



HAL
open science

Simulation multi-agents de politiques d'intermodalité urbaines et péri-urbaines

Azise Oumar Diallo

► **To cite this version:**

Azise Oumar Diallo. Simulation multi-agents de politiques d'intermodalité urbaines et péri-urbaines. Intelligence artificielle [cs.AI]. Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Lille Douai, 2022. Français. NNT : 2022MTLD0005 . tel-03890416

HAL Id: tel-03890416

<https://theses.hal.science/tel-03890416>

Submitted on 8 Dec 2022

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

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

IMT NORD EUROPE

École doctorale ED MADIS-631

Unité de recherche CERI Systèmes Numériques

Thèse présentée par **Azise Oumar DIALLO**

Soutenue le **20 janvier 2022**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'IMT Nord Europe

Discipline **Informatique**

Spécialité **Intelligence Artificielle**

Simulation multi-agents de politiques d'intermodalité urbaines et peri-urbaines

Thèse dirigée par M. René MANDIAU directeur
M. Arnaud DONIEC co-directeur
M. Guillaume LOZENGUEZ co-encadrant

Composition du jury

| | | |
|----------------------------|-------------------------------|--|
| <i>Présidente du jury</i> | Mme Salima HASSAS | Professeure à l'Université Claude Bernard Lyon 1 - LIRIS |
| <i>Rapporteurs</i> | Mme Marie-Pierre GLEIZES | Professeure à l'Université Toulouse III – IRIT UMR CNRS 5505 |
| | M. Vincent CHEVRIER | Professeur à l'Université de Lorraine – LO- RIA |
| <i>Examinatrice</i> | Mme Amal EL FALLAH-SEGROUCHNI | Professeure à Sorbonne Université - LIP6 |
| <i>Invité</i> | M. Sebastian HORL | Chargé de recherche à l'IRT System X |
| <i>Directeurs de thèse</i> | M. René MANDIAU | Professeur à l'Université Polytechnique Hauts-de-France - LAMIH |
| | M. Arnaud DONIEC | Professeur à l'IMT Nord Europe |
| | M. Guillaume LOZENGUEZ | mcf à l'IMT Nord Europe |

COLOPHON

Mémoire de thèse intitulé « Simulation multi-agents de politiques d'intermodalité urbaines et peri-urbaines », écrit par Azise Oumar DIALLO, achevé le 7 décembre 2022, composé au moyen du système de préparation de document \LaTeX et de la classe yathesis dédiée aux thèses préparées en France.

IMT NORD EUROPE

École doctorale ED MADIS-631

Unité de recherche CERI Systèmes Numériques

Thèse présentée par **Azise Oumar DIALLO**

Soutenue le **20 janvier 2022**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'IMT Nord Europe

Discipline **Informatique**

Spécialité **Intelligence Artificielle**

Simulation multi-agents de politiques d'intermodalité urbaines et peri-urbaines

Thèse dirigée par M. René MANDIAU directeur
M. Arnaud DONIEC co-directeur
M. Guillaume LOZENGUEZ co-encadrant

Composition du jury

| | | |
|----------------------------|-------------------------------|--|
| <i>Présidente du jury</i> | Mme Salima HASSAS | Professeure à l'Université Claude Bernard Lyon 1 - LIRIS |
| <i>Rapporteurs</i> | Mme Marie-Pierre GLEIZES | Professeure à l'Université Toulouse III – IRIT UMR CNRS 5505 |
| | M. Vincent CHEVRIER | Professeur à l'Université de Lorraine – LO- RIA |
| <i>Examinatrice</i> | Mme Amal EL FALLAH-SEGROUCHNI | Professeure à Sorbonne Université - LIP6 |
| <i>Invité</i> | M. Sebastian HORL | Chargé de recherche à l'IRT System X |
| <i>Directeurs de thèse</i> | M. René MANDIAU | Professeur à l'Université Polytechnique Hauts-de-France - LAMIH |
| | M. Arnaud DONIEC | Professeur à l'IMT Nord Europe |
| | M. Guillaume LOZENGUEZ | mcf à l'IMT Nord Europe |

IMT NORD EUROPE

Doctoral School ED MADIS-631

University Department CERI Systèmes Numériques

Thesis defended by **Azise Oumar DIALLO**

Defended on 20th January, 2022

In order to become Doctor from IMT Nord Europe

Academic Field **Computer science**

Speciality **Artificial Intelligence**

Multi-agent simulation of urban and peri-urban intermodality policies

| | | |
|-----------------------------|------------------------|---------------|
| Thesis supervised by | M. René MANDIAU | Supervisor |
| | M. Arnaud DONIEC | Co-Supervisor |
| | M. Guillaume LOZENGUEZ | Co-Monitor |

Committee members

| | | |
|----------------------------|-------------------------------|--|
| <i>Committee President</i> | Mme Salima HASSAS | Professor at Université Claude Bernard Lyon 1 - LIRIS |
| <i>Referees</i> | Mme Marie-Pierre GLEIZES | Professor at Université Toulouse III – IRIT UMR CNRS 5505 |
| | M. Vincent CHEVRIER | Professor at Université de Lorraine – LO- RIA |
| <i>Examiner</i> | Mme Amal EL FALLAH-SEGROUCHNI | Professor at Sorbonne Université - LIP6 |
| <i>Guest</i> | M. Sebastian HORL | Junior Researcher at IRT System X |
| <i>Supervisors</i> | M. René MANDIAU | Professor at Université Polytechnique Hauts-de-France - LAMIH |
| | M. Arnaud DONIEC | Professor at IMT Nord Europe |
| | M. Guillaume LOZENGUEZ | Associate Professor at IMT Nord Europe |

Cette thèse a été financée par l'IMT Nord Europe avec le soutien de la région Hauts-de-France.

L'IMT Nord Europe n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans les thèses : ces opinions devront être considérées comme propres à leurs auteurs.

Cette thèse a été préparée au

CERI Systèmes Numériques

Centre de recherche IMT Lille Douai

764 Boulevard Lahure

59500 Douai

France

☎ (33)(0)

📠 (33)(0)

✉ sylvain.lecomte@imt-nord-europe.fr

Site <https://imt-nord-europe.fr/recherche-et-innovation/systemes-numeriques/>



À mon père bien-aimé parti si tôt!

À ma mère bien-aimée mon soutien, mon bouclier!

*À ma petite famille adorée mon épouse Fatimata et mes trois trésors Belko Daouda,
Adjira Minh et Hamadoun Samba*

SIMULATION MULTI-AGENTS DE POLITIQUES D'INTERMODALITÉ URBAINES ET PERI-URBAINES**Résumé**

Le transport occupe une place capitale dans les besoins vitaux des populations au même titre que l'eau, la santé et l'éducation. De nombreux déplacements sont effectués dans le cadre de la réalisation des activités quotidiennes (p. ex., travail, éducation, shopping). Ces déplacements, réalisés en France majoritairement en voitures individuelles, génèrent également plusieurs conséquences négatives sur la santé et le bien-être des usagers (p. ex., pollution, congestion, nuisances sonores, accidents routiers). Pour réduire ces impacts négatifs, les pouvoirs publics prennent des mesures de mobilité pour orienter les comportements de déplacements des individus afin de les inciter à réduire l'usage de la voiture personnelle en faveur des transports publics (TP) et autres modes plus doux (p. ex., la marche, le vélo) et leurs combinaisons (intermodalité). L'élaboration de ces mesures et surtout leurs évaluations, nécessite l'utilisation d'outils adéquats. Les plateformes de simulation de trafic, utilisant les approches multi-agent et les modèles à base d'activités, sont de plus en plus utilisées pour adresser les politiques de mobilité à différentes échelles.

C'est dans cette dynamique que s'inscrit cette thèse qui vise à proposer un cadre de simulation multi-agent permettant d'évaluer les politiques d'intermodalité existantes et de pouvoir en explorer de nouvelles. Nous avons pu ainsi :

- Evaluer l'usage des parkings relais (P+R) dans la combinaison des voitures personnelles et des TP. Nous avons pu faire ressortir le rôle que jouent ces infrastructures dans les pratiques intermodales notamment pour les déplacements issus des zones périphériques vers l'hypercentre.
- Analyser l'impact du péage urbain avec ou sans la possibilité de combiner la voiture individuelle et les TP. On a pu montrer qu'avec 20 euros comme taxes de péage, il était possible de réduire l'usage de la voiture personnelle de 20% dans la Métropole Européenne de Lille (MEL).

Mots clés : simulation, multi-agent, intermodalité, choix modal, MATSim, mel

MULTI-AGENT SIMULATION OF URBAN AND PERI-URBAN INTERMODALITY POLICIES**Abstract**

Transport occupies a central place in the vital needs of populations, along with water, health and education. Several trips are performed for the realization of daily activities purpose (eg, work, education, shopping). These journeys, carried out mainly by private cars in France, also generate several negative consequences on the health and well-being of people (eg pollution, congestion, noise pollution, road accidents). To reduce these negative impacts, the public authorities are taking mobility measures to guide the travel behavior of individuals in order to encourage them to reduce the use of personal cars in favor of public transport (PT) and other soft modes (eg, walking, cycling) and their combinations (intermodality). The development of these measures and especially their evaluations, require the use of adequate tools. Traffic simulation platforms, using multi-agent approaches and activity-based models, are increasingly used solutions to address mobility policies at different scales.

This thesis is part of this dynamic, which aims to propose a multi-agent simulation framework to assess existing intermodality policies and to be able to explore new ones. We were able to:

- Assess the use of the park and ride facilities on the combination of personal cars and public transport. We were able to highlight the role that these infrastructures play in intermodal practices, in particular for trips from peripheral areas to the hyper-center.
- Analyze the impact of congestion charges with or without the possibility of combining private cars and public transport. It has been shown that with 20 euros as toll taxes, it was possible to reduce personal car use by 20% in the MEL.

Keywords: simulation, multi-agent, intermodality, modal choice, MATSim, mel

Remerciements

« Celui qui ne remercie pas les gens n'a pas remercié Allah » (Hadith).

Je remercie Mme Marie-Pierre GLEIZES et M. Vincent CHEVRIER de rapporter sur ce travail. J'ai beaucoup apprécié nos échanges, la qualité et la pertinence de leurs remarques et suggestions.

Je remercie également Mme Amal El FALLAH-SEGROUCHNI et Mme Salima HASSAS d'avoir accepté d'examiner mon travail.

Un grand merci à M. Sebastian HORL d'avoir accepté mon invitation pour assister à la soutenance et son aide précieuse dans la prise en main de *eqasim*.

Mes sincères remerciements à mon équipe d'encadrement : M. René MANDIAU, directeur de thèse ; M. Arnaud DONIEC, co-directeur et M. Guillaume LOZENGUEZ, co-encadrant. J'ai bénéficié d'une grande liberté dans mon travail et d'un accompagnement inconditionnel dans la proposition et le développement de mes idées.

Je remercie également le personnel du laboratoire CERI Systèmes Numériques en particulier Muriel pour son assistance dans les démarches administratives et Jérémie pour son aide précieuse dans la configuration de l'environnement de travail pour réaliser les expérimentations.

Je voudrais témoigner ma gratitude à un ami devenu un frère, M. Hamadoun Tall. Merci de m'avoir montré le chemin de la recherche et pour ton assistance et ton soutien multiforme durant mes études de Master au sein de l'Institut Francophone International (IFI) à Hanoi (Vietnam).

Je voudrais ensuite remercier mes parents pour leurs bénédictions et leur soutien. Mes profonds respects à ma maman Assanata qui depuis la disparition de mon père Daouda (parti très tôt), n'a cessé de croire en moi et de m'accompagner dans toutes mes entreprises. Un grand merci à mon épouse Fatimata pour son amour, sa patience et son support qui m'ont permis d'avoir la force et le courage nécessaires pour avancer dans mon travail. A mes enfants Belko, Minh et Samba (arrivé à ma 3e année de thèse), ma motivation et ma bataille, à qui je dois beaucoup pour ces heures d'absence et d'indisponibilité, papa vous dit MERCI.

Enfin, un grand MERCI à toutes celles et tous ceux qui m'ont assisté durant

ce travail.

Sommaire

| | |
|--|--------------|
| Résumé | xv |
| Remerciements | xvii |
| Sommaire | xix |
| Liste des tableaux | xxiii |
| Table des figures | xxv |
| Glossaire | xxix |
| Introduction générale | 1 |
| Contexte de l'étude | 1 |
| Objectifs applicatifs et résultats attendus | 4 |
| Hypothèses | 5 |
| Problématiques scientifiques abordées | 7 |
| Approche méthodologique | 8 |
| Contributions | 10 |
| Organisation du manuscrit | 10 |
| Partie I. Revue de littérature scientifique | 11 |
| Partie II. Contributions | 12 |
| Partie II. Annexes | 12 |
| Partie I. Revue de littérature scientifique | 14 |
| 1 Politiques d'intermodalité et les outils d'évaluation | 15 |
| Introduction | 15 |
| 1.1 Généralités sur les politiques d'intermodalité | 16 |
| 1.1.1 Définitions | 16 |
| 1.1.2 Les bienfaits de la pratique intermodale | 18 |
| 1.1.3 Politiques d'intermodalité | 19 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.2 | Les études qualitatives et quantitatives de mobilité | 21 |
| 1.2.1 | Définitions | 21 |
| 1.2.2 | Enquêtes sur les comportements d'intermodalité | 23 |
| 1.2.3 | Les recensements de la population | 24 |
| 1.2.4 | Les enquêtes de déplacements | 25 |
| 1.2.5 | Les données massives de mobilités | 28 |
| 1.3 | Modélisation et simulation des systèmes de transport | 30 |
| 1.3.1 | Définitions | 30 |
| 1.3.2 | Modèles de simulation des systèmes de transport | 33 |
| 1.3.3 | Données d'entrée pour réaliser une simulation de transport | 35 |
| 1.3.4 | Simulation de comportement d'intermodalité | 39 |
| | Conclusion | 40 |
| 2 | Modélisation multi-agent du transport | 43 |
| | Introduction | 43 |
| 2.1 | Modèles de simulation multi-agent de systèmes de transport | 44 |
| 2.1.1 | Paradigme Agent (Définition) | 44 |
| 2.1.2 | Exemple d'application aux transports | 48 |
| 2.2 | Génération de la demande de déplacement | 53 |
| 2.2.1 | Le modèle traditionnel à quatre étapes | 53 |
| 2.2.2 | Génération de la demande de transport multi-agent | 56 |
| 2.2.3 | Estimation du choix modal de transport | 60 |
| 2.3 | Choix de l'outil de simulation | 67 |
| 2.3.1 | Les études comparatives des simulateurs de systèmes de transport | 67 |
| 2.3.2 | Présentation de l'approche de comparaison utilisée | 70 |
| 2.3.3 | Evaluation des simulateurs existants selon les critères | 72 |
| 2.3.4 | L'intermodalité dans <i>MATSim</i> et <i>SUMO</i> | 75 |
| | Conclusion | 88 |
| | Partie II. Contributions | 91 |
| 3 | Modélisation de comportements de déplacement intermodal | 93 |
| | Introduction | 93 |
| 3.1 | Reconstruction des informations manquantes de l'EMD | 95 |
| 3.1.1 | Reconstitution des déplacements intermodaux | 95 |
| 3.1.2 | Génération des alternatives non prises en compte dans le choix de départ de l'individu dans l'EMD | 98 |
| 3.1.3 | Calcul du coût du transport | 102 |
| 3.1.4 | Reconstruction des coordonnées O/D des déplacements | 103 |
| 3.1.5 | Reconstruction des communes origine/destination | 106 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2 | Modèles de choix discret avec l'alternative intermodale VP+TP | 108 |
| 3.2.1 | Structures des modèles proposés | 108 |
| 3.2.2 | Fonctions d'utilité | 115 |
| 3.3 | Intégration du comportement intermodal | 119 |
| 3.3.1 | Création d'une alternative intermodale (VP+TP) | 120 |
| 3.3.2 | Contraintes d'utilisation de l'alternative intermodale VP+TP | 121 |
| 3.3.3 | Module de recherche du parkings relais (P+R) | 122 |
| 3.3.4 | Routage l'alternative intermodale VP+TP | 123 |
| 3.4 | Discussion | 124 |
| 3.4.1 | Modèles de choix discrets <i>vs</i> méthodes d'apprentissage supervisé | 124 |
| 3.4.2 | De la reconstruction des origines/destinations des déplacements | 131 |
| 3.4.3 | La fonction d'utilité de l'alternative intermodale VP+TP | 132 |
| | Conclusion | 132 |
| 4 | Résultats d'expérimentations : cas de la MEL | 135 |
| | Introduction | 135 |
| 4.1 | Présentation de la MEL | 136 |
| 4.1.1 | Caractéristiques socio-démographiques de la MEL | 136 |
| 4.1.2 | La mobilité dans la MEL | 138 |
| 4.2 | Valeurs des paramètres des modèles de choix discret | 142 |
| 4.2.1 | Configurations de base pour l'estimation des modèles | 142 |
| 4.2.2 | Evaluation des modèles estimés | 143 |
| 4.3 | Mise en place de la simulation | 146 |
| 4.3.1 | Génération de la demande de déplacements et de l'offre de transport | 147 |
| 4.3.2 | Description du pipeline utilisé | 150 |
| 4.3.3 | Principales adaptations du pipeline | 152 |
| 4.3.4 | Résultats de l'offre et de la demande de transport générées | 152 |
| 4.3.5 | Paramètres de configuration de la simulation | 156 |
| 4.3.6 | Processus de calibration de la simulation | 157 |
| 4.4 | Evaluation des parkings relais (P+R) | 162 |
| 4.4.1 | Configuration de la simulation | 162 |
| 4.4.2 | Résultats | 163 |
| 4.5 | Expérimentation du péage urbain | 167 |
| 4.5.1 | Configuration de la simulation | 168 |
| 4.5.2 | Résultats | 169 |
| 4.5.3 | Discussion | 176 |
| | Conclusion | 177 |

