. 111, juill. 2014.
- [154] T. Ryley, « Estimating Cycling Demand for the Journey to Work or Study in West Edinburgh, Scotland », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1982, p. 187-193, janv. 2006.

- [155] M. Roorda, D. Passmore, et E. Miller, « Including Minor Modes of Transport in a Tour-Based Mode Choice Model with Household Interactions », *J. Transp. Eng.*, vol. 135, n° 12, p. 935-945, juin 2009.
- [156] G. Akar et K. Clifton, « Influence of Individual Perceptions and Bicycle Infrastructure on Decision to Bike », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2140, p. 165-172, déc. 2009.
- [157] I. Lee, H. Park, et K. Sohn, « Increasing the number of bicycle commuters », *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, vol. 165, n° 1, p. 63-72, févr. 2012.
- [158] M. Börjesson et J. Eliasson, « The value of time and external benefits in bicycle appraisal », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 46, n° 4, p. 673-683, mai 2012.
- [159] L. dell'Olio, A. Ibeas, M. Bordagaray, et J. Ortúzar, « Modeling the Effects of Pro Bicycle Infrastructure and Policies Toward Sustainable Urban Mobility », *J. Urban Plann. Dev.*, vol. 140, n° 2, p. 04014001, oct. 2013.
- [160] S. Gehrke et K. Clifton, « Operationalizing Land Use Diversity at Varying Geographic Scales and Its Connection to Mode Choice », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2453, p. 128-136, déc. 2014.
- [161] M. Kamargianni et A. Polydoropoulou, « Hybrid Choice Model to Investigate Effects of Teenagers' Attitudes Toward Walking and Cycling on Mode Choice Behavior », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 2382, p. 151-161, déc. 2013.
- [162] Á. Fernández-Heredia, S. Jara-Díaz, et A. Monzón, « Modelling bicycle use intention: the role of perceptions », *Transportation*, vol. 43, n° 1, p. 1-23, 2016.
- [163] K. Kockelman, « Travel Behavior as Function of Accessibility, Land Use Mixing, and Land Use Balance: Evidence from San Francisco Bay Area », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1607, p. 116-125, janv. 1997.
- [164] R. Ewing, W. Schroeer, et W. Greene, « School Location and Student Travel Analysis of Factors Affecting Mode Choice », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1895, p. 55-63, janv. 2004.
- [165] A. Bergman, J. Gliebe, et J. Strathman, « Modeling access mode choice for inter-suburban commuter rail », *Journal of Public Transportation*, vol. 14, n° 4, p. 2, 2011.
- [166] J. Rajamani, C. Bhat, S. Handy, G. Knaap, et Y. Song, « Assessing Impact of Urban Form Measures on Nonwork Trip Mode Choice After Controlling for Demographic and Level-of-Service Effects », *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol. 1831, p. 158-165, janv. 2003.
- [167] S. Saneinejad, M. J. Roorda, et C. Kennedy, « Modelling the impact of weather conditions on active transportation travel behaviour », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 17, n° 2, p. 129-137, mars 2012.
- [168] M. Zhang, « The Role of Land Use in Travel Mode Choice: Evidence from Boston and Hong Kong », *Journal of the American Planning Association*, vol. 70, n° 3, p. 344-360, sept. 2004.
- [169] E. J. Miller, M. J. Roorda, et J. A. Carrasco, « A tour-based model of travel mode choice », *Transportation*, vol. 32, n° 4, p. 399-422, juill. 2005.
- [170] K. Sanders, B. de Vries, P. J. H. J. van der Waerden, B. Glumac, et M. de Bruin, « Investigation of the role of pre-transport in travelers' transportation mode choice. A study conducted in the region of the railway station of Eindhoven », in *EXPLORING ENERGY NEUTRAL DEVELOPMENT KenW 2 iB rabant part 4 TU/e 20 1 3 /2015*, .
- [171] E. Heinen, K. Maat, et B. van Wee, « The effect of work-related factors on the bicycle commute mode choice in the Netherlands », *Transportation*, vol. 40, n° 1, p. 23-43, 2013.
- [172] M. Reilly et J. Landis, « The influence of built-form and land use on mode choice », *University of California Transportation Center*, 2003.
- [173] A. Soltani et A. Allan, « Analyzing the Impacts of Microscale Urban Attributes on Travel: Evidence from Suburban Adelaide, Australia », *J. Urban Plann. Dev.*, vol. 132, n° 3, p. 132-137, sept. 2006.
- [174] J.-J. Lin et H.-T. Chang, « Built Environment Effects on Children's School Travel in Taipei: Independence and Travel Mode », *Urban Studies*, vol. 47, n° 4, p. 867-889, avr. 2010.
- [175] F. Goetzke et T. Rave, « Bicycle Use in Germany: Explaining Differences between Municipalities with Social Network Effects », *Urban Studies*, vol. 48, n° 2, p. 427-437, févr. 2011.