| | |
|--|----------------|
| Conclusion générale et perspectives | 179 |
| Bilan | 179 |
| Perspectives | 182 |
| Les données sur la pratique intermodale | 182 |
| Routage intermodal | 182 |
| Généralisation de la combinaison intermodale | 184 |
| Mise à l'échelle | 184 |
| Publications et communications | 188 |
| Publications | 188 |
| Bibliographie | 189 |
| A Plan de recherche | 203 |
| A.1 Matrices des mots-clés | 203 |
| A.2 Le Qui et le Comment? | 203 |
| B Détails des résultats sur la comparaison de simulateurs | 207 |
| B.1 Résultats comparatifs par catégorie de critères d'évaluation | 207 |
| B.2 Qualité de visualisation des simulateurs | 207 |
| C Modèles de choix discrets | 215 |
| <i>SI-MNL</i> (modèle 1) | 215 |
| ASC | 215 |
| Paramètres à estimer | 215 |
| Fonctions d'utilité | 216 |
| Définition du modèle | 217 |
| <i>SI-NL</i> (modèle 2) | 217 |
| ASC | 217 |
| Paramètres à estimer | 217 |
| Fonctions d'utilité | 218 |
| Définition du modèle | 219 |
| D Analyse des données de mobilité | 221 |
| D.1 Mobilité dans la MEL | 221 |
| D.1.1 Nombre de déplacements par mode principal de transport | 221 |
| Distribution des déplacements en fonction du motif | 223 |
| D.2 Pratiques intermodales dans la MEL | 224 |
| Table des matières | 229 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|--|-----|
| 1 | Proposition de thème de recherche. | 6 |
| 1.1 | Etude comparative des méthodes d'enquêtes de préférences révélées (<i>RP</i>) et déclarées (<i>SP</i>) basée sur les travaux de Wardman [151]. | 22 |
| 1.2 | Etude comparative des modèles de simulation des systèmes de transport. | 36 |
| 1.3 | Principales sources de données sur la demande et l'offre de transport en France. | 39 |
| 2.1 | Les caractéristiques des types d'agents selon Russell et Norvig [132]. | 46 |
| 2.2 | Présentation de quelques modèles à base d'agents du transport. | 52 |
| 2.3 | Récapitulatif des fonctionnalités de modélisation des trois principaux logiciels d'estimation de modèles de choix discret [90]. | 66 |
| 2.4 | Attribution de coefficients aux catégories de critères en fonction de nos priorités et besoins. | 74 |
| 2.5 | Comparaison des simulateurs selon des critères choisis (première étape). | 74 |
| 2.6 | Principales caractéristiques de l'agent, du réseau, du choix modal et routage intermodal dans <i>SUMO</i> et <i>MATSim</i> | 85 |
| 3.1 | Hiérarchisation des modes de transport (Cerema [1]). | 96 |
| 3.2 | Extrait du calcul des temps et distances de parcours des modes de transport avec l'API Google Directions pour 10 déplacements issus de l'EMD. | 101 |
| 3.3 | Valeurs urbaines du temps, tous modes (en €/h en 2010 en France) [102]. | 103 |
| 3.4 | Récapitulatif des différents modèles de choix discret proposés. | 115 |
| 3.5 | Résultats des méthodes d'apprentissage utilisées pour prédire le choix modal de transport. | 127 |

| | | |
|-----|---|-----|
| 3.6 | Résultats des méthodes d'apprentissage utilisées pour prédire le choix modal de transport après le <i>resampling</i> des données. . . . | 129 |
| 4.1 | Statistiques générales des modèles <i>SI-MNL</i> et <i>SI-NL</i> (selon le logiciel <i>PandasBiogeme</i>). | 144 |
| 4.2 | Valeurs des paramètres des modèles <i>SI-MNL</i> et <i>SI-NL</i> (selon le logiciel <i>PandasBiogeme</i>). | 145 |
| 4.3 | Caractéristiques (attributs, états et intentions) de l'agent dans la population synthétique. | 148 |
| 4.4 | Principales adaptations du synthétiseur original pour le périmètre de la MEL. | 153 |
| 4.5 | Nombre d'entrées cumulées des 12 parkings relais (P+R) de la MEL entre 5h30 et 09h00 du matin. | 164 |
| A.1 | Matrice des mots-clés (niveau 1). | 204 |
| A.2 | Matrice des mots-clés (focus sur mots-clés pertinents). | 204 |
| A.3 | Matrice des mots-clés (niveau 2 mots-clés pertinents). | 205 |
| A.4 | Le Qui? | 205 |
| A.5 | Le Comment? | 206 |
| B.1 | Évaluation des simulateurs en fonction de la nature du logiciel (Cat. 1). | 208 |
| B.2 | Évaluation des simulateurs en fonction des possibilités de création du réseau et de la demande de transport (Cat. 2). | 209 |
| B.3 | Évaluation des simulateurs selon la qualité de visualisation de la simulation (Cat. 3). | 210 |
| B.4 | Évaluation des simulateurs selon la qualité de la documentation et de l'IHM (Cat. 4). | 211 |
| B.5 | Évaluation des simulateurs selon nos propres spécifications (Cat. 5). | 212 |

Table des figures

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Approche méthodologique pour la simulation des politiques d'intermodalité | 9 |
| 2.1 | Représentation schématisée simplifiée d'interactions entre agent et environnement (inspirée du livre de Treuil et al [145]) et entre agents. | 45 |
| 2.2 | Exemple de chaîne d'activités. L'individu quitte le domicile à 08h00 en voiture pour aller au travail (09h00-12h00). Ensuite, il marche pour aller se restaurer entre 12h15-13h45. Il revient par la suite au travail à pied à 14h00. Il quitte le travail à 18h00 pour faire ses courses entre 18h20-19h00. Il rejoint son domicile à 19h30. | 56 |
| 2.3 | Approche de simulation multi-agent de génération et d'affectation de la demande de transport (réf. [8]). | 57 |
| 2.4 | Flux d'entrée/sortie des données de modèle multi-agent de la simulation de systèmes de transport. | 58 |
| 2.5 | Modèle de choix modal pour la prise en compte des déplacements intermodaux (réf. [87]). | 63 |
| 2.6 | Processus général de création de scénarios de transport à partir des données <i>OSM</i> et mobilité dans <i>SUMO</i> | 76 |
| 2.7 | Processus général de création de scénarios de transport à partir des données <i>OSM</i> et mobilité dans <i>MATSim</i> | 77 |
| 2.8 | Rendu visuel d'un tronçon du réseau routier autour de la gare Lille Flandres de la MEL dans <i>SUMO</i> extrait de <i>OpenStreetMap</i> . On peut distinguer les voies dédiées aux différents modes de transport (en noir pour les autos, en gris avec les flèches pour les bus et les rails pour le métro et le train), les arrêts de bus (en vert) et les véhicules sur le réseau (voiture, camion, bus, métro, train en gare). | 79 |

| | | |
|------|---|-----|
| 2.9 | Rendu visuel du réseau routier global de la MEL dans <i>MATSim</i> extrait de <i>OpenStreetMap</i> . Les points bleus correspondent aux stations de transports publics extraites des données <i>GTFS</i> | 81 |
| 2.10 | Boucle générale de simulation de <i>MATSim</i> (réf. [75]). | 82 |
| 2.11 | Représentation schématique de processus de couplage de modèle de choix discret et <i>MATSim</i> dans <i>eqasim</i> inspirée de [75], [73] et [70]. | 89 |
| 3.1 | Cadre méthodologique pour l'intégration de comportement de mobilité intermodale dans une demande de transport à base d'agents | 94 |
| 3.2 | Processus de reconstruction de couples de points O/D des déplacements à partir de leurs secteurs de tirage. | 104 |
| 3.3 | Ecart entre les distances réelles et celles obtenues des coordonnées reconstruites. | 105 |
| 3.4 | Superposition des formes géographiques des secteurs de tirage (b) sur les limites administratives des communes (a) de la MEL. . . | 107 |
| 3.5 | Modèle 1 considérant l'indépendance entre les alternatives de transport. | 109 |
| 3.6 | Modèle 2 inspiré des travaux de [87] en considérant les TP comme un nid. | 110 |
| 3.7 | Modèle 3 : <i>Nested logit</i> avec un nid « alternatives à la voiture ». | 112 |
| 3.8 | Modèle 4 : <i>Cross nested logit</i> avec deux nids « alternatives à la voiture » et « modes individuels » | 114 |
| 3.9 | Relation entre l'individu, les chaînes activités, les déplacements, le mode de transport et les facteurs explicatifs du choix modal. | 116 |
| 3.10 | Illustration de notre approche pour réaliser un déplacement intermodal combinant voiture et transports publics dans <i>eqasim</i> . La ligne rouge correspond au mode <i>car_pt</i> pour l'aller et celle en bleue pour le mode <i>pt_car</i> pour le retour. | 120 |
| 3.11 | Exemple de choix de P+R et de calcul d'itinéraire pour un déplacement effectué en combinant la voiture personnelle et les TP via le P+R. | 123 |
| 3.12 | Distribution des parts modales dans les bases d'apprentissage et de test. | 126 |
| 4.1 | Répartition spatiale de la population (à gauche) et possession de voiture par ménage (à droite) dans les communes de la MEL. . . | 137 |
| 4.2 | Distribution des principales caractéristiques socio-démographiques de la population de la MEL en 2017 (source : INSEE ¹). | 137 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.3 | Distribution des parts modales avec les alternatives intermodales dans la MEL selon l'EMD 2016 (en bleu) et les combinaisons modales dans la ville de Berlin selon l'étude [113] (en orange). | 139 |
| 4.4 | Emplacements des gares (symbole train en bleu), parkings relais (symbole parking en bleu) et abris vélos (symbole vélo en rouge), des stations de métro (point de localisation avec symbole métro en rouge) nombre d'arrêts de bus (nombre dans les cercles rouges) dans la MEL. | 141 |
| 4.5 | Exemple de plans quotidiens de trois profils d'agents issus de la population synthétique. | 149 |
| 4.6 | Comparaison des attributs au niveau de la personne entre la population synthétique et les données de référence pour un taux d'échantillonnage de 20%. | 154 |
| 4.7 | Comparaison des attributs au niveau du ménage entre la population synthétique et les données de référence pour un taux d'échantillonnage de 20%. | 155 |
| 4.8 | Comparaison des chaînes d'activités entre la population synthétique et les données de référence (EMD) pour les personnes actives (entre 15 et 64 ans). | 156 |
| 4.9 | Visualisation du réseau multimodal et des lieux d'activité. | 156 |
| 4.10 | Trafic automobile à partir de 8h30 du matin. Les véhicules en vert circulent à vitesse normale, tandis que ceux en rouge sont en état de congestion. | 158 |
| 4.11 | Quelques résultats de la phase de calibration pour différentes valeurs de β_{ASC,car_pt} | 159 |
| 4.12 | Distribution des distances parcourues en simulation (avec (orange) ou sans (rouge) l'alternative intermodale VP+TP) et dans l'EMD (ligne pointillée) en tenant compte de tous les modes de transport et de la voiture personnelle uniquement. | 160 |
| 4.13 | Distribution des durées des déplacements en simulation (avec (orange) ou sans (rouge) l'alternative intermodale VP+TP) et dans l'EMD (ligne pointillée) en tenant compte de tous les modes de transport et de la voiture personnelle uniquement. | 161 |
| 4.14 | Fréquence d'utilisation (nombre d'entrées) journalière des P+R situés à Lille. | 163 |
| 4.15 | Localisation des agents issus de la demande de transport et des douze parkings relais pour la MEL. | 166 |
| 4.16 | Quelques caractéristiques socio-démographiques (représentées en abscisses) des utilisateurs de l'alternative intermodale VP+TP. Les distributions, en pourcentage (%), sont représentées en ordonnées. | 167 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.17 | Zone d'application (hachurée en trait noir) du péage urbain dans la ville de Lille de la MEL. | 168 |
| 4.18 | Parts modales sans l'alternative intermodale suite à l'application du péage urbain avec 5, 10 et 20 euros de taxe de péage. | 170 |
| 4.19 | Répartition modale avec l'alternative intermodale VP+TP suite à l'application du péage urbain avec 5, 10 et 20 euros de taxe de péage. | 171 |
| 4.20 | Parts modales sans l'alternative intermodale suite à l'application du péage urbain avec 5, 10 et 20 euros comme taxe dans la ville de Lille. | 172 |
| 4.21 | Répartition modale avec l'alternative intermodale VP+TP suite à l'application du péage urbain avec 5, 10 et 20 euros comme taxe dans la ville de Lille. | 173 |
| 4.22 | Flux des voitures au niveau des parkings relais situés à l'entrée de Lille avant et après l'application du péage urbain. | 174 |
| 4.23 | Les temps de parcours avec tous les modes de transport et en voiture uniquement avec ou sans péage urbain et l'alternative intermodale. | 175 |
| 4.24 | Condition d'utilisation de parking relais (P+R) en fonction de la disponibilité de places de stationnement. | 183 |
| 4.25 | Quelques résultats de la phase de calibration pour différentes valeurs des paramètres du choix modal. | 185 |
| 4.26 | Quelques résultats suite à l'application du péage urbain sur le périmètre de Lille. | 186 |
| B.1 | Qualité de visualisations des simulateurs. | 213 |
| D.1 | Distribution des déplacements selon le mode principal de transport. | 222 |
| D.2 | Distribution des déplacements selon le motif et le mode principal de transport utilisé. | 223 |
| D.3 | Situation des comportements de déplacements intermodaux dans la MEL. | 225 |

Glossaire

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

API : Application Programming Interface

AQST : Autorité de la qualité de service dans les transports

BD TOPO : Base de données topographiques

BPE : Base permanente des équipements

CDM : Choix discret modal

CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CSP : Catégorie socio-professionnelle

EDGT : Enquêtes déplacements grands territoires

EDVM : Enquêtes déplacements villes moyennes

EMD : Enquêtes ménages déplacements

ENTD : Enquête Nationale Transports et Déplacements

FCD : Floating Car Data

FMD : Floating Mobile Data

GAMA : GIS Agent-based Modeling Architecture

GPS : Global Positioning System

GTFS : General Transit Feed Specification

HIPF : Hierarchical Iterative Proportional Fitting

IGN : Institut national de l'information géographique et forestière

INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques

IPF : Iterative Proportional Fitting

MATSim : Multi-agent transport simulation tool kit

O/D : Origine/Destination

P+R : Parking relais

PTV Vissim : Planung Transport Verkehr AG Verkehr In Städten - SIMulationsmodell

RAPTOR : Round-bAsed Public Transit Optimized Router

SUMO : Simulation of Urban Mobility

TP : Transports publics

UTCF : Utilisation des terres, leurs changements et la forêt

VLS : Vélos en libre-service

Introduction générale

Ce chapitre introduit les éléments nécessaires à la compréhension du sujet d'étude notamment le contexte, la problématique, le travail à réaliser. Il présentera également le plan de recherche, la formulation des hypothèses et une brève description de l'approche méthodologique.

Contexte de l'étude

Aujourd'hui, le transport occupe une place capitale dans les besoins vitaux des populations au même titre que l'eau, la santé et l'éducation. En effet, la réalisation de nos activités quotidiennes (p. ex., travail, école, courses au supermarché) nécessite le plus souvent de se déplacer. Les systèmes de transport génèrent d'énormes externalités négatives avec des conséquences importantes sur l'environnement et la santé des individus. L'utilisation des voitures personnelles (individuelles) est à l'origine de ces externalités négatives : énergie (non renouvelable), santé et sécurité des personnes, bruit, pollution environnementale, manque de stationnement. Selon l'Agence Française de la transition écologique (ADEME), le secteur des transports représentait 33% de la consommation finale d'énergie avec plus de 61% pour les voitures individuelles en France en 2015 et est le principal émetteur de CO₂, avec 39% des émissions totales de Gaz à effet de serre (hors UTCF)². Cette situation s'explique principalement par la forte utilisation de la voiture personnelle même pour les déplacements de courtes distances. En effet, selon le dernier recensement de la population en France, réalisée en 2017, 74% des actifs utilisent leur voiture pour se rendre au

2. <https://www.ademe.fr/expertises/mobilite-transport/chiffres-cles-observations/chiffres-cles>

travail contre seulement 16% en transports publics (TP) et 6% pour les modes de transport doux (marche (4%) et vélo (2%))³.

Face aux questions du réchauffement climatique et de la vie chère, les acteurs politiques se penchent de plus en plus sur les systèmes de transport collectif afin de proposer des solutions à la fois économiques (pour l'utilisateur) et écologiques. Ces solutions devront permettre de répondre en plus des problèmes environnementaux et économiques, à ceux relatifs à l'arrivée de nouveaux types de véhicules intelligents et certaines exigences comme la sécurité des individus.

Des réformes visent à réduire l'usage de la voiture personnelle en faveur des transports doux (vélo, marche) et des transports publics (TP). Elles consistent généralement à appliquer des péages routiers ([147, 26, 34]), à déployer des Zones à faibles émissions (ZFE), à ajuster la tarification des transports publics et/ou routiers ([32, 142, 84]), à accélérer la transition énergétique (p. ex., le développement des véhicules électriques, à aménager des infrastructures de transports et urbaines (p. ex., les parkings relais, les pôles d'échanges multimodaux).

En France par exemple, de telles réformes s'inscrivent dans la politique d'orientation de la mobilité⁴. Lors des assises françaises de la mobilité de 2017⁵, les défis à relever par les Autorités Organisatrices de Transport (AOT) et les Autorités Organisatrices de la Mobilité (AOM) se présentaient comme suit :

- réduire la fracture qui existe entre zones urbaines et péri-urbaines sur les offres de mobilité ;
- réduire l'empreinte environnementale des transports ;
- créer des synergies entre fret et transport de personnes ;
- préparer l'arrivée des véhicules communicants et autonomes (CAVs).

En ce qui concerne le premier point, le mouvement des Gilets jaunes a mis notamment en exergue l'insuffisance des offres de déplacements dans les zones périphériques et peu denses où la voiture personnelle reste le principal mode de transport [40]. Cette même étude préconise la mise en place d'une politique de

3. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5013868>

4. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039666574/>

5. <https://www.gouvernement.fr/conseil-des-ministres/2017-12-20/les-assises-de-la-mobilite>

mobilité intégrée et intermodale entre transports publics et voiture personnelle. Elle suggère également de mettre l'accent sur les gares pour leur permettre de jouer leur rôle dans le développement des nouvelles offres de mobilité et du changement de comportement de déplacement.

Ces mesures incitatives permettront de faire évoluer les comportements de déplacements des individus vers des modes ou des services de transport plus respectueux de l'environnement (p. ex., marche, transport public, vélo et combinaison de plusieurs modes de transport). Ce phénomène de réadaptation affecte la mobilité et conduit à un nouvel équilibre des flux de transport.

Dans ce contexte de chamboulement des modes de transports, l'intermodalité⁶, définie comme la combinaison de plusieurs modes de transport au cours d'un même déplacement [81], est de plus en plus développée. Elle vise à réduire l'utilisation des voitures privées et par ricochet réduire les problèmes de mobilité comme les congestions, le manque de stationnement et les émissions de gaz [41]. En outre, grâce au développement croissant des nouvelles offres de mobilité (p. ex., autopartage, vélo et trottinette en libre-service) avec les possibilités offertes par les nouvelles technologies de l'information (TIC), les individus peuvent mieux planifier leurs déplacements en utilisant différents moyens de transport. Parmi les formes de déplacement intermodal, la combinaison des transports publics avec la voiture personnelle (TP+VP) est particulièrement emblématique [113]. Cette combinaison est majoritairement composée d'individus rejoignant les services de transport public d'agglomération, depuis leurs habitations en retrait du réseau. Cette utilisation se fait généralement par le biais des parkings relais, placer aux entrées des transports publics (p. ex., train, métro).

Pour faire face à cette évolution et anticiper sur les différents changements, les acteurs de la mobilité et des transports doivent disposer des outils adéquats pour expérimenter et évaluer leurs réformes. Les principales méthodes d'évaluation sont les études empiriques (qualitatives et/ou quantitatives) à travers la réalisation d'enquêtes et les outils de modélisation et de simulation. Les études empiriques permettent d'informer sur la pratique de déplacements des individus durant une période déterminée.

6. La multimodalité est la disponibilité de différents modes (moyens) de transport pour une période de temps déterminé.

La modélisation et la simulation informatique sont de véritables **outils d'aide à la décision** permettant notamment de tester et d'évaluer différents scénarios de mobilité sans avoir à les réaliser concrètement. Elles peuvent aider à évaluer l'efficacité de politique d'intermodalité i) dans la réduction des externalités négatives des systèmes de transport notamment la congestion et le manque le stationnement et ii) dans l'optimisation des déplacements des individus face à l'existence d'une offre de transport multimodal. Cependant, les comportements de déplacement intermodal sont encore peu pris en charge en simulation.

Dans les modèles traditionnels dits à quatre étapes (génération, distribution, choix modal et affectation) [100], les flux des déplacements sont représentés sous forme de matrices origine/destination (O/D) pour chaque mode de transport. Par conséquent, ces modèles sont peu adaptés pour faire face aux nouvelles possibilités et offres de mobilité comme l'autopartage, le vélo en libre-service et l'intermodalité. En outre, ces modèles demeurent peu efficaces pour modéliser les comportements individualisés et émergents au regard de leur approche agrégée. La modélisation à base d'agents semble donc mieux indiquée pour modéliser les comportements, les interactions et les décisions des individus lors de leurs déplacements [97]. Cette approche est également adaptée pour tenir compte à la fois des spécificités des différents modes (p. ex., voiture, vélo, bus, marche à pied) et services (p. ex., autopartage, vélo en libre service) de transport et des caractéristiques l'infrastructure routière (p. ex., types de voies, les stations de transports publics, les parkings relais).

De nos jours, il existe de nombreuses plateformes de simulation à base d'agent pour le transport comme *SUMO* [95], *MATSim* [75] et *ARCHISM* [52]. Cependant, à notre connaissance, aucun de ces outils ne permet actuellement de simuler les comportements de déplacement intermodal de façon précise et détaillée. L'objectif de cette thèse est de fournir ce cadre de simulation.

Objectifs applicatifs et résultats attendus

Face aux problèmes des systèmes de transport, de nombreuses questions se posent :

- Comment évaluer les politiques d’intermodalité existantes : développement des pôles d’échanges intermodaux (p. ex., parkings relais (P+R), gares), gratuité des transports publics (TP)?
- Comment tester (débattre) de nouvelles politiques d’intermodalité visant à réduire davantage l’usage de la voiture personnelle. Par exemple :
 - Quel est le nombre de parkings relais (emplacement et capacité) nécessaire pour garantir une intermodalité fluide?
 - Quel peut être l’impact ou l’effet des péages urbains sur l’utilisation de la voiture individuelle?
 - Quel système de tarification adopter pour encourager l’utilisation des transports publics?

Ce sont là deux des questions que nous nous donnons comme objectifs d’y apporter des éléments de réponse en utilisant la **simulation multi-agent**.

Plusieurs thèmes sont associés à ces questions (voir Tableau 1). Ces thèmes ont été obtenus suite à l’analyse des **matrices des mots clé** soulevés par notre étude. Les matrices sont présentées dans l’Annexe A.1 respectivement dans les tableaux A.1, A.2 et A.3.

Comme on peut le voir, les quatre thèmes sont liés. De plus, le **thème 3** se présente comme le point d’entrée pour permettre de réaliser les autres. Le but étant de reproduire dans un premier temps les comportements de déplacements (avec les alternatives intermodales) effectués des individus de la zone d’étude en fonction des origines/destinations, du motif de déplacement et des modes de transport utilisés. Une fois ce modèle de simulation de référence mis en place, il sera possible de réaliser différents types de scénarios de mobilité relatifs aux autres thèmes. Dans le cadre de cette thèse, nous avons circonscrit notre travail sur la réalisation des thèmes 3 et 4.

Hypothèses

Nous posons ici quelques hypothèses de base de notre travail que nous allons chercher à prouver ou rejeter grâce à la simulation multi-agent.

TABLEAU 1 – Proposition de thème de recherche.

Thème 1 - Impact environnemental : Les enjeux environnementaux (les offres d'intermodalité existantes contribuent-elles réellement dans la réduction de la pollution causée principalement par les voitures individuelles?). Voir thème 4 pour une évaluation des effets de l'intermodalité sur l'environnement.

Thème 2 - Politiques d'intermodalité : Politique d'intermodalité urbaine et péri-urbaine (panorama des offres d'intermodalité existantes et les politiques d'accompagnement comme les mesures socio-économiques : gratuité des TP et péage interurbain, innovations des modes de déplacement (navettes autonomes, parking relais), analyse de l'offre par rapport à la demande : mobilité professionnelle et scolaire, contraintes économiques et sociales des mesures. Il s'agit d'identifier les grandes décisions politiques prises ou les études menées pour l'amélioration des services/offres de mobilité afin de permettre leurs combinaisons. L'évaluation de ces décisions/études sera faite au thème 4.

Thème 3 - Situation de référence : Modélisation et simulation des déplacements actuels (implémentation du réseau, génération de la demande à partir des enquêtes de déplacements, élaboration du modèle de trafic des voitures, élaboration du modèle de trafic des transports publics (lignes, horaires, parc) : Faire une simulation qui reflète la photographie des déplacements des populations selon les enquêtes de déplacements.

Thème 4 - Evaluation politiques de mobilité : Modélisation et simulation de politiques d'intermodalité : Evaluation et proposition de réformes de politiques d'intermodalité urbaine et péri-urbaine (Cas de Dunkerque par exemple pour l'évaluation de la gratuité des TP sur le report modal) : A partir du modèle/simulation statique du thème 3, nous allons proposer un modèle de simulation dynamique permettant d'évaluer certaines décisions politiques.

- Hypothèse 1 : la modélisation et la simulation multi-agents des systèmes de transport est un outil efficace pour aider les décideurs dans la planification et la mise en œuvre des politiques de transport et de la mobilité.
- Hypothèse 2 : l'intermodalité est l'une des solutions pour la réduction de l'utilisation des voitures personnelles.
- Hypothèse 3 : les mesures touchant au budget des individus (p. ex., péage urbain, augmentation des frais de stationnement) sont plus impactantes pour réduire l'utilisation de la voiture personnelle.

Ces hypothèses soulèvent un certain nombre de problématiques scientifiques présentées dans la section suivante.

Problématiques scientifiques abordées

La réalisation d'une simulation multi-agent de manière générale et de l'intermodalité en particulier nécessite quelques défis à relever. Sans être exhaustifs, nous présentons ici les principales problématiques :

- Modélisation des comportements de déplacements individualisés : l'individu est l'échelle de modélisation des modèles à base d'agent. Le modèle résultant doit donc se rapprocher au mieux des comportements observés. Pour ce faire, la complexité des modèles à base d'agent est souvent très élevée rendant leurs implémentations (simulation) difficiles voir impossibles (beaucoup de données et des temps de calcul très importants). Il peut donc être nécessaire de faire un compromis entre la finesse et l'efficacité du modèle.
- Plateforme de simulation : le simulateur est le moyen qui permet de tester le modèle et de pouvoir réaliser différents scénarios. Bien qu'il existe des outils de simulation permettant la multimodalité, aucun ne permet leur combinaison au cours d'un même déplacement de façon précise et organisée. Le choix des modes combinés, leurs utilisations et le calcul d'itinéraires en passant notamment par des points déterminés sont autant d'éléments à prendre en compte dans le simulateur.

- Calibration : l’ajustement du modèle multi-agent par rapport à une situation de référence est réputé très difficile et chronophage. Il convient donc de mettre en place des paramètres de calibration pour faciliter cette tâche. Ces paramètres peuvent être appliqués par exemple au réseau de transport pour régler le flux ou encore au choix modal pour garantir une bonne distribution des modes de transport utilisés.
- Génération de la demande de transport : il n’existe pas de données standard ou d’algorithmes de génération de la demande de transport à base d’agent. Tout dépend de la nature des données disponibles de la zone d’étude. Ainsi, le développement d’un synthétiseur ou la réadaptation d’un algorithme existant peut être nécessaire pour générer une demande de transport multi-agent.
- Sources de données d’entrée : pour construire un modèle et donc de réaliser des simulations, il est indispensable de disposer de données appropriées. Pour notre cas d’étude qui consiste à simuler les comportements de déplacement intermodal des individus, il n’existe pas de sources de données spécifiques. Il faut donc exploiter diverses bases de données portant sur les comportements de déplacement en général afin d’en extraire les informations d’intermodalité.

La section suivante présente sommairement notre approche méthodologique pour adresser tous ces problèmes.

Approche méthodologique

La Figure 1 donne un aperçu de notre démarche scientifique. La **demande de transport** concerne tous les besoins de déplacements de la population d’étude. Les données nécessaires pour l’estimation de la demande de transport proviennent généralement des enquêtes de déplacements. L’**offre de transport** est composée du réseau multimodal et des services de mobilité (p. ex., TP, P+R, co-voiturage et vélo en libre partage). Le réseau de transport peut être modélisé à partir des données géographiques (p. ex., *OpenStreetMap*). Les données sur les services de transport publics sont disponibles auprès des structures organisa-

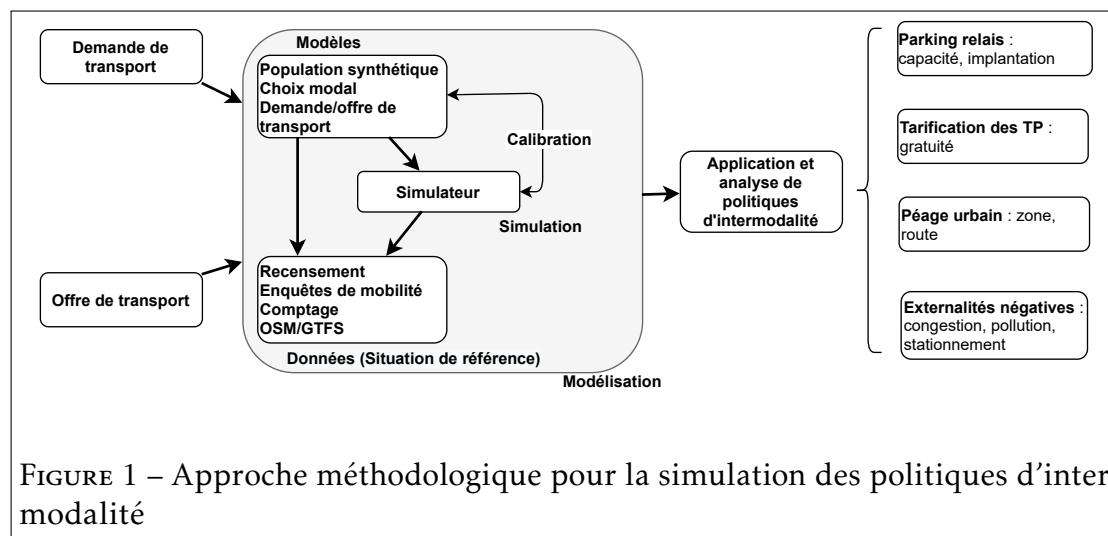


FIGURE 1 – Approche méthodologique pour la simulation des politiques d’inter-modalité

trices sous format *GTFS*. Un scénario de simulation est la combinaison de la demande et de l’offre de transport.

La réalisation d’une simulation multi-agent de transport nécessite l’estimation de plusieurs modèles. Le premier est relatif à la génération d’une **population synthétique** d’agents qui contient les différents profils d’utilisateurs de la population d’étude. Notre cas d’étude étant lié au choix modal, il est nécessaire de définir un modèle spécifique de **choix discret de mode** de transport pour bien retranscrire ce comportement de mobilité des individus. La demande de transport est générée à partir des matrices O/D et la population synthétique.

Une fois les différents modèles mis en place, il faut effectuer des simulations pour mesurer les écarts par rapport à la situation de référence. Cette étape peut nécessiter le développement ou l’extension d’un **logiciel de simulation** pour réaliser ces expérimentations. Une phase de **calibration** sera nécessaire pour avoir un modèle fidèle aux **données réelles** (situation de référence).

A partir du modèle de simulation calibré, plusieurs cas d’études de mobilité peuvent être réalisés pour **évaluer et analyser** les politiques d’intermodalité comme le développement des parkings relais, la gratuité des TP ou encore la mise en place des péages urbains. Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié le cas de l’impact des parkings relais et du péage urbain sur le comportement de déplacements des individus.

Les différentes parties de l'approche seront développées dans les chapitres suivants. La section suivante résume les principales contributions scientifiques de la présente thèse.

Contributions

Nos principales contributions peuvent se résumer comme suit :

- Proposition d'une nouvelle approche pour comparer rapidement les outils de simulations en se basant sur les besoins du modélisateur. Cette approche se décompose en deux étapes : i) Une comparaison via un système de notation des simulateurs en se basant sur des critères de sélection, ii) Une étude plus approfondie des simulateurs ayant obtenu une certaine note définie par le modélisateur.
- Estimation de modèle de choix discret de mode de transport avec une alternative intermodale. La modélisation spécifique du choix modal à travers les modèles de choix discret, a permis de mieux saisir les éléments (variables) caractérisant ce choix aussi bien chez l'individu que pour le mode de transport.
- Intégration du modèle de choix discret avec l'alternative intermodale dans *MATSim*. Nous avons complété un premier travail d'intégration existant en y ajoutant les comportements de déplacements intermodaux.
- Réalisation d'un cadre de simulation permettant l'évaluation de politiques d'intermodalité combinant la voiture personnelle et les transports publics. Nous avons pu ainsi analyser l'usage des parkings relais dans les déplacements journaliers (Thème 4 de recherche). Nous avons également étudié l'impact du péage urbain sur cette combinaison intermodale (Thème 4 de recherche).

Organisation du manuscrit

Le manuscrit est organisé en trois parties elles-mêmes décomposées en chapitres. Une première partie sur la revue de littérature sur les politiques d'in-

termodalité et la modélisation et simulation des systèmes de transport sous le prisme de l'intermodalité. Une deuxième partie qui détaillera les contributions et les résultats d'expérimentations. Enfin, une troisième partie relative aux annexes qui apportent des détails sur certains points de notre travail.

Partie I. Revue de littérature scientifique

Chapitre 1. Politiques d'intermodalité et les méthodes d'évaluation

Ce premier chapitre consiste dans un premier temps à donner un aperçu des politiques d'intermodalité dans le monde en général et en France de manière plus spécifique. Il présente ensuite les différentes méthodes d'évaluation des politiques de mobilité avec un focus sur l'intermodalité. Enfin, le chapitre montre que la simulation est l'une des solutions les plus adaptées pour évaluer les politiques d'intermodalité existantes et débattre sur de nouvelles mesures. Le chapitre suivant portera plus en détails sur la simulation multi-agent des déplacements.

Chapitre 2. Simulation multi-agent de transport

Ce chapitre présente d'abord les notions de base du paradigme agent et multi-agent. Ensuite, il référence quelques travaux basés sur cette approche pour la simulation de comportements de déplacements, et en particulier de l'intermodalité. Il décrit par la suite les étapes et les différentes sources de données utilisées pour la mise en place d'une simulation multi-agent de transport. Enfin, il résume notre étude comparative des récentes plateformes de simulation multi-agent pour simuler les comportements d'intermodalité. Bien qu'aucun simulateur ne répond exactement à notre besoin, cette étude nous a permis de choisir le simulateur à base d'agents et d'activités *MATSim* comme base pour développer notre outil de simulation de déplacements intermodaux.

Partie II. Contributions

Chapitre 3. Modélisation de comportements de déplacement intermodal

Dans le chapitre 3, nous décrivons notre approche méthodologique utilisée pour intégrer les comportements de déplacements intermodaux dans l'outil de simulation *MATSim*. Nous présentons d'abord notre approche utilisée pour la reconstruction de certaines informations manquantes nécessaires à la mise en place de nos modèles. Ensuite, nous montrons la manière d'estimer notre modèle de choix discret de mode de transport avec l'alternative intermodale combinant voiture personnelle (VP) et transports publics (TP) ($VP + TP$). Enfin, nous intégrons ce modèle dans *MATSim* en proposant de nouveaux modes de transport et un module de routage pour ces types de déplacements.

Chapitre 4. Résultats d'expérimentations à hauteur de la Métropole Européenne de Lille

Le chapitre 4 décrit tout à d'abord la zone d'étude à savoir la Métropole Européenne de Lille (MEL) avec une analyse sur les comportements de déplacement intermodal de sa population. Il présente ensuite les résultats des différents modèles de choix discret avec notamment l'alternative intermodale. Enfin, le chapitre détaille les configurations de base pour la réalisation de nos expérimentations (simulations) et fournit les résultats des différents scénarios étudiés : i) reproduction de la situation de référence, ii) évaluation des parkings relais et iii) étude de l'impact du péage urbain sur la réduction de l'usage de la voiture personnelle au profil de leur combinaison avec les TP.

Partie II. Annexes

Annexe A. Matrices de mots clé

Cette Annexe présente les différentes matrices de mots clé et répond aux questions « Le qui » et « Le comment » lors de la réalisation du plan de recherche.

Annexe B. Résultats détaillés de l'étude comparative des outils de simulation multi-agent

L'annexe B. donne un aperçu détaillé de l'étude comparative des plateformes de simulation avec les différents tableaux intermédiaires et les captures d'écran issues des simulateurs.

Annexe C. Analyse statistique des comportements de déplacements intermodaux dans la MEL

Cette annexe regroupe les résultats statistiques sur comportements de déplacements modaux et intermodaux dans la MEL en se basant sur la dernière enquête de déplacement (EMD 2016).

Annexe D. Résultats détaillés des expérimentations

Cette annexe présente plus en détail les résultats de nos différents scénarios de simulations qui ont été présentés synthétiquement dans le Chapitre 4.

Partie I. Revue de
littérature scientifique

Politiques d'intermodalité et les outils d'évaluation

Introduction

L'intermodalité a été identifiée comme étant une des solutions aux problèmes liés à la mobilité et au transport tels que la pollution, l'absence de stationnement et les congestions dans les contextes (péri-) urbains [41]. De quoi s'agit-il réellement : est-ce que l'intermodalité est vraiment une solution efficace ? Sur quel plan et sous quelles conditions cette efficacité s'applique ? Voici autant de questions que nous abordons dans ce chapitre à travers une revue de la littérature sur l'intermodalité, les mesures visant à la favoriser et les outils d'évaluation de ces politiques.

Le chapitre est organisé comme suit. La section 1.1 présente les généralités sur les politiques d'intermodalité. Elle donne quelques définitions sur l'intermodalité et présente les politiques d'intermodalité existantes dans le monde, et en France particulièrement. La section 1.2 se focalise sur les outils d'évaluation fondés sur les études qualitatives et quantitatives à travers des enquêtes de déplacements. Cette section fait également un état des lieux des différentes sources de données disponibles en France sur la mobilité en général et l'intermodalité en particulier. La section 1.3 quant à elle, présente les méthodes d'évaluation des politiques de mobilité à partir de la modélisation et la simulation. Nous

montrons dans cette section les différentes approches de modélisation ainsi que les données d'entrée nécessaires à la réalisation d'une simulation de transport. La dernière section conclut le chapitre.

1.1 Généralités sur les politiques d'intermodalité

Cette section présente quelques politiques visant à promouvoir la pratique intermodale. Pour ce faire nous présentons en détails le concept d'intermodalité tout en pointant quelques bienfaits de cette pratique.

1.1.1 Définitions

Un système de transport est la « combinaison d'éléments et leurs interactions qui produisent la demande de déplacements dans une région donnée et l'offre de services de transport pour satisfaire cette demande » [30]. Cette définition permet de faire ressortir les deux principaux composants d'un système de transport à savoir la **demande de déplacement** et l'**offre de transport**. Le flux de demande de transport ou de déplacement peut être formellement défini comme le « nombre d'utilisateurs ayant des caractéristiques données consommant les services offerts par un système de transport dans une période de temps donnée » [30]. Quant à l'offre, elle comprend toutes les infrastructures routières et les services de transport de la zone d'étude. On note également la nécessité de circonscrire la **région d'étude** définissant l'extension spatiale du système en définissant des **zones de trafic**.

L'un des principaux objectifs des politiques de transport, est de fournir une offre capable d'absorber le flux de la demande de déplacement tout en étant accessible pour les populations et respectueuse de l'environnement. De nombreuses mesures sont prises comme l'augmentation du nombre de voies sur les routes, le développement des transports ferroviaires. Néanmoins, ces mesures n'arrivent pas toujours à contenir le flux de déplacement. Une des solutions qui est de plus en plus développée et encouragée est l'intermodalité.