- [176] L. Ma et J. Dill, « Associations between the objective and perceived built environment and bicycling for transportation », *Journal of Transport & Health*, vol. 2, n° 2, p. 248-255, juin 2015.
- [177] M. Kamargianni, S. Dubey, A. Polydoropoulou, et C. Bhat, « Investigating the subjective and objective factors influencing teenagers' school travel mode choice – An integrated choice and latent variable model », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 78, p. 473-488, août 2015.
- [178] C. Lee, X. Zhu, J. Yoon, et J. W. Varni, « Beyond Distance: Children's School Travel Mode Choice », *Annals of Behavioral Medicine*, vol. 45, n° 1, p. 55-67, 2013.
- [179] M. Schlossberg, J. Greene, P. P. Phillips, B. Johnson, et B. Parker, « School Trips: Effects of Urban Form and Distance on Travel Mode », *Journal of the American Planning Association*, vol. 72, n° 3, p. 337-346, sept. 2006.
- [180] T. E. McMillan, « The relative influence of urban form on a child's travel mode to school », *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 41, n° 1, p. 69-79, janv. 2007.
- [181] S. B. Sigurdardottir, S. Kaplan, M. Møller, et T. W. Teasdale, « Understanding adolescents' intentions to commute by car or bicycle as adults », *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 24, p. 1-9, oct. 2013.
- [182] S. Titze, W. J. Stronegger, S. Janschitz, et P. Oja, « Environmental, Social, and Personal Correlates of Cycling for Transportation in a Student Population », *Journal of Physical Activity and Health*, vol. 4, n° 1, p. 66-79, janv. 2007.
- [183] S. Titze, W. J. Stronegger, S. Janschitz, et P. Oja, « Association of built-environment, social-environment and personal factors with bicycling as a mode of transportation among Austrian city dwellers », *Preventive Medicine*, vol. 47, n° 3, p. 252-259, sept. 2008.
- [184] K. Zweibrücken, D. Sauter, A. Stäheli et al, « Erhebung des Fuss und Veloverkehrs », *SVI Forschung 2001/503*, 2005.

Clôture du projet



Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Version du 09.10.2013

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

établi / modifié le : 28.11.2016/21.02.2017

Données de base

Projet N° : SVI 2014/001
Titre du projet : Modélisation macroscopique de la circulation cycliste et piétonne
Echéance effective : 20.12.2016

Textes :

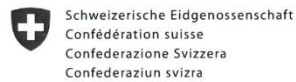
Résumé des résultats du projet :

Pour les cyclistes :

- des zones d'une taille d'environ 400 m de côté semblent optimales (dans le cas test de Genève, elles permettent d'affecter environ 98% des déplacements cyclables)
- il semble nécessaire de définir la totalité du réseau cyclable, soit toutes les voiries et les cheminements spécifiques s'il y en a (traversée d'un parc, cheminement le long d'une voie ferrée, etc) et d'utiliser des connecteurs courts entre zones et réseau afin de maximiser l'affectation sur le réseau. Dans le cadre de la recherche nous avons testé les attributs suivants : distance, pente positive maximale, pente positive du tronçon, bande cyclable, piste cyclable, contre-sens cyclable, voie bus, franchissement ou cohabitation d'une voie de tram, parcours avec agrément, nuisance ou gêne liée au trafic routier, danger ponctuel. Comme le choix d'itinéraire dépend des caractéristiques des tronçons mais aussi des chemins, soit de l'ensemble du parcours de l'origine à la destination, la construction des chemins est une étape importante de la modélisation. Le meilleur résultat d'affectation a été obtenu avec :
 - Algorithme stochastique pour le choix d'itinéraire
 - Génération des chemins basée uniquement sur la distance
 - Construction des chemins avec une variance élevée, de manière à générer un grand nombre d'alternatives de parcours
 - Répartition de la demande prenant en compte tous les autres attributs des tronçons
 - Le poids relatif des attributs est le suivant : par rapport à un tronçon neutre de 1.00 m, une piste cyclable, 0.48 m (donc net gain), une bande cyclable, 0.94m (donc faible gain, vraisemblablement en raison du périmètre testé), une voie bus, 0.88 m, une voie de tram, 1.23 m (ce qui traduit la dangerosité de circuler à vélo en présence de rails), un tronçon avec dérogation pour le piéton (traversée d'un parc par exemple) 0.93m, un contre-sens cyclable, 0.29 (donc un très net gain).