Il n'y a pas de définition consensuelle de **l'intermodalité**. Tout dépend en effet du point de vue du domaine d'application. Par exemple, les acteurs du trans-

port ferroviaire ont tendance à classer l'intermodalité comme une fonction des wagons (voitures), alors que les entreprises de camionnage la décrivent en termes de remorques [81]. Selon W. Brad Jones et al., l'intermodalité est « l'expédition de fret et le déplacement de personnes impliquant plusieurs modes de transport au cours d'un même voyage » [81]. L'intermodalité est parfois confondue avec la notion de **multimodalité** qui consiste à fournir plusieurs modes de transport différents entre deux lieux. La multimodalité vise à développer des chaînes de transport alternatives à l'utilisation des voitures individuelles. Elle permet donc de favoriser la pratique de l'intermodalité à travers la possibilité de combiner les différents modes de transport disponibles. En ce sens, l'intermodalité est vue comme un sous-ensemble de la multimodalité [109]. Dans le cadre de notre étude, nous nous intéressons plutôt à l'intermodalité (désigné par le **transport intermodal**) dans son aspect relatif au transport des personnes plutôt qu'aux marchandises.

De cette définition de W. Brad Jones et al., il ressort que l'intermodalité nécessite le **passage (changement)** d'un mode de transport à un autre au cours d'un même voyage. On peut se poser la question de savoir si l'utilisation ou la combinaison de plusieurs moyens de transports publics (p. ex., combiner le bus et le métro ou encore le métro et le train) est une pratique intermodale. Jarass et Oostendorp [79] répondent que le degré d'intermodalité dépend de la définition appliquée et des objectifs recherchés par le modélisateur. Pour les auteurs par exemple, lorsqu'on se focalise sur le **processus d'échange** entre un mode de transport et un autre, la pratique de l'intermodalité peut être plus ou moins difficile pour l'utilisateur. De ce fait, la combinaison de deux ou plusieurs modes de transport public est de l'intermodalité au regard de la chaîne d'actions que peut nécessiter le passage d'un mode à un autre (p. ex., temps de marche, recherche de correspondance et d'arrêt, délais d'attente) [113, 56, 112]. Ainsi, nous avons supposé que la combinaison de plusieurs moyens de transport public est un déplacement intermodal.

D'autre part, le cas de la **marche** comme mode de transport à part entière notamment comme composante d'une combinaison intermodale est litigieux. En effet, le passage de la marche à un mode de transport est moins pertinent par rapport aux autres modes comme souligné dans [113, 56] : il s'agit de marcher

« simplement » vers un mode de transport. Pour d'autres [112] la marche est un mode à part entière faisant partie d'un déplacement intermodal dès lors que la longueur (distance) ou la durée dépasse une certaine limite (p. ex., au moins cinq minutes).

1.1.2 Les bienfaits de la pratique intermodale

Les objectifs visés par l'intermodalité sont nobles et demeurent nécessaires dans nos sociétés : réduction de la pollution, limitation des congestions, résolution du problème de stationnement, diminution du nombre d'accidents de la route. La réalisation de ces objectifs passe nécessairement par la réduction accrue de l'utilisation des voitures individuelles. Aujourd'hui, l'intermodalité est de plus en plus développée dans les grandes villes afin d'atteindre ce résultat [41]. Mais est-ce que l'intermodalité est si efficace pour résoudre les problèmes des systèmes de transport ? Laura Gebhardt et al. ont analysé cette question sur deux angles : du point de vue du système de transport (macroscopique) et de l'individu (microscopique) [56].

Le système intermodal, sur le plan macroscopique, permettrait de contribuer à une vie plus saine et durable dans les villes en supposant que la combinaison des modes de transport réduira l'utilisation des voitures personnelles et par ricochet ses conséquences négatives [41]. Selon l'Union européenne, l'intermodalité est « un élément essentiel de la politique commune des transports pour une mobilité durable dans l'Union » [53].

Sur le plan individuel, l'intermodalité offrirait des possibilités intéressantes pour se déplacer efficacement dans les grands centres urbains. En effet, dans ces zones, les distances à parcourir sont relativement courtes et l'offre de transports publics bien développée ce qui permet leur combinaison avec des modes plus doux (p. ex., vélo, trottinette) [28]. En outre, avec le développement des nouveaux services de mobilité (p. ex., autopartage, les véhicules en libre-service), l'individu dispose davantage de possibilités pour se déplacer en combinant ces services avec les modes traditionnels comme la voiture et les transports publics (TP) [128].

Bien que définie comme la « clé » [56], la pratique de l'intermodalité peut être souvent contraignante ou gênante pour l'utilisateur à cause des temps d'attente et des

processus d'échange d'un mode à un autre. Il est donc nécessaire de compenser cet inconvénient par une réelle valeur ajoutée sur le plan de la performance de l'offre de transport afin d'inciter l'utilisateur à adopter des comportements de déplacement intermodal ou mieux coordonner les modes entre eux.

1.1.3 Politiques d'intermodalité

Pour inciter les individus à la pratique intermodale, il est nécessaire d'adopter un certain nombre de mesures visant à faciliter et à favoriser ce changement modal. Ces mesures visent généralement à :

- Réduire l'usage de la voiture (p. ex., réduction de la vitesse autorisée, circulation différenciée pendant les événements de fort déplacement, péages autoroutiers et urbains);
- Promouvoir les modes doux et les transports publics (p. ex., gratuité des transports, aménagement de voies dédiées : pistes cyclables et voies bus, augmentation de l'offre de transport public, financement d'acquisition de vélos, réduction des temps de correspondance, augmentation du confort dans les TP, aménagement des infrastructures de transports et urbaines comme les parkings relais et les pôles d'échanges multimodaux);
- Accélérer la transition énergétique (p. ex., le développement des véhicules électriques).

Parmi les exemples de péages routiers, on peut citer les cas d'application dans les villes de Londres (Royaume Uni) depuis le 18^e siècle [147] (premier cas d'application), de Bruxelles (Belgique) [26] et de San Francisco (Californie, Etats-Unis) [34].

Plusieurs études ont porté également sur l'ajustement de la tarification des transports publics (TP) et/ou routières [32, 142, 84]. Le cas le plus remarquable de mesures tarifaires des TP en France et en Europe est sans doute la gratuité des transports publics urbains (bus) de Dunkerque mise en oeuvre depuis le 1^{er} septembre 2018. Cette mesure aurait eu un impact sur les habitudes de déplacement des habitants de l'agglomération avec un report modal de la voiture vers les TP. En effet, parmi les nouveaux usagers des TP, 48% ont délaissé leur voiture au profit du bus [24].

Le rôle que jouent les parkings relais (P+R) dans les pratiques intermodales est également abordé dans de nombreux travaux de recherche [104, 138, 121, 115, 140]. Pour assurer une meilleure efficacité de ces types de parkings, il est important de tenir compte de quelques facteurs comme le coût de stationnement et la possibilité de recharge des véhicules électriques. Ainsi, il sera possible d'atteindre d'une part les objectifs de la transition énergétique et d'autre part une politique d'intermodalité efficace [104].

En France par exemple, de telles actions s'inscrivent dans la politique d'orientation de la mobilité¹. Cette Loi-cadre prévoit de renforcer les offres de déplacements en :

- rééquilibrant les parts modales des déplacements en augmentant celles des modes collectifs ou actifs (marche et vélo) au détriment des voitures personnelles ;
- renforçant l'utilisation partagée des modes de transport individuel (covoiturage, autopartage) ;
- favorisant la multimodalité et l'intermodalité.

Ces mesures incitatives doivent permettre de modifier les comportements de déplacement des usagers (par la combinaison de plusieurs modes de transport). Ce phénomène de réadaptation des usagers affecte la mobilité et conduit à un nouvel équilibre des flux de transport.

Les projets ou les mesures de transport nécessitent en général de nombreux investissements et d'importants moyens financiers. Il est donc important pour les décideurs de disposer de moyens ou d'outils appropriés permettant d'évaluer les avantages et les impacts globaux des politiques ou des projets de transport. Par exemple, dans le cas de l'instauration de la gratuité des TP [24], la décision doit être normalement motivée par une étude en démontrant l'intérêt. Mais, comment donc évaluer les impacts de telles mesures après leur application ? Est-ce que les objectifs recherchés ont été atteints ? Pour répondre à ces questions, des travaux de recherche doivent être menés en vue d'évaluer l'impact des politiques de mobilité.

1. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039666574/>

Les méthodes d'évaluation des politiques de mobilités consistent généralement à proposer :

- Une évaluation partielle à partir d'indicateurs de mobilité (p. ex., parts modales), de trafic (p. ex., congestion, temps de parcours) et d'environnement (p. ex., CO₂, polluants locaux) [89].
- Une évaluation socio-économique qui consiste principalement à faire une analyse coût-bénéfice (voir notamment le rapport de Quinet et al. [126] et l'évaluation des projets de transport du ministère en charge des transports².

Pour réaliser de telles évaluations, il existe différents outils dont les principaux sont les études (quantitatives et qualitatives) à partir d'enquêtes et la modélisation/simulation [89]. Dans les deux sections qui suivent, nous détaillons ces deux outils dans le cadre de l'évaluation des politiques d'intermodalité.

1.2 Les études qualitatives et quantitatives de mobilité

Les études qualitatives et/ou quantitatives sont couramment les méthodes utilisées ou adoptées par les collectivités territoriales pour analyser, planifier et évaluer leurs politiques ou projets de mobilité [128, 31].

1.2.1 Définitions

Les études qualitatives et/ou quantitatives font partie des techniques de recherche fondées principalement sur l'observation. Elles se font généralement par le biais des enquêtes pour recueillir des données dites « empiriques » sur un phénomène donné. Les études qualitatives portent généralement sur un échantillon réduit (plus spécifique) visant à vérifier une hypothèse donnée. Tandis que l'échantillon des enquêtes quantitatives est plus important pour recueillir assez de données pour des analyses statistiques.

2. https://www.ecologie.gouv.fr/evaluation-des-projets-transport#scroll-nav__5

De nombreuses études sont réalisées par les Autorités en charge de la mobilité et des transports à travers les enquêtes de déplacements. Ces enquêtes permettent d'informer sur les caractéristiques socio-démographiques et les comportements de déplacements des individus d'une région donnée. Il existe principalement deux méthodes d'enquêtes : les enquêtes de préférences **révélées** (*revealed preferences (RP) survey*) et celles sur les préférences **déclarées** (*stated preferences (SP) survey*). Le Tableau 1.1 présente les approches, les avantages et les limites de ces deux méthodes d'enquêtes.

TABLEAU 1.1 – Etude comparative des méthodes d'enquêtes de préférences révélées (RP) et déclarées (SP) basée sur les travaux de Wardman [151].

| Type | Approche | Avantages | Limites |
|--|--|--|---|
| Enquêtes préférences révélées (RP) | Demande de préférences des individus à travers leurs choix réalisés sur des situations réelles de déplacements. | Maximisation de la validité externe car les choix observés sont réels (engagement des ressources comme l'argent de l'individu pour le choix effectué). Évaluation à faible coût. | Fourniture des informations limitée à des situations déjà vécues. Non contrôle (ou conception a posteriori) des ensembles et des attributs des options de choix et les caractéristiques individuelles. |
| Enquêtes préférences déclarées (SP) | Demande de préférences des individus face à des scénarios/alternatives hypothétiques qui comprennent un ensemble d'attributs avec des niveaux différents. | Fourniture des préférences et des informations impossibles à révéler lorsque le comportement de choix réel est restreint. Permet au chercheur/modélisateur un contrôle total sur les choix offerts et leurs attributs. Assure une variation suffisante des données. | Possibilité de non conformité aux comportements réels des préférences observées. Absence d'incitation pour la personne enquêtée à fournir des réponses précises. Incitation pour la personne enquêtée à adopter un comportement stratégique. Évaluation coûteuse. Vulnérable à la violation de la prise de décision économique. |

Les enquêtes de type *RP* sont caractérisées par leur périodicité de réalisation

pour permettre d'avoir des états actualisés du système de transport. Tandis que les enquêtes de préférences déclarées (*RP*) sont de nature ponctuelle en fonction du projet ou des études à réaliser. Du fait de leur périodicité, les enquêtes de type *RP* commencent à être standardisées pour permettre des comparaisons entre différentes périodes. Il faut noter qu'il est possible de combiner ces deux types d'enquêtes durant une étude. Par exemple l'ajout d'une enquête *SP* peut permettre d'analyser la sensibilité des individus face à l'introduction d'un nouveau mode de transport ou à de nouvelles possibilités de mobilité [33].

1.2.2 Enquêtes sur les comportements d'intermodalité

A notre connaissance, il n'existe en France aucune enquête (qu'elle soit de types *RP* et/ou *SP*) qui a porté spécifiquement sur les comportements de déplacements intermodaux des individus. En Europe, les enquêtes (études) sur la pratique de l'intermodalité ont été réalisées par exemple en Allemagne pour la ville de Berlin [56, 113]. Cette étude avait pour but d'identifier d'une part les combinaisons de modes de transport pertinents couramment effectués et les profils de groupes d'individus pratiquant l'intermodalité d'autre part. La région étudiée a été décomposée en trois zones : quartiers péri-urbains caractérisés par une forte possession de voitures et une faible qualité de service des transports publics (TP), zone urbaine avec un service de TP bien connecté avec de courtes distances jusqu'aux arrêts et quartiers correctement connectés (hyper-centre) caractérisés par une très grande connectivité des TP. En outre, un questionnaire spécifique a été soumis aux individus pour recueillir leurs habitudes de déplacements en termes de fréquences (souvent, rarement, jamais) et de combinaisons modales.

L'enquête a permis par exemple de révéler que le comportement de transport intermodal est fortement lié aux transports publics. En effet, les TP constituent la base de presque toutes les combinaisons avec notamment une prédominance TP+Vélo. Il ressort que les utilisateurs intermodaux tentent d'optimiser leur déplacement en fonction de l'offre de TP de leur lieu de résidence et de leurs modes de transport individuels. Les femmes et les jeunes travailleurs vivant dans des ménages familiaux (plus de deux personnes) sont les principaux utilisateurs

de l'intermodalité. Les motifs principaux des déplacements intermodaux sont le travail, les courses et les études. Les raisons de la pratique intermodale, quant à elles, restent le respect de l'environnement, le gain de temps, et l'accès au mode de transport principal. L'étude a permis également de révéler l'impact des processus d'échanges de modes de transport dans les systèmes intermodaux. Les échanges de modes sont perçus comme un obstacle pour les usagers monomodaux qui y voient un risque potentiel de manquer un déplacement programmé.

Bien qu'il n'existe pas d'enquêtes spécifiques sur l'intermodalité en France, nous avons réalisé un état des lieux des différentes sources de données relatives à la mobilité susceptibles de renseigner sur les comportements de déplacement intermodal. Il s'agit principalement du recensement de la population, des données de déplacements des individus (p. ex., Enquête Ménage Déplacement, enquête Origine-Destination) et les données massives de mobilité.

1.2.3 Les recensements de la population

Le recensement permet de connaître de façon très précise les caractéristiques socio-économiques des individus (p. ex., âge, genre et catégorie socio-professionnelle (CSP)) ainsi que leur choix de mode de transport principal (p. ex., marche à pied, deux roues, voitures, transports publics). La base renseigne également sur les caractéristiques du ménage (p. ex., nombre de personnes, possession de voiture), ainsi que celles de la résidence principale (p. ex., type de logement, zone géographique). L'échantillon de cette enquête est très représentatif de la population (environ 35%). La représentation statistique spatiale disponible est à l'échelle du *Canton-ou-Ville* et de l'*IRIS*³. En France, la base de données du recensement est fournie par l'Institut National des Statistiques et des Etudes Economiques (INSEE)⁴.

Le recensement n'étant pas focalisé spécifiquement sur les habitudes de déplacements des individus, il contient très peu d'informations sur les com-

3. *Canton-ou-ville* est un groupement d'une ou plusieurs municipalités entières. Les communes d'au moins 10 000 habitants et la plupart des communes de 5 000 à 10 000 habitants sont divisées en *IRIS*.

4. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3625223#consulter>

portements de mobilité et d'intermodalité (p. ex., fréquence des déplacements, mode de transport réellement utilisé, combinaisons modales, motifs secondaires comme le loisir ou les achats) et aucune caractéristique de l'offre de transports n'est présentée.

Parallèlement au recensement, des enquêtes sur les mobilités professionnelles⁵ et scolaires⁶ sont réalisées. Elles permettent de renseigner sur les flux de déplacements entre les domiciles, les lieux de travail et les établissements d'enseignement. Elles décrivent également les caractéristiques de l'individu, de son ménage et de sa résidence principale. Ces données sont utilisées dans la réalisation des matrices Origine/Destination pour les motifs professionnels et scolaires.

1.2.4 Les enquêtes de déplacements

Ces enquêtes peuvent être regroupées en deux grands groupes : les enquêtes déplacements labellisées par le CEREMA⁷ et conduites par les collectivités territoriales et les enquêtes nationales transports déplacements (ENTD) réalisées par le ministère en charge des transports avec l'appui de l'INSEE.

Les enquêtes déplacements des collectivités territoriales sont de trois types principalement : les enquêtes ménages déplacements (EMD), les enquêtes déplacements villes moyennes (EDVM) et les enquêtes déplacements grands territoires (EDGT) [1]. L'EMD renseigne sur les pratiques de mobilité quotidienne des personnes âgées de cinq ans et plus à l'échelle d'une commune ou d'une communauté d'agglomération à un moment donné (p. ex., l'EMD de la MEL réalisée en 2016⁸). Elle est réalisée en face à face et collecte par exemple certaines informations socio-économiques des individus (p. ex., l'âge, le genre et la CSP), les motifs des déplacements (p. ex., travail, études, loisir), les modes de

5. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4171531?sommaire=4171558&q=mobilit%C3%A9%20professionnelle>

6. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/4171517?sommaire=4171558>

7. https://www.cnis.fr/wp-content/uploads/2017/12/DPR_2013_2e_reunion_COM_territoires_enquetes_deplacements_certu.pdf

8. <https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/enquete-deplacement-2016/information/?location=10,50.65641,3.03338&basemap=jawg.streets>

transports utilisés (p. ex., voiture, vélo, bus, marche à pied et les combinaisons de modes mécaniques) et la répartition horaire des déplacements. Les EMD sont essentielles pour élaborer et évaluer les politiques de mobilité dans une zone donnée. Elles permettent également de renseigner sur les pratiques intermodales à travers la précision des modes de transports mécanisés utilisés durant le déplacement.

Les EDVM sont des formes réduites d'EMD dont la zone d'étude correspond aux villes moyennes (moins de 100 000 habitants). Contrairement aux EMD, les participants sont interrogés par téléphone en se limitant à une ou deux personnes âgées de plus de 11 ans par ménage. Quant aux EDGT, elles portent sur des périmètres plus importants associant zones urbaines et territoires péri-urbains et/ou ruraux. Elles complètent une EMD classique (sur les zones plus denses) par une enquête téléphonique. Comme exemple, on peut citer l'EDGT de l'Île de France réalisée en 2020⁹.

Les ENTD ont pour objectif de renseigner sur les habitudes de déplacements des ménages résidant en France métropolitaine. C'est le seul type d'enquête à couvrir une telle échelle d'étude. En plus du motif, la longueur, la durée, le mode de transport du déplacement et certaines caractéristiques socio-démographiques sur le ménage et l'individu, ces enquêtes fournissent d'importantes informations sur la fréquence d'utilisation des modes de transport et à leurs possibilités d'accès. Cette information permet donc de mieux saisir le choix modal des individus. Elles informent également sur les possibilités d'accès aux transports publics et aux modes de transports individuels dont disposent les ménages. Les ENTD sont réalisées en moyenne tous les 10 à 15 ans auprès des personnes du ménage âgées de cinq ans et plus en face à face à raison de deux visites.

Il existe également d'autres sources de données sur les déplacements des individus comme celles issues des équipements de comptage routier (p. ex., les boucles magnétiques) ou des enquêtes « voyageurs ». Cette dernière concerne le plus souvent les déplacements en voiture particulière et en transports publics. Ces enquêtes sont le plus souvent réalisées par les sociétés organisatrices des transports publics ou le ministère chargé des transports à travers l'Autorité de la

9. <http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/egt-h2020-les-premiers-resultats-a5728.html>

qualité de service dans les transports (AQST)¹⁰. Elles renseignent sur le choix de mode, les caractéristiques du déplacement (p. ex., le motif et la fréquence) et quelques éléments caractéristiques de l'offre de transports (p. ex., l'itinéraire), du mode réellement utilisé et quelques caractéristiques socio-économiques des individus (p. ex., l'âge, la motorisation, et la CSP). Cette base peut être utile pour la calibration des modèles (p. ex., connaître les pratiques relatives à des modes de faibles parts modales). Ces enquêtes n'ont pas de périodicité définie et répondent généralement à des demandes ponctuelles¹¹. L'échantillon utilisé n'est généralement pas représentatif de la population réelle.

Si les premiers objectifs des enquêtes étaient d'alimenter les modèles de trafic, l'utilisation de ces données a depuis lors évolué et s'est diversifiée [65]. De nos jours, elles sont au coeur des principales activités de planification des transports et de la mobilité. En effet, des enquêtes de déplacements sont réalisées périodiquement (p. ex., tous les 10 ans pour les EMD) ou de manière spontanée (p. ex., les enquêtes « voyageurs ») pour aider ces autorités à définir leur plan de déplacement urbain (PDU). Ces enquêtes visent soit à faire une capture (photo) de la situation des habitudes de déplacements d'une population pour une période donnée (enquêtes de type *RP*), soit à recueillir des opinions ou des réactions des populations face à un futur projet (enquêtes de type *SP*). Le premier type est généralement la démarche la plus couramment utilisée par les décideurs pour comprendre les pratiques en termes de déplacements face à l'offre de transport existante.

Les principales limites des enquêtes de déplacements présentées ci-dessus sont leur faible taux d'échantillonnage (entre 0,8 à 2% pour les EMD et environ 0,18% pour l'ENTD (2018)) et l'absence de coordonnées O/D qui ne sont connues souvent qu'à l'échelle des secteurs de tirage¹². En outre, elles ne comportent

10. <http://www.qualitetransports.gouv.fr/l-aqst-r1.html>

11. Voir par exemple l'étude « Comprendre les choix et l'expérience des voyageurs en matière de déplacements interurbains » réalisée pour le compte de l'AQST http://www.qualitetransports.gouv.fr/IMG/pdf/comprendre_les_choix_et_l_experience_des_voyageurs_en_matiere_de_deplacements_urbains.pdf

12. L'échantillon de ménages est tiré au hasard sans remplacement et est géographiquement stratifié (rural ou urbain). Les secteurs de tirage sont des zones du périmètre d'étude d'où sont tirés les participants à l'enquête (au moins 70 ménages et 160 personnes par zone, seuil

pas la description complète des déplacements effectués (p. ex, les itinéraires empruntés ne sont pas décrits), et surtout elles n'intègrent pas de description précise de l'offre de transport des modes non utilisés. De plus, le questionnaire utilisé pour les EDVM et EDGT, étant simplifié, ne renseigne pas de manière fine la succession des modes de transport utilisés. Une autre limite de ces enquêtes de déplacements est la période de réalisation qui est de dix ans en moyenne. Or en dix ans, les habitudes de déplacements peuvent fortement évoluer dans une région donnée (p. ex., la crise sanitaire due à la Covid 19 a perturbé considérablement les comportements de déplacements). Ce long temps s'explique principalement par les coûts de réalisation de ces enquêtes. Il peut donc être intéressant d'exploiter des sources de données fréquemment mises à jour comme celles issues de la localisation des téléphones et des véhicules.

1.2.5 Les données massives de mobilités

Les données massives de mobilités sont issues principalement des données de localisation des téléphones mobiles (*floating mobile data (FMD)*) et des véhicules (*floating car data (FCD)*). Les données *FMD* sont obtenues soit par triangulation soit par les transferts intercellulaires entre les téléphones et les antennes relais des opérateurs lors des déplacements. Les *FCD* proviennent généralement des traces *GPS* qui sont installés dans les véhicules. Elles peuvent aussi être obtenues via les localisations des téléphones quand ceux-ci sont allumés dans le véhicule.

Les données massives, une fois traitées, fournissent de meilleures connaissances des flux origine/destination que les données issues d'enquêtes standard (faible couverture). Elles informent également sur les itinéraires détaillés des déplacements des usagers grâce au système de localisation qui se met à jour fréquemment. De ce fait, ces données sont plus récentes que celles issues des enquêtes standard. Il existe aujourd'hui de nombreux fournisseurs de ces données comme les opérateurs téléphoniques¹³ et Google à travers notamment son

de représentativité statistique : https://www.cnis.fr/wp-content/uploads/2017/12/DPR_2013_2e_reunion_COM_territoires_enquetes_deplacements_certu.pdf).

13. L'opérateur téléphonique SFR propose par exemple un service de big data appliqué à la mobilité, extrapolable à la population nationale grâce à ses 21 millions d'abonnés <https://www.sfrbusiness.fr/relation-client/sfr-geostatistics/>.

système d'exploitation mobile *Android*.

Le manque d'informations précises sur le déplacement (p. ex., motif du déplacement, mode de transport utilisé, caractéristiques de l'individu) est une des limites des données massives de mobilité. Les vitesses de parcours et les points origine/destination sont principalement les informations accessibles. Etant également issues des installations de l'opérateur (téléphonique et/ou satellite), ces données peuvent avoir une faible représentativité à l'échelle de la population réelle en fonction de la part du marché de ce dernier. Un opérateur avec une grande couverture de télécommunications et d'abonnées, fournira des données plus proches de la population. Ce manque de représentativité peut aussi se traduire au sein d'une partie de la population (p. ex., enfants de moins de 10 ans, personnes de plus de 80 ans) dû à la non possession de téléphones adaptés (smartphones) pour permettre le traçage de leurs déplacements.

Aucune des sources de données présentées ci-dessus ne se focalise spécifiquement sur les comportements de déplacement intermodal comme celle menée dans [79]. La seule source de données en France qui permet de renseigner succinctement sur de telles habitudes est l'enquête ménage déplacement (EMD). En effet, même si les questions de l'enquête ne sont pas spécifiques à l'intermodalité, elle permet d'informer sur la combinaison des modes mécanisés durant le déplacement. Nous montrons par la suite, dans la section 3.2, comment reconstituer ces combinaisons.

Bien que permettant de se renseigner sur les pratiques de mobilité, les enquêtes de déplacements sont très coûteuses à réaliser. La réalisation d'une enquête ménage déplacement (EMD) pour une ville est estimée par exemple entre 160 à 180 € HT par ménage¹⁴. Elles nécessitent également beaucoup de ressources humaines et matérielles et du temps pour sa réalisation. La longue période (entre 10 et 15 ans) de réalisation des enquêtes s'explique en partie par ces moyens à mettre en oeuvre. Il est donc important de disposer de méthodes alternatives, moins coûteuses pour évaluer les politiques de mobilité. La modélisation/simulation est l'une d'entre elles.

14. Voir fiche sur l'EMD <http://multimedia.ademe.fr/catalogues/CTmobilité/fiches/out-1p33-34.pdf>

1.3 Modélisation et simulation des systèmes de transport

Les systèmes de transport ont toujours été d'un grand intérêt dans les études de modélisation et de simulation. Ils ont été ainsi modélisés sur plusieurs approches avec notamment des méthodes mathématiques, économiques et informatiques. Avant de revenir sur ces différentes approches, il est important de revenir sur quelques notions de la modélisation et de la simulation.

1.3.1 Définitions

Modélisation

D'après Thompson [141], la modélisation est l'activité consistant à construire des modèles. Le terme modèle peut prendre diverses interprétations en fonction du domaine d'étude et des objectifs recherchés [66]. Il convient également de faire la différence entre les modèles physiques et les modèles abstraits [145]. Les modèles physiques (p. ex., prototypes et maquettes) sont des dispositifs du monde réel conçus pour être soumis à des expérimentations. Quant aux modèles abstraits, ils sont destinés à être simulés sur ordinateurs. C'est ce dernier groupe qui nous intéresse dans le cadre de notre étude. Treuil et al. [145] définissent ces types de modèles comme « une construction abstraite qui permet de comprendre le fonctionnement d'un *système de référence* en répondant à une *question* qui le concerne ». C'est une *représentation simplifiée* à l'aide de variables jugées suffisantes (*théorie générale*) pour rendre compte de l'objet modélisé, dans un langage spécifique (p. ex, mathématique, informatique) non ambigu appelé *langage de modélisation*.

Le *système de référence* représente une partie du monde réel défini par les chercheurs. Dans notre cas d'étude, il s'agit du système de transport d'une localité, plus précisément de la mobilité des personnes dans les zones urbaines et péri-urbaines. La *question* que nous nous posons est de savoir quels leviers (p. ex., gratuité des transports publics, péage interurbain) actionner pour inciter les individus à combiner les modes de transport durant leur déplacement au

détriment de l'utilisation de la voiture individuelle. Il s'agit principalement pour nous d'offrir un cadre de simulation pour étudier les comportements de déplacements intermodaux vis-à-vis des politiques de mobilité dans ces zones.

Simulation

Il existe de nombreuses définitions de la simulation en fonction du domaine d'étude. Cependant, d'après [145], il est possible de faire apparaître au moins trois définitions à savoir :

- La première définition, utilisée dans les sciences sociales [59], considère que la simulation est un sous-ensemble de l'activité de modélisation, qui consiste à concevoir (et à tester) des modèles dynamiques. Ce n'est donc pas une activité à part entière.
- La deuxième définition est proche de celle couramment utilisée dans les sciences expérimentales comme la physique ou la biologie. Elle décrit la simulation comme une activité différente de la modélisation, qui, « partant d'un modèle (dynamique), se donne comme but de construire des dispositifs expérimentaux qui feront réagir le modèle de la même façon que le système réel sur des aspects importants » [146]. Cette définition confère à la simulation simplement une activité de construction de dispositifs.
- La troisième et dernière définition considère la simulation comme le processus de conception d'un modèle de système réel et de réalisation d'un ensemble de tests avec ce modèle dans le but de comprendre le comportement du système et/ou d'en tirer des connaissances nouvelles [135]¹⁵. Cette définition offre à la simulation l'image d'une activité spécifique avec ses règles, ses méthodes, et surtout un rôle dans l'exploration scientifique.

Ainsi, pour définir l'activité de simulation, Treuil et al. [145] se basent sur la définition d'une expérimentation en sciences. Pour eux, la simulation est « une activité par laquelle, en fonction d'objectifs précis, et à l'aide d'un dispositif expérimental informatique (appelé simulateur), on perturbe selon un protocole

15. « [Simulation is] the process of designing a model of a real system and conducting experiments with this model for the purpose of understanding the behavior of the system and / or evaluating various strategies for the operation of the system »

déterminé un modèle dynamique ». Elle consiste donc à exécuter et à perturber un modèle de façon contrôlée, afin de répondre à une question spécifique (ce que l'on cherche à mesurer en réponse à ces perturbations), en l'exécutant de façon répétée avec différents paramètres appelés entrées, en variant le temps et en modifiant sa structure.

De nos jours, la simulation peut être utilisée pour répondre à plusieurs objectifs. D'après [145], les objectifs finaux de la simulation peuvent être regroupés en cinq catégories définies comme suit :

- **validation, évaluation, vérification** : L'objectif est de tester une hypothèse du modèle de système de référence, de le vérifier ou d'accréditer la théorie qui a servi à le construire.
- **communication, formation, visualisation** : Le but de la simulation est de montrer et de partager le modèle de la dynamique du système de référence.
- **compréhension, exploration, explication** : L'objectif de la simulation ici est de comprendre le fonctionnement du système de référence, en considérant le modèle comme une réplique miniature qui pourra être étudiée plus facilement.
- **contrôle, action, pilotage** : Dans ce cas, la simulation sert de support à une prise de décision ou à un contrôle qui influera sur l'état réel du système de référence.
- **prévision, prédiction, anticipation** : L'objectif de la simulation est de prévoir les évolutions possibles du système de référence en fonction d'évolutions ou de perturbations spécifiques.

La simulation permet également de résoudre les problèmes complexes comme le tri collectif ou la recherche d'échantillonnage [49]. En outre, il est possible que la simulation ait pour objet plusieurs objectifs en les combinant notamment. Dans le cadre de notre étude, les objectifs de notre simulation sont à la fois de servir de support de prise de décision et prévoir les évolutions possibles du système de transport (intermodal) et du trafic routier.

1.3.2 Modèles de simulation des systèmes de transport

De part sa définition (cf. 1.1.1), un système de transport peut être assimilé à un système (de référence) complexe car il fait intervenir plusieurs éléments qui l'influencent directement ou indirectement, le plus souvent de manière non-linéaire. Ces éléments peuvent être techniques et aussi humains. La simulation est donc une méthode intéressante pour étudier ce type de système. En outre, avec les nouvelles possibilités de calcul offertes par les ordinateurs, les outils de simulation commencent de plus en plus à gagner du terrain parmi les méthodes d'évaluation de politiques de mobilité [125]. Ces outils semblent également plus adaptés pour étudier les nouveaux services ou la possibilité de mobilité comme le transport (autonome ou pas) à la demande [149, 74], l'autopartage [82, 7], les vélos et trottinettes en libre-service [38].

La réalisation d'une simulation de transport repose généralement sur deux éléments :

- L'offre de transport qui est constituée de l'infrastructure routière (p. ex., type de voies, capacité de stockage des routes, vitesses limites et intersections) et des services de transport associés (p. ex., les transports publics avec le réseau, les itinéraires et les horaires de passage).
- La demande de transport qui permet de reproduire les besoins en déplacement des individus sur les plans géographiques ou spatiaux (origine/destination) et temporels (heure de départ) ainsi que le mode de transport.

Il existe différentes approches de modélisation en fonction de la finesse ou de la précision recherchée des éléments et/ou des composants de l'offre et de demande de transport. On distingue principalement i) les modèles **macroscopiques** qui vont représenter la demande de transport sous forme de flux agrégés et ii) les modèles **microscopiques** qui considèrent la demande de façon désagrégée où chaque individu est simulé spécifiquement [136].

La modélisation macroscopique du trafic trouve une analogie (physique) entre le flux de véhicules et le flux d'un fluide dans un tube. Aussi une simulation s'appuyant sur la mécanique des fluides est généralement utilisée. Dans cette approche, le trafic se caractérise par des attributs macroscopiques et des comportements moyennés dans des équations globales définies par le biais de

trois paramètres à savoir la vitesse, la capacité (ou débit) et la densité. Ces paramètres sont définis comme suit :

- le débit $Q(x, t)$, le nombre de véhicules qui passent par un point x pendant un intervalle de temps (en $veh.h^{-1}$);
- la densité (ou la concentration) $D(x, t)$, le nombre de véhicules sur un tronçon du réseau à un instant t en $veh.km^{-1}$ ou $veh.m^{-1}$;
- la vitesse moyenne $V(x, t)$ des véhicules sur un tronçon à un instant t (en $m.s^{-1}$ ou $km.h^{-1}$).

La relation existante entre ces trois paramètres selon la mécanique des fluides est définie comme suit :

$$Q(x, t) = D(x, t) \times V(x, t) \quad (1.1)$$

Les premiers modèles macroscopiques du trafic ont été proposés simultanément par Lighthill et al. [94] et Richards Paul [130] respectivement en 1955 et 1956.

Les modèles macroscopiques présentent l'avantage d'être compacts et génériques permettant ainsi leur application dans différents cas d'études. En outre, ils permettent d'effectuer facilement des analyses des différents scénarios grâce à la résolution des équations mathématiques. Ainsi, ces modèles sont adaptés pour évaluer les politiques de gestion des infrastructures comme les autoroutes et la dynamique d'écoulement du trafic suite à leurs applications.

Cependant, les modèles macroscopiques présentent des limites face à l'évolution actuelle des technologies d'aménagement routier, l'apparition de nouveaux types de véhicules de plus en plus intelligents et les spécifications individuelles des usagers. Il est donc important de considérer les véhicules de manière individuelle ou groupée (peloton) avec des comportements propres et d'étudier les interactions qui en découlent. Ainsi, la prise en compte des variables comme la densité, le débit et la vitesse moyenne ne suffisent plus pour modéliser de tel trafic. Une approche microscopique est donc nécessaire afin de tenir compte des attributs des usagers et des interactions entre eux d'une part et avec l'environne-

ment dans lequel ils se trouvent d'autre part.

Contrairement aux modèles macroscopiques, dans l'approche microscopique les véhicules sont pris en compte de manière individuelle et disposent d'un ensemble d'attributs. Dans le cas des modèles micro-économiques, ces attributs sont modifiables par des équations globales et permettent de représenter l'hétérogénéité des usagers. Dans les modèles microscopiques dits individu-centré [77], les véhicules disposent (en plus d'attributs) de comportements spécifiques ou de règles qui leur sont associés [111]. Ces modèles permettent ainsi de représenter des comportements hétérogènes et stochastiques.

Ces deux types de modèles ne permettent pas de faire ressortir les phénomènes émergents issus d'interactions entre usagers de la route. L'approche basée sur les agents permet de palier ce manque en modélisant les interactions entre les usagers considérés comme des agents autonomes (entités individuelles ou collectives) dans un environnement (infrastructure) modélisé de manière réaliste [12, 145]. Ainsi, contrairement aux modèles mathématiques, les modèles à base d'agents peuvent simuler des phénomènes plus complexes et dynamiques du trafic routier tels que les interactions des piétons avec d'autres usagers de la route [55] ou l'impact des nouveaux modes de transport sur une ville [61].

Il faut noter ici l'existence des modèles intermédiaires appelés **mésoscopiques** entre les approches microscopiques et macroscopiques [91]. Ces modèles mésoscopiques considèrent les acteurs du trafic en petits groupes homogènes. Certains travaux ont même investigué l'intégration de ces différents niveaux au sein d'une même simulation [99, 27, 35].

Un résumé des principales approches de modélisation est présenté dans le *tableau 1.2*.