Pour les piétons :

- accorder une grande importance aux étapes et pas seulement aux déplacements (dans le cas de la ville de Genève les étapes représentent 56% du nombre de trajets à pied et 42% des km parcourus). La modélisation doit donc construire les affectations avec les chaînes de déplacement : piéton + TC et piétons + parking.
- taille de zone adaptée = 200 m de côté mais choisir un découpage à l'hectare facilite la prise en compte des générateurs ponctuels (commerces alimentaires, écoles, etc)
- principaux attributs de réseau pressentis : la distance (ou l'effort, ou le temps de parcours) est déterminante, la capacité du réseau n'est pas un critère de choix d'itinéraire sauf dans quelques rares cas, qualifier le socle actif (soit le type d'affectation et de service des rez-de-chaussée des bâtiments) constitue une manière simple de combiner l'attrait du réseau et d'améliorer la prise en compte de certains générateurs ponctuels. La gêne du trafic (sentiment de danger, volume sonore, difficultés à traverser la chaussée) est probablement un attribut négatif à considérer, surtout s'il intervient sur une rue aux trottoirs « étroits »



Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

Atteinte des objectifs :

- analyse fouillée de la littérature technique existante et synthèse des résultats connus,
- nette avancée de plusieurs éléments clefs de la modélisation macroscopique à 4 étapes pour les modes doux.
- cyclistes : objectif totalement atteint pour la questions de la taille des zones, de la densité du réseau, du choix des connecteurs (liens entre zones et réseau), de la méthode d'affectation, de la possibilité de faire évoluer un modèle existant TI/TC pour y intégrer le vélo
- cyclistes : avancée majeure sur les attributs de réseau à considérer pour l'affectation : paramètres principaux, leurs pondération relative et la méthode d'affectation (stochastique, attribut sur les chemins et sur les tronçons)
- piétons : objectif partiellement atteint en raison de la complexité du sujet et de l'insuffisance de méthode statistique actuelle sur les données
- piétons : objectif atteint pour la question de la taille des zones, de l'importance des étapes (chaînes de déplacement piéton+TC ou piéton+VP), de la manière de définir les connecteurs. Des indications concrètes ont aussi été données sur les attributs qui semblent les plus pertinents pour l'affectation.
- autres éléments : méthodes de collecte des données (champ d'application et développements à réaliser)

Déductions et recommandations :

- En priorité améliorer la connaissance statistique des flux piétons (localisation représentative des comptages, courbes de variations journalières) et cyclistes (représentativité statistique de comptages courts, matrices) en prolongement des travaux du mandat de recherche SVI 2001/503
- Consolider les résultats de la recherche pour les attributs cyclistes avec d'autres expérimentations
- tester les attributs de réseau pressentis pour les piétons dès que les bases statistiques sur les comptages seront clarifiées

Publications :

à prévoir

Chef/cheffe de projet :

Nom : GASSER

Prénom : Philippe

Service, entreprise, institut : Citec Ingénieurs Conseils SA

Signature du chef/de la cheffe de projet :

Recherche dans le domaine routier du DETEC : Formulaire 3

21. 2. 2017
citec INGENIEURS
CONSEILS SA
47, route des Acacias - CP 1711
1211 GENEVE 26 - SUISSE

Page 2 / 3



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports,
de l'énergie et de la communication DETEC
Office fédéral des routes OFROU

RECHERCHE DANS LE DOMAINE ROUTIER DU DETEC

Formulaire N° 3 : Clôture du projet

Appréciation de la commission de suivi :

Evaluation :

Das von der Forschungsstelle gewählte Vorgehen war für die Aufgabenstellung des Projekts weitgehend geeignet. Es hat sich als zielführend für die Ableitung praktischer Empfehlungen erwiesen. Chancen und Hindernisse für die Abbildung von Fuss- und Veloverkehr in Verkehrsmodellen kritisch zu analysieren und die Modellierung an einem existierenden Kantonsmodell zu testen. Die Begleitkommission (BK) wurde mithilfe von Zwischenberichten und Präsentationen ausführlich über den Projektverlauf informiert. Aus den Diskussionen mit der Begleitkommission hat die Forschungsstelle Rückschlüsse für die Forschungsarbeit gezogen.