1.3.3 Données d'entrée pour réaliser une simulation de transport

Comme évoqué dans la sous-section précédente, la réalisation d'une simulation de transport nécessite la donnée de l'offre et de la demande de transport. La modélisation de ces éléments s'appuie également sur différentes sources de don-

TABLEAU 1.2 – Etude comparative des modèles de simulation des systèmes de transport.

| Modèle | Approche | Avantages | Limites |
|----------------------|--|--|--|
| Macroscopique | Mécanique des fluides, équations mathématiques (densité, débit, vitesse moyenne) [94, 130] | Explication des phénomènes macro (p. ex., congestion), Faible coût informatique | Non prise en compte des comportements individuels, modèle peu réaliste |
| Microscopique | Micro-économique (x,V,Vmax,d) | Hétérogénéité des véhicules/conducteurs | Pas de comportement individuel |
| | A base d'individus (objet) Attributs + Comportements[77, 111] | Comportements hétérogènes et stochastiques | Pas d'interactions inter-individus, Résultats analytiques |
| | A base d'agents (social) [12, 145] | Interactions entre les individus, modèle plus réaliste, niveaux d'observation (macro-micro) | Nombre paramètres élevé |
| Mésoscopique | Intermédiaire entre les deux précédentes (groupes hétérogènes de véhicules) [91] | Quelques caractéristiques hétérogènes des conducteurs, application des modèles probabilistes | Peu de documentation, manque de cohérence |

nées en fonction du niveau de finesse recherché. Les données issues des enquêtes de déplacement permettent de renseigner sur la demande de transport. Nous avons présenté dans la sous-section 1.2.4 les principales sources de données sur la demande de transport disponibles en France. Pour avoir une demande de transport plus fine (microscopique), il faudrait utiliser des données géographiques et spatiales pour générer les coordonnées origine/destination (O/D) des déplacements étant donné que les enquêtes présentées précédemment n'en fournissent pas. En France, on distingue principalement la base de données TOPO¹⁶ et la base permanente des équipements (BPE)¹⁷. La BD TOPO renseigne sur le territoire et ses infrastructures à travers une représentation vectorielle (structurée en objets). Les objets sont regroupés par exemple en adresses (postales) et peuvent représenter des constructions (bâtiments), des services et des activités ou encore des infrastructures de transport. Il est donc possible de générer les O/D des motifs de déplacements à travers la localisation, les différents bâtiments en fonction de la nature du service et/ou de l'activité qui est réalisée. Les données relatives au transport peuvent être utilisées pour créer le réseau de transport multimodal. La BD TOPO est produite par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN). Elle est mise à jour régulièrement et publiée chaque trimestre.

La BPE quant à elle, informe sur le niveau d'équipements et de services rendus par un territoire (zone géographique à l'échelle infracommunale comme les quartiers) à la population. La base recouvre les domaines comme les services, les commerces, la santé et l'enseignement. La BPE est produite et mise à jour par l'INSEE tous les deux ans. Grâce à la localisation fine (coordonnées XY) des équipements, il est possible d'étudier la concentration spatiale des équipements. Cela peut être très utile pour définir les lieux des activités origine/destination comme le domicile, le travail, l'éducation, les achats ou le loisir [71]. En effet, il est possible de faire une distribution spatiale plus précise à partir de chaque domaine de service. Par exemple, si le motif à la destination est le travail ou l'éducation, on peut tenir compte de la catégorie socio-professionnelle de l'individu

16. <https://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html>

17. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-permanente-des-equipements-1/>

pour mieux définir la destination.

Les données sur l'offre de transport sont nécessaires à la construction du réseau de transport multimodal et des autres infrastructures routières comme les feux tricolores, les parkings relais, les lignes et les arrêts de transports publics. Le réseau ainsi modélisé doit être le plus fidèle possible au monde réel (p. ex., la capacité et les types de voies sur la route, les localisations des lignes et des arrêts des transports publics). La principale source de données disponibles pour la modélisation du réseau de transport est *OpenStreetMap*¹⁸ (*OSM*) [97, 22]. Les données *OSM* renseignent sur les informations cartographiques (p. ex., routes, sentiers, lignes et stations de TP et les bâtiments) du monde. Elles sont disponibles en accès libre grâce au travail collaboratif de nombreux bénévoles partout dans le monde. Ce mode de collaboration en constitue son principal défaut. En effet, les données *OSM* sont plus ou moins riches d'informations en fonction des zones d'étude. Les données des grandes métropoles sont généralement plus riches que les régions périphériques.

Très récemment en France, l'IGN a ouvert l'ensemble de ses bases de données¹⁹. Ainsi, la BD TOPO qui contenait initialement que les grandes axes du réseau routier français, renseigne également sur les routes secondaires, les chemins et les informations surfaciques comme les parkings. Cette nouvelle version de la BD TOPO permet de consolider et compléter les données *OSM* pour la génération du réseau de transport multimodal.

En plus des données *OSM*, celles relatives à l'offre des TP sont nécessaires pour construire une offre de transport plus complet. Les données des TP sont généralement disponibles sous le format standard *GTFS*²⁰ (*General Transit Feed Specification*). Les données *GTFS* se composent de plusieurs fichiers permettant de modéliser spécifiquement les informations de transports publics comme les arrêts, itinéraires, trajets et les horaires. Ces bases de données sont généralement produites et mises à jour par les structures organisatrices des TP du périmètre concerné (communal, régional et national).

18. <https://www.openstreetmap.org/about>

19. <https://www.zdnet.fr/actualites/1-ign-rend-ses-donnees-publiques-accessibles-a-tous-399.htm>

20. <https://gtfs.org/>

Le Tableau 1.3 donne un aperçu des sources de données avec leurs domaines de production disponibles en France. Il renseigne aussi sur l'utilité de ces données dans la mise en place du modèle de simulation de transport intermodal.

TABLEAU 1.3 – Principales sources de données sur la demande et l'offre de transport en France.

| Domaine | Source | Producteur | Utilité | Infos inter-modalité |
|---------------------------|--|--|--------------------------------|----------------------|
| Déplacement | Enquêtes déplacement (EMD, EDVM, EDGT) | Collectivités territoriales, CEREMA | Demande de transport | Oui |
| | Recensement/ Mobilités professionnelle et scolaire | INSEE | Demande de transport | Non |
| | ENTD | Ministère de l'écologie | Demande de transport | Non |
| | Enquêtes « voyageurs », données de comptage | Organisme des services de mobilité | Calibration | Non |
| | Données massives (FCD, FDM) | Opérateur de téléphonie, Google, éditeurs de logiciels | Calibration | Non |
| | BPE, BD Topo, bordures administratives, OSM | OSM <i>Community</i> , IGN | Localisation des installations | - |
| Réseau routier | BD Topo, OSM | OSM <i>Community</i> , IGN | Offre de transport | - |
| Réseau transports publics | GTFS | Organisme des TP | Offre de transport | - |

1.3.4 Simulation de comportement d'intermodalité

Bien qu'il existe de nombreux outils de simulation permettant la multimodalité [75, 95, 52], nous n'avons trouvé que très peu études de simulation sur l'évaluation des comportements de déplacement intermodal des individus [67]. Le travail réalisé dans [67] a permis d'analyser sous l'angle de la simulation

multi-agent l'impact d'un projet de mobilité visant à favoriser l'intermodalité²¹ à l'échelle de la population réelle de la Suisse (8,42 millions d'habitants en 2017). Le but de cette simulation était d'analyser l'impact des nouveaux services de mobilité à l'échelle de la population à travers les données de l'enquête qui a porté sur un échantillon (composé de 139 individus) de cette population. Les auteurs ont généré une population synthétique avec la demande de déplacement en se basant sur les données de recensement et de l'enquête du projet. Ils ont également reproduit les différents modes de transport conformément à ceux disponibles du projet. Le choix modal a été modélisé à travers un modèle multinomial logit (MNL)²² en se basant sur les travaux menés dans [73]. Un module spécifique de routage intermodal a été développé pour permettre la combinaison entre les modes de transport. En termes de résultats, l'étude a révélé qu'une partie de la population pourrait être favorable à l'utilisation des services de mobilité proposés par le projet. La simulation a aussi permis de faire ressortir les impacts d'un tel projet sur la congestion et l'environnement.

L'un des avantages de la simulation est la possibilité de tester plusieurs scénarios sans faire intervenir des coûts ou charges supplémentaires. Par contre, la qualité de la simulation dépend énormément des données disponibles. En outre, les résultats de la simulation doivent être analysés avec beaucoup de précautions en tenant compte des hypothèses prises pour simplifier le problème.

Conclusion

Ce chapitre a présenté quelques généralités sur les politiques d'intermodalité en donnant d'abord quelques définitions et les bienfaits de la pratique intermodale. Par la suite, nous avons proposé un focus sur les différentes méthodes ou outils d'évaluation des politiques de mobilité (intermodalité). Les études empiriques à travers les enquêtes et la simulation sont les méthodes les plus

21. <https://www.sbb.ch/fr/abonnements-et-billets/abonnements/greenclass/1-offre-green-class-cff/projets-pilotes.html>

22. Le modèle multinomial logit (MNL) fait partie des modèles de choix discret qui sont fondés sur la notion d'utilité aléatoire pour modéliser un individu face à une situation de décision entre deux ou plusieurs alternatives. Une description détaillée de ces modèles est faite dans la section 2.2.3.

couramment utilisées.

Les enquêtes permettent de recueillir les comportements de mobilité des individus à un instant donné (photo) ou face une situation hypothétique. Longtemps considérées comme moyen d'alimenter les modèles de trafic (modèle traditionnel à quatre étapes notamment) [65], elles constituent aujourd'hui un véritable outil de planification [127, 31]. Le principal inconvénient de ces enquêtes est leurs coûts et temps de réalisation qui sont très importants. Contrairement aux méthodes de simulation, les résultats de l'enquête sont difficilement extrapolables pour d'autres cas d'études.

La simulation permet d'étudier différents scénarios de mobilité à partir d'une source de données en entrée. Grâce à la richesse des données disponibles, les modèles de simulation microscopiques notamment les approches multi-agents se développent de plus en plus [116, 8]. Elle permet de répéter les expérimentations pour différents cas d'études et à des échelles différentes.

En somme, ces deux méthodes sont en réalité complémentaires : la simulation permet de combler les limites des études empiriques et sans les données d'enquêtes, il n'est pas possible de concevoir les modèles de simulation. La simulation complète les études empiriques pour mieux analyser les politiques de transport (p. ex., optimisation des investissements, satisfaction de la demande, prévision) [125]. A notre connaissance, il existe très peu d'études sur l'évaluation de l'intermodalité que ce soit à travers des études empiriques ou de simulations. Les seuls travaux à notre connaissance ont été réalisés en Allemagne et en Suisse à travers une étude empirique et une simulation respectivement. Nous n'avons trouvé aucun travail similaire en France.

Notre recherche bibliographique a également montré que la simulation microscopique en particulier multi-agent est particulièrement adaptée pour évaluer les nouveaux services de mobilité (p., ex., véhicules en libre-service, transport à la demande)²³. En conséquence de quoi la simulation multi-agent peut être considérée comme une méthode pertinente pour étudier les politiques d'intermodalité où le mécanisme de choix individuel est central à l'adoption ou non de

23. Voir notamment l'article du SYSTRA sur comment modéliser les nouvelles formes de mobilité : https://www.systra.com/expert_insights/comment-modeliser-les-nouvelles-formes-de-mobilite/

nouvelles pratiques. Le chapitre suivant présente plus en détail les concepts et fondements de cette pratique.

Modélisation multi-agent du transport

Introduction

Le chapitre précédent a mis en évidence la pertinence d'utiliser la modélisation/simulation notamment multi-agent, pour évaluer les politiques de mobilité en général et d'intermodalité en particulier. De plus, avec le développement d'outils de simulation de systèmes de transport tels que *MATSim* et *SUMO*, il est possible de réaliser ce type d'expérimentation en prenant en compte le comportement de mobilité des individus [46, 93, 98]. Par conséquent, plusieurs scénarios de simulation à base d'agents ont été réalisés pour différents cas d'étude [12]. Cette diversité des outils de simulation rend également la tâche difficile pour choisir le simulateur le plus adapté pour un cas d'étude donné. Les études comparatives ne sont pas assez complètes pour guider le choix du mobilisateur par rapport aux spécificités de son besoin. Il est donc important de mettre en place une approche plus intuitive pour permettre d'effectuer ce choix.

Le présent chapitre se focalise sur les modèles de simulation multi-agent du transport en faisant un rappel sur le paradigme agent (section 2.1). Par la suite, nous présentons les différentes étapes pour réaliser une simulation multi-agent de transport. Enfin, le chapitre résume notre étude comparative des récentes plateformes multi-agents pour simuler les comportements d'intermodalité.

2.1 Modèles de simulation multi-agent de systèmes de transport

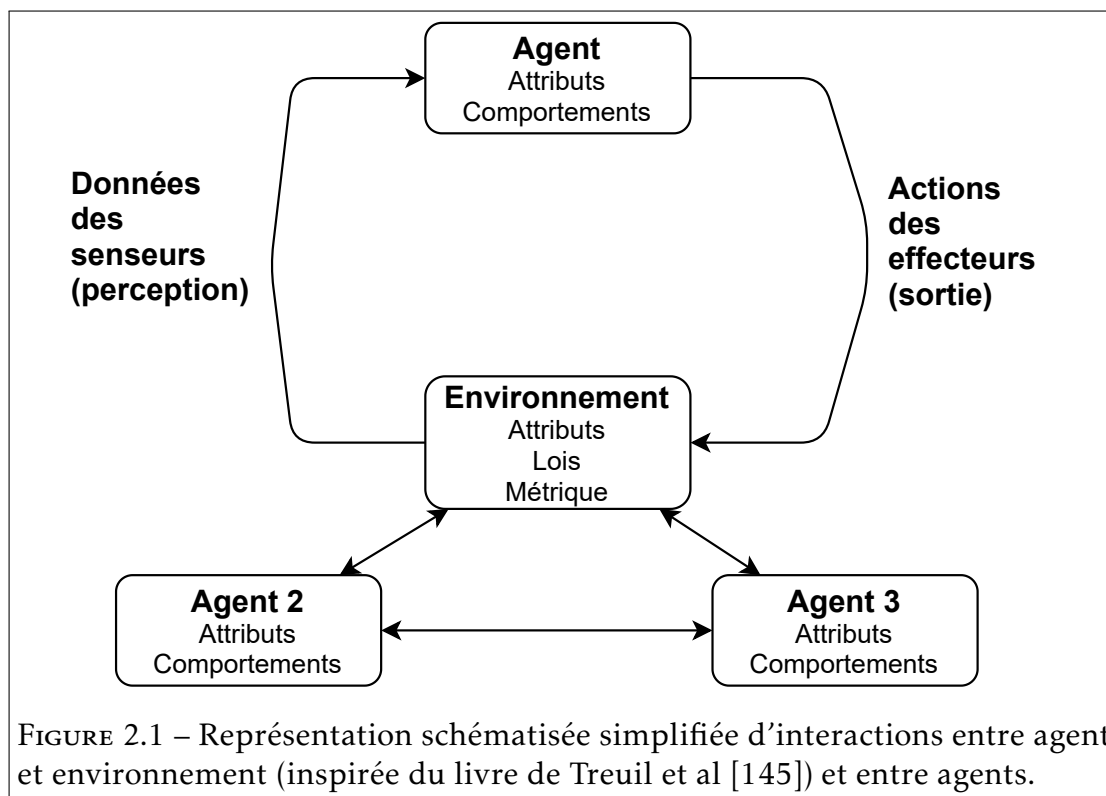
Les modèles multi-agents font parties des approches de modélisation microscopique. Dans cette section, nous revenons sur le concept ou paradigme agent avec des exemples illustrant la modélisation des systèmes de transport.

2.1.1 Paradigme Agent (Définition)

La notion d'agent est utilisée dans plusieurs domaines de recherche comme la sociologie, la biologie et l'informatique. De ce fait, il existe de nombreuses définitions attribuées à ce terme. Nous allons cependant retenir celle de Wooldridge [153] qui est plus proche de notre cas d'étude. Selon cet auteur, un agent est un **système informatique** situé dans un **environnement**, capable d'**actions autonomes** dans cet environnement afin d'atteindre des **objectifs prédéfinis**¹. L'environnement peut être considéré comme un espace commun dans lequel évoluent les agents et les autres objets (passifs) [78]. Les agents ont une perception limitée (représentation partielle) de l'environnement dans lequel ils sont situés. Les agents sont capables d'interactions entre eux (agent-agent) et avec l'environnement (agent-environnement). La Figure 2.1 donne une représentation simplifiée d'interactions agent-environnement et agent-agent. De ces interactions, se produisent de phénomènes émergents comme la congestion dans le cas des déplacements des usagers sur le réseau routier ou le suivi des traces laissées par des fourmis en quête de nourriture (création de longues files indiennes).

La définition de Wooldridge présente l'avantage d'être concise et ne donne pas de précisions sur certains points utilisés. Par exemple, le type d'agent (intelligent ou non), la nature de l'environnement (p. ex., discret ou continu, statique ou dynamique) ou le degré de l'autonomie de l'agent. Ainsi, cette définition cadre bien avec l'objectif de l'intermodalité qui consiste pour une personne donnée (agent) à faire un choix modal (de manière autonome) en fonction de l'offre de transport et de l'état du trafic (environnement) afin d'atteindre une destination

1. *An agent is a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous action in this environment in order to meet its delegated objectives.*



donnée (objectif).

Il existe différents types d’agents ont été regroupés en cinq classes selon Russell et Norvig : réflexes simples, réflexes avec modèle, avec buts, avec utilités et apprenants [132]. La première classe fait référence aux agents **réactifs** caractérisés par des comportements simples basés sur les règles de type « condition-action » en fonction de leurs perceptions de l’environnement. Ces agents ne disposent pas de mémoire pour enregistrer les états du système (agent et environnement). Les quatre autres classes font partie des agents **cognitifs** dotés de comportements adaptés dans un environnement partiellement observable et d’une mémoire pour enregistrer les états passés. Ces agents nécessitent donc une représentation de leur environnement. Le Tableau 2.1 donne un aperçu des principales caractéristiques de ces cinq classes d’agent.

Les classes d’agents *avec utilités* et *apprenant* sont particulièrement intéressantes dans notre cas d’étude. La notion d’utilité permet de modéliser de manière plus réaliste le comportement de déplacement de l’individu dans le choix de son

TABLEAU 2.1 – Les caractéristiques des types d’agents selon Russell et Norvig [132].

| Classe | Type | Caractéristiques |
|---------------------------|----------|--|
| Agent simple réflexe | Réactif | Réaction de manière instantanée à la perception de l’environnement. Règles simples (condition-action). Pas de mémorisation des évènements passés. |
| Agent réflexe avec modèle | Cognitif | Connaissances de l’état de l’environnement et de l’impact des actions de l’agent. Mémorisation de l’état du monde et de l’agent. Adaptation dynamique de la représentation de l’environnement à travers les informations perçues dans celui-ci. Nécessité de modélisation de l’environnement et son internalisation dans l’agent. |
| Agent avec buts | Cognitif | Extension de l’agent réflexe avec modèle. Ajout de buts qui comprend les états et les situations désirables de l’agent. Prise en compte du but dans le choix d’une action. Architecture plus élaborée (p. ex. <i>Belief-Desire-Intention (BDI)^a</i>). |
| Agent avec utilités | Cognitif | Extension de l’agent avec buts. L’utilité permet de mesurer l’attractivité d’un état et la satisfaction de l’agent ^b . Comportement de l’agent orienté vers la recherche de maximisation de l’utilité (p. ex., en cas de plusieurs actions possibles, l’agent choisit celle qui a la plus grande utilité). |
| Agent apprenant | Cognitif | Environnement inconnu. Intégration d’une fonction d’évaluation qui permet de mesurer les performances en cas de bonnes actions. Apprentissage en proposant des changements et de nouveaux buts pour améliorer les performances. Vision à moyen ou long terme. |

a. L’architecture Belief-Desire-Intention (BDI) (Croyance-Désir-Intention) est basée sur la philosophie de l’action [23] et permet de concevoir des agents intelligents. La croyance correspond aux connaissances internes de l’agent sur le monde (environnement) ou sur son propre état interne. Le désir fait référence aux états du monde et de l’agent qu’il aimerait voir réalisés. L’intention renvoie aux actions que l’agent a décider de réaliser.

b. *Utility is a function that maps the degree of satisfaction an agent gets from being in a given state of the system* [134].

mode de transport. L'individu choisira le mode ou la combinaison de modes qui maximise son utilité. Il sera possible de tenir compte des caractéristiques de l'individu (p. ex., âge, catégorie socio-professionnelle) et des attributs du mode de transport (p. ex., temps de parcours et coût) dans la définition de la fonction d'utilité. La capacité d'apprentissage dans un environnement inconnu est tout à fait pertinente dans notre cas étude dans la mesure où l'état du trafic peut évoluer en fonction des choix et des interactions (congestion) des agents et de l'offre de transport disponible (gratuité des transports publics ou l'interdiction de circulation de voiture dans une zone donnée). A travers une approche itérative, les agents peuvent donc apprendre de la réalisation de leurs activités (actions) pour effectuer des changements dans leurs choix.

La modélisation/simulation multi-agent² met en oeuvre des entités multiples ou agents (p. ex., des programmes informatiques, des robots) qui évoluent dans un environnement commun, conçu comme une entité particulière, dans lequel ils sont localisés (métrique de l'environnement) et interagissent selon certaines règles (lois) [145]. Cette définition demeure la plus répandue et est basée sur le paradigme de modélisation dit « centré-individu » [39]. Les auteurs [39] utilisent le concept « agent-individu »³ pour traduire cette formulation de la modélisation et simulation multi-agent. Ce type de simulation est de plus en plus utilisé dans l'étude de phénomènes (systèmes) complexes, la résolution de problèmes, et la conception de programmes [80].

Dans le cas des phénomènes complexes, la simulation multi-agent permet par exemple de reproduire les interactions existantes entre les éléments composant le phénomène (modélisé comme des agents), de prédire les évolutions possibles et expliquer les mécanismes du phénomène [6]. On cherche ici à expli-

2. Nous faisons ici la différence entre un modèle à base d'agents et un système multi-agent (SMA) qui nécessite la réunion de quatre éléments : l'agent, l'environnement, l'interaction et l'organisation [153]. Dans le cadre de cette étude, nous ne nous intéressons pas à l'organisation ou à la communication entre agents pour atteindre un objectif donné.

3. Les auteurs [39] utilisent aussi le concept « agent-modèle » pour illustrer une autre acception de la modélisation et simulation basée agent. Cette formulation consiste à utiliser l'approche des systèmes multi-agents (SMA) pour permettre l'intégration et la coopération de logiciels et de services autonomes. Dans ce cas, chaque composant du système est représenté par des agents-modèles qui assurent les interactions aussi bien à son niveau qu'avec les autres composants (agents) [39].

quer l'émergence de structures spatio-temporelles. Un domaine d'application emblématique est les gens et leurs mobilités et notamment le transport [47, 97] ou l'évacuation des personnes en cas d'urgence [120]. La simulation multi-agent est également de plus en plus utilisée pour l'optimisation des installations de capteurs pour une meilleure accessibilité à l'information dans un contexte de villes intelligentes (*smart cities*) [64].

2.1.2 Exemple d'application aux transports

Plusieurs travaux ont porté sur la modélisation du trafic routier notamment le mélange de différents modes de transports (p. ex., voitures privées, bus) avec les piétons par l'approche multi-agent. Ce choix se justifie principalement par le fait que la circulation routière implique des systèmes complexes microscopiques comme la gestion des intersections (feu de signalisation), la conduite automobile (suivi de voiture, changement de voie), l'interaction entre piéton et automobiliste, etc. La modélisation multi-agent permet donc de mieux décrire ces comportements et les caractéristiques microscopiques de chaque sous-système (p. ex., voitures, conducteur, piétons, feux tricolores) en détaillant les attributs et règles de communication. Nous présentons ici quelques travaux que nous avons étudiés.

Modélisation de comportement réel de conduite des usagers

Le trafic routier est constitué d'usagers disposant à la fois de véhicules variés et de comportements hétérogènes. Ainsi, cette différence de comportement entraîne souvent l'émergence de phénomènes collectifs lors des interactions entre usagers indépendamment des règles de régulation de trafic. Ces comportements sont très difficiles à modéliser dû notamment à leur caractère hétérogène. Mais cette modélisation est nécessaire afin de fournir au simulateur un aspect plus réaliste.

R. Mandiau et al. [98] font ressortir la coordination entre usagers dans une simulation du trafic routier à l'échelle d'une intersection. Les auteurs ont proposé une approche de résolution des conflits à base des matrices de décision des usagers (agents) dans une intersection. Le modèle résultant a été implémenté

dans le simulateur de trafic *ARCHISIM* [52].

A. Doniec et al. [47] ont proposé un modèle comportemental multi-agent basé sur des comportements personnels opportunistes de conducteurs capables de reproduire des phénomènes réels observés résultant d'interactions entre véhicules dans une intersection. Les agents sont autorisés à enfreindre certaines règles du Code de la route (p. ex., ne pas entrer dans une intersection si vous n'êtes pas sûr de pouvoir en sortir avec un seul mouvement) pour mettre en œuvre leur comportement opportuniste afin de satisfaire un désir donné. Le modèle a été implémenté également dans le simulateur *ARCHISIM*.

F. Ksontini et al. [88] ont également souligné que les véhicules de tourisme ou les véhicules à deux roues ne respectent souvent pas les marques de la route lorsqu'ils occupent des espaces, en particulier lorsque la circulation est dense ou encombrée. Ils ont eu recours à une approche d'approvisionnement comparatif [58] pour identifier les actions possibles offertes aux conducteurs par le réseau routier lorsqu'ils interagissent avec des entités perçues (p. ex., marquage routier, véhicule).

Modélisation de trafic mixte (interaction entre automobilistes et piétons)

La majorité des travaux de modélisation du trafic routier se sont focalisés dans un premier temps sur les interactions entre les voitures uniquement et l'infrastructure routière. Les interactions entre piétons et véhicules ou celles entre les différents modes de transport (p. ex., voiture, bus, tramway, métro) connaissent aujourd'hui un intérêt croissant chez les chercheurs, d'une part face au problème de sécurité qu'elles posent et, d'autre part, pour comprendre et faciliter la vie des usagers.

H. Fujii et al. [55] ont proposé un modèle de simulation à base d'agents permettant de simuler les interactions entre des piétons, des véhicules et le tramway. Ce modèle fait suite à leur précédent travail qui a porté uniquement sur la simulation des véhicules [155]. Les auteurs ont voulu simuler l'impact de l'extension d'une ligne de tramway dans une ville. Ainsi, ils ont défini un modèle à base d'agent pour chaque mode de transport. En ce qui concerne les interactions entre les usagers, les auteurs considèrent que les piétons interagissent

uniquement avec les voitures et les tramways que sur les passages pour piétons. Le modèle de simulation présenté est simpliste, mais il permet d'évaluer l'impact de modifications de l'infrastructure routière comme l'extension d'une ligne de tramway.

Simulation de l'impact des nouvelles formes de mobilité

De nos jours, nous assistons de plus en plus à l'émergence de nouvelles possibilités (modes) de déplacement comme les véhicules partagés, les navettes autonomes. La mobilité à la demande est une solution aux problèmes de congestion et de stationnement dans les grandes villes. En effet, elle est plus flexible et permet de diminuer considérablement l'importance d'avoir des véhicules individuels surtout chez les jeunes générations.

Le concept de « robots-taxis » comme système autonome et de service de mobilité partagée a été introduit dans [3]. Le modèle de combinaison de transport à la demande et de véhicule autonome a été implémenté dans le simulateur *SUMO*. A travers les simulations effectuées, les auteurs ont ainsi démontré qu'avec 9 500 véhicules robotisés de 6 places, il est possible de résoudre le problème de congestion et d'émission de gaz dans la ville de Milan en Italie. Une étude similaire a été menée dans [72] pour estimer la flotte de véhicules autonomes nécessaire pour satisfaire une demande de service de transport à la demande (TAD). Les auteurs ont utilisé le simulateur multi-agent *MATSim* [75].

L'impact des nouveaux modes de transport a été analysé à travers une approche générique à base d'agents [61]. Les auteurs ont utilisé un simulateur générique *GAMA* [62] pour proposer un cadre de simulation dans lequel il est possible d'implémenter divers modes de déplacement. Le modèle prend en compte trois modes de transport à savoir les transports non motorisés, les transports en commun et les transports motorisés individuels. Il prend en compte également les profils des usagers (p. ex., étudiant, travailleur, retraité) et les facteurs comme le coût, le temps de déplacement pour le choix du mode de transport. Une implémentation du modèle a été effectuée sur la base des données de la ville de Cambridge (Royaume-Uni).

Simulation de politiques publiques de mobilité

Comme évoqué précédemment (section 1.3), un des avantages de la simulation est la possibilité d'expérimenter différents scénarios relatifs à une question du système de référence (p. ex., les comportements de déplacements des individus face une mesure de mobilité) sans les réaliser concrètement. S. Pageaud et al. ont proposé une architecture générique fondée sur l'approche multi-agent (*SmartGov* [117]) permettant à la fois la conception et l'évaluation de politiques publiques de mobilité [119]. Cette architecture utilise deux échelles de modélisation en fonction des différentes entités du système. Une approche microscopique est utilisée pour modéliser les usagers dans leur comportement de mobilité qui est basé sur la recherche de maximisation de l'utilité (agent basé utilité). Tandis que les actions des politiques publiques sont analysées de manière macroscopique. L'outil de simulation utilisé est *Repast Symphony* [110]. Comme cas d'étude, les auteurs ont évalué différentes configurations du système de tarification du stationnement en centre-ville pour orienter les usagers dans la recherche de places de parkings. Grâce à sa genericité, *SmartGov* constitue donc un cadre de simulation parfaitement extensible pour expérimenter différentes politiques de mobilité. L'ajout de ces fonctionnalités complémentaires peut nécessiter cependant une charge de travail importante surtout pour des utilisateurs peu familiers avec la plateforme.

Le *Tableau 2.2* présente un résumé des travaux étudiés sur la modélisation à base d'agent du transport. Comme on peut le voir, aucun de ces travaux n'a porté sur l'intermodalité de façon spécifique. Il existe bien des études sur la multimodalité [55, 61] ou sur les nouvelles formes de mobilité grâce notamment aux véhicules autonomes [72, 3]. Au regard de son importance et des espoirs qu'elle suscite pour réduire les externalités négatives des systèmes de transport, une étude sur la modélisation et la simulation de l'intermodalité est donc pertinente et justifiée. La réalisation d'une telle étude nécessite de générer une demande et une offre de transport adéquates pour simuler les comportements de déplacement intermodal.

TABLEAU 2.2 – Présentation de quelques modèles à base d’agents du transport.

| Modèle | Problème traité | Approches utilisées | Simulateur utilisé |
|--|--|---|------------------------------|
| Coordination entre agents [98] | Conflits entre véhicules dans une intersection | Matrices de décision | <i>ARCHISIM</i> [52] |
| Comportement réel des conducteurs à une intersection [47] | Interactions entre véhicules dans une intersection | Comportements personnels opportunistes | <i>ARCHISIM</i> |
| Occupation réelle de la route [88] | Non respect des marques de la route dans l’occupation des espaces | Approvisionnement comparatif [58] | <i>ARCHISIM</i> |
| Trafic mixte [55] | Interaction entre piéton, voiture, tramway | Modèles de route en continu, GSM [68], DCM [4] | <i>MATES</i> [155] |
| Nouveaux modes de transport [61] | Multimodalité | Fonction de coût basé sur le profil de l’usager | <i>GAMA</i> [62] |
| Transport à la demande et véhicules autonomes [72] | Estimation d’une flotte de véhicules autonomes pour satisfaire une service de transport à la demande | Utilisation d’un modèle de choix discret pour le choix modal | <i>MATSim</i> [75] |
| Système autonome et de service de mobilité partagée [3] | Congestion, pollution | Concept de « Robots-taxis » | <i>SUMO</i> [95] |
| Couplage de systèmes de transports avec les gestionnaires de politiques publiques de mobilité [117, 118] | Evaluation de politiques publiques de mobilité | Architecture générique combinant deux niveaux de modélisation à base d’agents (microscopique avec des agents basés utilités et macroscopique pour l’analyse des politiques à travers un une technique d’apprentissage par renforcement) | <i>Repast Symphony</i> [110] |

2.2 Génération de la demande de déplacement

L'estimation ou la prévision de la demande de déplacement est capitale pour la définition de l'offre de services de transport pour la satisfaire. C'est une des préoccupations centrales des autorités en charge de la mobilité et des transports. Dans cette section, nous présentons d'abord le modèle historique à quatre étapes qui permet d'avoir une idée plus globale de l'analyse des systèmes de transport. Ensuite, nous évoquons les différentes approches pour générer une demande multi-agent de déplacement.

2.2.1 Le modèle traditionnel à quatre étapes

Le modèle à quatre étapes (four-step model (FSM)) a été longtemps et continue d'être un des principaux outils de prévision de la demande et des performances futures d'un système de transport [100]. L'objectif principal de ce modèle est de trouver un équilibre entre la demande et l'offre de transport. Comme son nom l'indique, le modèle est composé de quatre étapes hiérarchisées : la génération, la distribution, le choix modal et l'affectation.

La **génération** consiste à déterminer le nombre total de déplacements dans la région d'étude pour une période de temps donnée. Elle vise à mesurer la propension de la population à se déplacer. Elle répond à la question : combien de déplacements à effectuer ? Pour ce faire, la région d'étude est découpée en plusieurs zones d'intérêt correspondant aux zones de production (p. ex., les quartiers résidentiels) et d'attraction (p. ex., les zones commerciales et industrielles). Ensuite, les déplacements sont regroupés dans ces zones. Les modèles de génération se basent généralement sur des données socio-économiques ou démographiques sous forme agrégée. A la fin de cette étape, on obtient un tableau avec les flux pour chaque zone.

La **distribution** permet de calculer la matrice Origine/Destination (O/D) des flux pour chaque zone de production et d'attraction de déplacements. Elle répond à la question : vers quelle destination ? Elle permet de faire la mise en correspondance des déplacements en provenance et à destination pour chaque zone. Le résultat obtenu à la fin de cette étape est une matrice carrée d'ordre n .

Où n est le nombre de zones d'intérêts.

Le **choix modal** correspondant au choix entre les différents modes de transports disponibles. Il répond à la question : par quel mode de transport ? Pour répondre à cette question, les modèles de choix modal se basent sur les données de mobilité qui permettent de renseigner sur les pratiques modales. Ces données sont la plupart désagrégées à l'échelle de l'individu ou du ménage. La matrice O/D issue de la distribution est subdivisée en plusieurs sous-matrices carrées pour correspondre au nombre d'alternatives de transport disponibles. Par exemple, si le nombre de modes de transport disponibles est de trois (p. ex., voiture, transports publics et vélo), alors il y aura trois sous-matrices correspondant respectivement aux flux (O/D) des déplacements en voiture, en TP et à vélo.

L'**affectation** vise à calculer les itinéraires des différents déplacements de la demande sur le réseau routier en fonction du mode de transport utilisé. Le calcul est généralement basé sur la détermination du chemin le plus court. Elle répond à la question : par quel itinéraire (route) ? C'est à cette étape que le modèle cherche à trouver un équilibre entre la demande et l'offre. Le principal indicateur d'évaluation est le temps de parcours. Ainsi, plusieurs décisions d'affectation sont effectuées jusqu'à atteindre un équilibre système où il n'est plus possible d'améliorer les temps de parcours.

Cette approche de modélisation de la demande de déplacement permet de recueillir les besoins réels et futurs en termes de mobilité de la population. Elle permet aussi d'identifier les zones de production et d'attraction des déplacements. En se basant sur le choix modal des individus, le modèle à quatre étapes permet de savoir si l'offre de transport est adaptée ou non à la demande. Il permet d'avoir une idée sur les temps de parcours dans une région donnée. La prise en compte des zones d'études à des échelles plus importantes comme les régions ou le pays entier, constitue également un des avantages des modèles à quatre étapes.

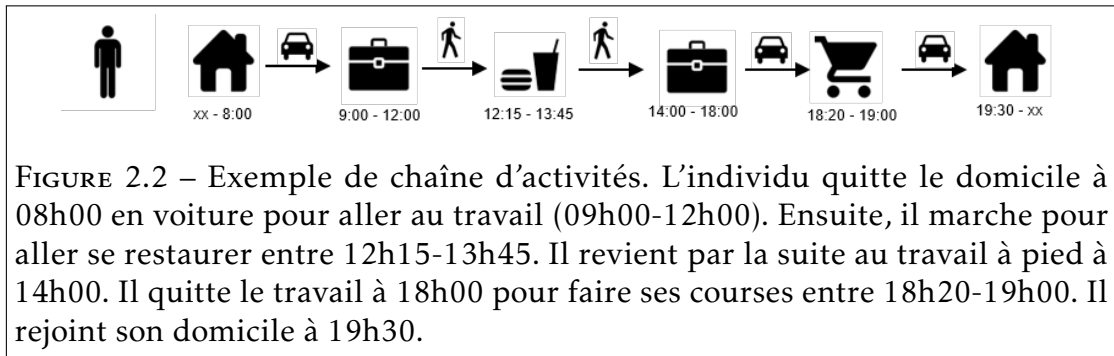
Les modèles à quatre étapes présentent néanmoins cinq limites qui peuvent être résumées comme suit :

- La première limite relative au caractère séquentiel ou itératif du modèle. Il faut attendre la fin d'une étape pour passer à la suivante. Cette limite

contraignante augmente le temps de construction du modèle.

- Le manque de finesse dans la définition spatiale (O/D connues qu'à l'échelle de la zone d'intérêt) et temporelle (période de temps bien déterminée notamment les heures de pointe) est également un frein pour se rapprocher de la réalité. En effet, l'intégration des coordonnées XY des O/D à l'échelle de l'activité et des heures (p. ex., toute la journée) des déplacements permettra de reproduire des situations plus réalistes de transport. Pour résoudre ce problème, il faudra générer des matrices O/D pour chaque coordonnée et heure de la journée, ce qui est quasi impossible et peu productif.
- Les modèles à quatre étapes sont fondés sur l'approche *trip-based* qui considère chaque déplacement effectué par l'individu indépendamment. Or en général, l'individu raisonne en chaîne de déplacements en fonction des activités à réaliser dans la journée. On considère donc l'ensemble des déplacements à effectuer de l'origine et du retour au domicile en formant une boucle (*tour-based*). Un exemple de chaîne de déplacements/activités est présenté à la Figure 2.2. L'approche *tour-based* permet de tenir compte du poids du premier choix de mode de transport sur l'ensemble de la boucle. Contrairement à l'approche *trip-based* qui ne tient pas compte de la contrainte de disponibilité du premier choix de mode de transport à la destination finale du déplacement [148]. Une approche à base d'activités (*activity-based approach*) permettrait de compléter le modèle [129, 101, 60]. Il sera donc possible de tenir compte du motif de déplacement qui un élément central dans le processus de prise de décision individuelle (p. ex., choix modal, choix d'itinéraire) [8].
- Avec les nouveaux services (p. ex., covoiturage, vélo en libre service) et possibilités (p. ex., intermodalité) de déplacement, les modèles à quatre étapes deviennent obsolètes pour prendre compte les comportements de mobilité induits par ces possibilités.
- Le dernier point (une des conséquences des précédentes limites) est l'absence de données en sortie du modèle pour permettre une analyse plus fine des systèmes de transport. Les seules informations sont produites de manière globale (matrices) et ne renseignent pas sur les pratiques de

déplacements des individus.