Im Verlauf des Projekts (in den Diskussionen von Forschungsteam und Begleitkommission) wurde deutlich, dass für die Umsetzung in die Praxis viele Defizite bei Daten und theoretischen Grundlagen bestehen, und dass daher eine Fokussierung auf ausgewählte Probleme des Forschungsgebietes sinnvoll ist. In Absprache mit der Begleitkommission wurden daher die Praxistests auf das Verkehrsmittel Velo und dort auf Netzabbildung und Umlegung fokussiert, da dort der grösste praktische Nutzen des Forschungsprojekts erreicht werden konnte.

Für die anderen Teilprobleme des Forschungsgebiets (insbesondere Fussgänger-Umlegung und Verkehrsmittelwahl) wurden Theorie und Praxis der Modellierung dokumentiert, sowie Probleme bei Datenerhebung, Modellierung und daraus entstehender Forschungsbedarf analysiert und identifiziert. Eine bemerkenswerte Leistung ist die anschauliche Erklärung von Modellierung für Nicht-Experten.

Mise en oeuvre :

Als wichtigstes Ergebnis des Projekts wurde eine pragmatische Methode zur Abbildung des Veloverkehrs in einem makroskopischen Netz- und Umlegungsmodell untersucht. Die Methode wurde am Beispiel der Stadt Genf von der Datenerhebung bis zur Modellierung getestet und optimiert. Die Relevanz einzelner Einflussgrössen auf das Routenwahlverhalten im Veloverkehr konnten bestätigt werden. Weiterhin wurden Empfehlungen für die Praxis formuliert, wie Fuss- und Veloverkehr in klassischen makroskopischen Verkehrsmodellen abgebildet werden kann. Diese Empfehlungen können in der Verkehrsmodellierung der Kantone und der Städte umgesetzt werden. Für die Modellierung der Velo-Routenwahl liefern die Ergebnisse allgemeine Hinweise über die zu berücksichtigenden Einflussfaktoren. In der praktischen Umsetzung sind lokal Ergänzungen und Adaptionen an den Parametern der Velo-Routenwahl unerlässlich. Die Forschungsstelle stellt den dokumentierten Datensatz der Fallstudie Genève zur Verfügung, so dass dieser in anderen Forschungsprojekten zum Thema Velo-Umlegung verwendet werden kann.

Für den Fussverkehr konnte im Rahmen dieses Projekts aufgezeigt werden, welche theoretischen und praktischen Grundlagen vorliegen bzw. noch erforscht werden müssen, damit er als vollständiges Verkehrsmittel in Verkehrsmodellen abgebildet werden kann. Es ist eine offene Frage, ob die makroskopische Modellierung des Fussverkehrs ein für die Verkehrsplanung hilfreiches und zweckmässiges Werkzeug werden kann, angesichts der gegenwärtigen Defizite an Daten und Modellierungstechniken.

Besoin supplémentaire en matière de recherche :

Als weitergehender Forschungsbedarf ergibt sich:

1. Effiziente Zählmethoden Velo/Fuss
2. Makroskopische Umlegung des Fussverkehrs
3. Testen und Bewerten von Infrastruktur-Massnahmen und technologischen Verbesserungen (z.B. E-Bike) im Fuss- und Veloverkehr mit Hilfe von makroskopischen Verkehrsmodellen
4. Berücksichtigung von Knoten/Kreuzungen in der makroskopischen Umlegung für den Veloverkehr
5. Best Practice Vergleiche: z.B. Hektar-basierte Modellierung versus grössere Zonen.
6. Zusammenhang von Umlegungsmodell und Nachfragemodell: Rückkoppelung der Fuss/Velo-Kenngrössen in die Verkehrsmittelwahl.

Influence sur les normes :

Président/Présidente de la commission de suivi :

Nom : Scherr

Prénom : Wolfgang

Service, entreprise, institut : SBB

Signature du président/ de la présidente de la commission de suivi :

 , 17. 3. 2017

Index des rapports de recherche en matière de route

L'index actuel des rapports publiés dernièrement est à télécharger sur notre site www.astra.admin.ch (Service --> Recherche en matière de routes --> Downloads --> Formulaires).

Liste des publications SVI

La liste est disponible au [SVI](#).