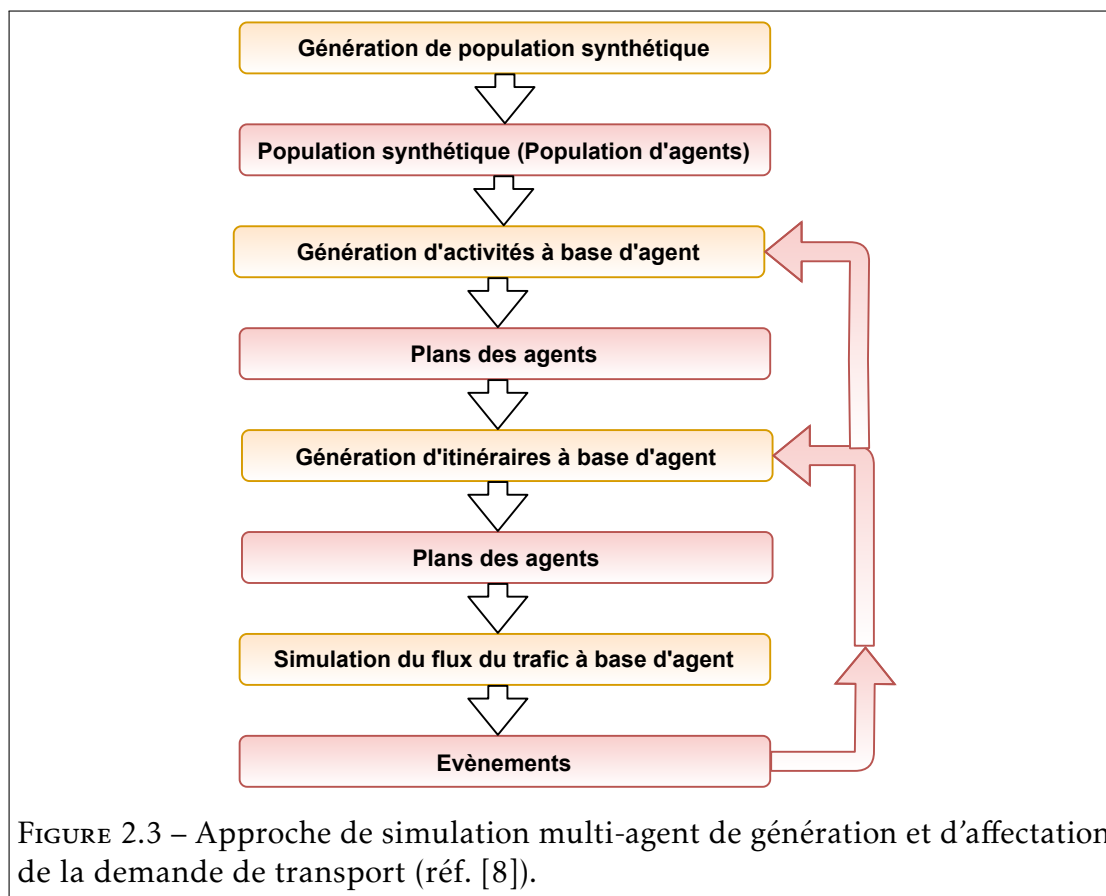


Face aux limites soulevées par les modèles à quatre étapes, il est important de développer de nouvelles méthodes/approches ou de les combiner pour mieux analyser les systèmes de transport. La combinaison des approches à base d’activités et des modèles multi-agents est donc une alternative viable et intuitive pour adresser les problèmes actuels de mobilité [8, 75].

2.2.2 Génération de la demande de transport multi-agent

La demande de transport multi-agent est fondée sur deux approches : activité et agent. L’approche à base d’activité permet de générer une demande de transport désagrégée en tenant compte de la dimension spatio-temporelle des chaînes d’activités pour chaque individu [129, 101]. Grâce à la simulation multi-agent, il est possible de reproduire les déplacements pour réaliser ces chaînes d’activités, lesquelles sont intégrées dans les attributs de l’agent (représentant ici l’usager). Un cadre schématique de génération et d’affectation de la demande de transport à base d’agent a été proposé dans [8] (Figure 2.3).

La première étape consiste à générer une population synthétique avec certaines caractéristiques de façon à représenter (quantitativement et qualitativement) la population réelle de la région d’étude. Ces caractéristiques dépendent en général du sujet d’étude. Par exemple, pour le cas de la demande de transport, on va chercher à générer une population synthétique avec les caractéristiques socio-démographiques (p. ex., âge, genre, CSP), les chaînes d’activités, l’équipement pour la mobilité (p. ex., permis de conduire, ticket ou abonnement de



TP, nombre de voitures et de vélos). Ensuite, on génère pour chaque individu (agent) une chaîne d'activités quotidiennes (p. ex., domicile travail, éducation, loisir, achats) avec les localisations et horaires pour chaque activité. Chaque agent dispose de plans qui va contenir ses chaînes d'activités ainsi que le mode de transport à utiliser et l'itinéraire à suivre pour réaliser chaque activité. L'exécution des plans génère du trafic qui va être simulé (souvent de façon itérative afin de permettre aux agents d'améliorer les temps de parcours). Ce changement peut engendrer la modification du plan des agents (p. ex., changement de leur heure de début ou de l'itinéraire à suivre). A la fin de la simulation, sont produits des fichiers historiques qui renseignent sur les actions effectuées (p. ex., le début de l'activité, le mode utilisé et le chemin suivi pour un agent donné).

Comme on peut le voir, la qualité d'une simulation multi-agent de la demande de transport repose sur la génération de la population synthétique et par

ricochet aux données d'entrée. Le développement de tels modèles de simulation nécessite en effet en entrée l'utilisation de données désagrégées (très fines) relatives à la population (p. ex., utilisation des modes de transport et préférences des individus) et à l'offre de transport (p. ex., les horaires et arrêts des transports publics et le réseau multimodal). La Figure 2.4 présente le flux des données d'entrée/sortie à chaque étape d'un tel modèle. En général, ce sont les données

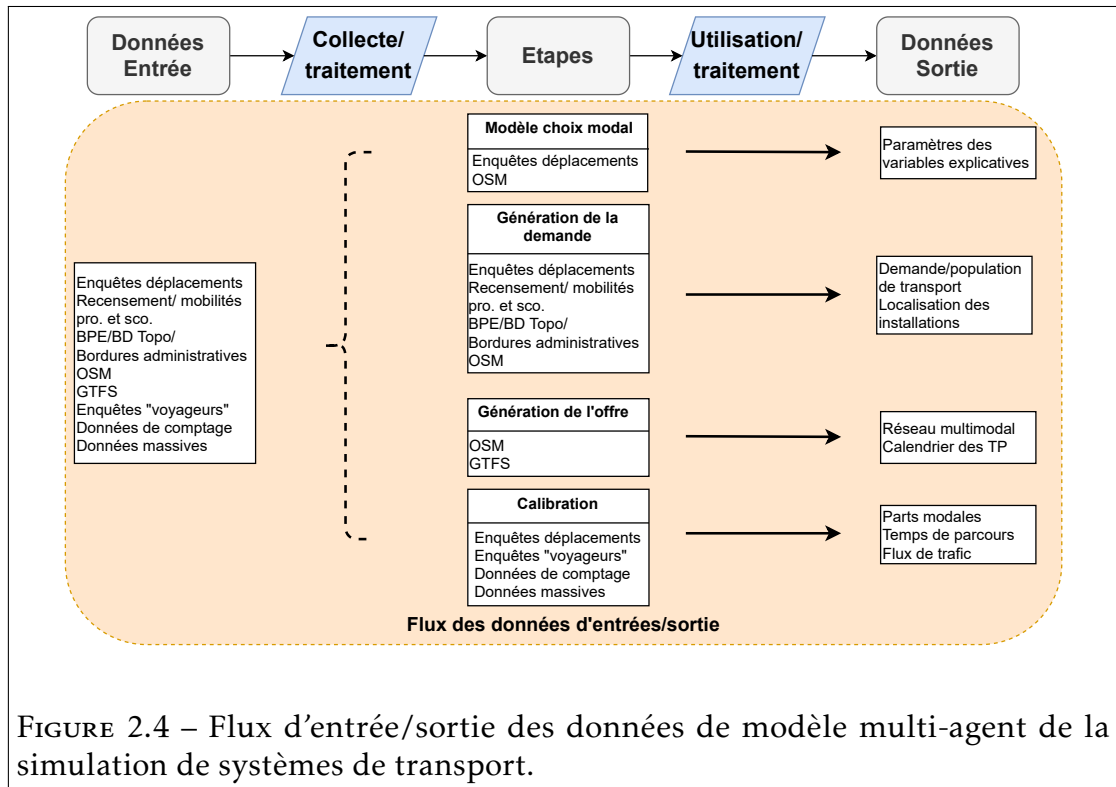


FIGURE 2.4 – Flux d'entrée/sortie des données de modèle multi-agent de la simulation de systèmes de transport.

de l'enquête de déplacements (précisément les EMD) qui sont les plus souvent utilisées pour l'estimation des modèles de choix modaux et la génération des demandes de transport pour la simulation. En effet, c'est la seule source de données disponible qui permet d'informer sur les pratiques réelles de déplacements notamment le choix du ou des modes de transport effectivement utilisés. Il est également possible de croiser/fusionner plusieurs sources de données comme le recensement avec l'enquête de déplacement, les données géographiques locales pour obtenir une source de données plus complète et représentative dans le cas de la génération de la demande de transport (voir [71]).

Suite à l'identification et la collecte des différentes sources de données disponibles, il est nécessaire d'effectuer un certain nombre de traitements pour rendre ces données utilisables pour la construction des modèles. Ces traitements peuvent passer par le tri, le nettoyage et la reconstruction des informations manquantes. Par exemple, pour estimer les modèles de choix discret, il faut reproduire les temps de parcours pour chaque alternative (mode de transport). Pour ce faire, il faut générer les coordonnées XY des origines/destinations des déplacements.

Chaque modèle construit produit à son tour des données qui vont servir à réaliser la simulation. Ainsi, à partir des données OSM, nous allons générer un réseau de transport multimodal synthétique pour mettre en interaction les individus (agents) avec les différents modes de transport. L'utilisation de ces modes est fonction d'un modèle de choix discret dont les paramètres ont été estimés précédemment.

Il existe différentes méthodes pour générer cette représentation de la population en fonction des objectifs recherchés et des données disponibles. Une revue des méthodes durant ces dernières années a été faite dans [36] pour la simulation sociale et [103] pour la modélisation des transports. Ces méthodes peuvent être regroupées en trois catégories : la reconstruction synthétique, l'optimisation combinatoire et l'apprentissage statistique [139]. La reconstruction synthétique consiste à créer un échantillon de la population réelle en représentant les individus synthétiques sous forme de vecteurs d'attributs [13]. Les approches combinatoires visent à tirer des individus d'un échantillon afin de satisfaire un critère de *fitness* [152]. Dans les méthodes d'apprentissage statistique, la structure de la population est codée en tant que modèle probabiliste [76].

Dans le domaine de la génération de la demande de transport pour la simulation multi-agent, on utilise généralement un sous-échantillon de la population réelle [48]. Ce sous-échantillonnage s'explique principalement par le temps de calcul qui peut être très important. Pour ce faire, les approches de reconstruction synthétique sont couramment utilisées pour générer la demande de transport [106]. Les algorithmes les plus utilisés sont : *Iterative Proportional Fitting (IPF)* [43] et *Hierarchical Iterative Proportional Fitting (HIPF)* [105]. Il faut signaler ici,

que les travaux actuels sur la simulation multi-agent du transport se basent sur des méthodes ad-hoc pour générer la demande de déplacement. Cette situation s'explique généralement par l'hétérogénéité et la qualité des données utilisées [36]. Par exemple, en Allemagne et en Suisse, les données de mobilité sont assez représentatives de la population. Elles contiennent également des informations spatiales à l'échelle individuelle. Ainsi, pour générer la demande de déplacement, il est possible d'utiliser directement ces données [156]. Par contre, en France, les données de mobilité représentent entre 0,8% et 1% de la population réelle. Elles ne contiennent pas non plus la localisation des domiciles, ni les O/D des déplacements. Une approche combinatoire statistique des données désagrégées et agrégées a été faite pour générer la demande de transport pour la ville de Paris et l'île de France [71]. Les données désagrégées concernent le recensement de la population (assez représentative, avec environ 20%), de la mobilité, de la localisation des équipements et les données agrégées, les revenus par commune, les flux des déplacements professionnels et scolaires, etc.

2.2.3 Estimation du choix modal de transport

Le choix modal correspond à la troisième étape du modèle historique à quatre étapes. Il permet de déterminer les flux pour chaque mode de transport. Le choix du mode de transport est essentiellement fondé sur les modèles de choix discret [96, 100]. En effet, ces modèles tiennent compte de la dimension humaine pour décrire, expliquer et prédire les choix entre deux ou plusieurs alternatives discrètes. Ils trouvent leur origine dans les sciences sociales, plus précisément en Economie. Pour une introduction complète aux modèles de choix discret avec simulations, le lecteur pourra se référer à l'ouvrage de *Train* [144]. Nous présentons ici les bases pour comprendre ces modèles dans la détermination du choix de mode de transport.

Les modèles de choix discret spécifient la probabilité qu'un individu choisisse une alternative parmi un ensemble donné. Cette probabilité est une fonction des variables observées liées aussi bien aux alternatives qu'à l'individu. En général, les modèles de choix discret sont basés sur la notion d'**utilité aléatoire** qu'un individu i a pour une alternative (mode de transport dans notre cas) m [18].

Soient $U_{i,m}$ et $U_{i,n}$ les utilités perçues par i pour m et n respectivement, i choisira m au lieu de n si et seulement si $U_{i,m} > U_{i,n}$. L'utilité aléatoire permet d'examiner le choix effectué par l'individu du point de vue du chercheur (modélisateur). C'est une fonction de **variables explicatives** observées par le chercheur, composées des caractéristiques de l'individu (p. ex., CSP et âge) et des attributs de l'alternative (p. ex., temps de parcours et coût de transport) à laquelle on ajoute un **terme d'erreur**. Linéairement, elle se définit comme suit :

$$U_{im} = \beta \cdot z_{im} + \varepsilon_{im} \quad (2.1)$$

où :

- U_{im} est une fonction dans \mathbb{R} ;
- z_{im} est un vecteur de variables explicatives observées relatives à l'alternative m pour l'individu i qui dépend des attributs x_{im} de l'alternative, interagissant avec les caractéristiques s_i de l'individu, de sorte qu'il peut être exprimé comme $z_{im} = z(x_{im}, s_i)$ pour une fonction numérique z donnée (fonction linéaire dans la plupart des cas);
- β est un vecteur correspondant aux coefficients (valeurs de paramètres) des variables observées;
- $\beta \cdot z_{im}$ est le produit des variables explicatives pondérées par les coefficients de β .
- ε_{im} est le terme d'erreur qui permet entre autres de tenir compte de la nature aléatoire du comportement humain, du manque d'informations plus précises (aspects culturels et subjectifs) dans la prise de décision (individuelle) et les attributs non observables (p. ex., mauvaise expérience de l'utilisation d'une alternative) des alternatives par le modélisateur.

La probabilité de choisir l'alternative m au lieu de n est donc :

$$\begin{aligned} P_{im} &= \Pr(U_{im} > U_{in}) \\ &= \Pr(\beta z_{im} + \varepsilon_{im} > \beta z_{in} + \varepsilon_{in}) \\ &= \Pr(\varepsilon_{in} - \varepsilon_{im} < \beta z_{im} - \beta z_{in}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

Étant donné β , la probabilité de choix est la probabilité que les termes aléatoires $\varepsilon_{in} - \varepsilon_{im}$ soient inférieurs aux quantités $\beta z_{im} - \beta z_{in}$. Différents modèles de choix discret découlent de différentes distributions de probabilité de ε_{im} pour tout m et de différents traitements de β .

En général, les termes d'erreurs sont rapprochés soit par une **loi normale**⁴ pour les modèles *Probit* (corrélation possible entre les alternatives), soit par une **loi ou distribution de Gumbel**⁵ pour les modèles *Logit* (pas de corrélations supposées entre les alternatives). Dans la littérature, les modèles les plus utilisés dans la modélisation des systèmes de transport sont les modèles *Logit Multinomial* (MNL) qui sont des modèles *Logit* à plus de deux alternatives [143, 18]. Ce choix se justifie principalement par la facilité de calcul des probabilités de choix offerte par ces modèles.

$$P_{im} = \Pr \left(\bigcap_{n \neq m} \varepsilon_{in} - \varepsilon_{im} < \beta z_{im} - \beta z_{in} \right) \quad (2.3)$$

$$= \frac{e^{\beta z_{im}}}{\sum_{n=1}^N e^{\beta z_{in}}}$$

Où N est le nombre total d'alternatives.

Le principal inconvénient des modèles MNL est la non prise en compte des relations entre les alternatives qui peut être préjudiciable à la qualité du modèle. Ces modèles supposent qu'il n'y a pas de corrélation entre les facteurs non observés et les alternatives (propriété *Independence of Irrelevant Alternatives (IIA)*). Cependant, dans certaines situations, cette substitution parmi les alternatives n'est toujours pas réaliste. L'exemple le plus couramment utilisé pour illustrer cette inconsistance des modèles *MNL* est le paradoxe des bus rouges et bleus [17]. Supposons qu'un usager fasse un choix équitable entre deux modes de transport : la voiture et le bus rouge. Le rapport de probabilités entre ces deux

4. La loi normale encore appelée loi de Gauss ou de Laplace-Gauss est une loi de probabilité absolument continue dépendant de deux paramètres : sa moyenne et son écart-type et dont la densité est symétrique.

5. Une loi de Gumbel est une loi de probabilité continue définie par la donnée de sa moyenne et son écart-type. Contrairement à la loi normale, la densité d'une loi de Gumbel peut ne pas être symétrique.

modes est donc égal à 1 : 1. Considérons maintenant une troisième alternative : le bus bleu. Si l'utilisateur n'est pas sensible à la couleur du bus, la probabilité de la voiture reste inchangée 0,5 ; tandis que la probabilité de chacun des deux types de bus serait de 0,25. Cependant, la propriété *IIA* exige de considérer le bus bleu comme une alternative à part entière indépendante du bus rouge. Ainsi, les nouvelles probabilités selon cette propriété sont : voiture 0,33, bus rouge 0,33 et bus bleu 0,33. La probabilité globale de déplacement en voiture est passée de 0,5 à 0,33, ce qui est absurde.

Les modèles *Nested Logit* (Logit emboîté) et *Mixed logit* (MXL) permettent de prendre en compte ce manquement par l'introduction des patterns de corrélations entre les différentes alternatives [100]. Concrètement dans l'exemple précédent, le modèle *NL* allait tenir compte de la relation entre les deux bus (rouge et bleu) et créer un nid *bus* avec une probabilité de choix de 0,5 au même titre que la voiture. Les deux bus rouge et bleu seront considérés comme des substituts.

Durant, notre recherche bibliographique sur l'estimation des choix de mode de transport, nous avons trouvé qu'un seul travail qui porte sur les combinaisons de modes de transport [87]. Les auteurs ont utilisé un modèle multinomial de type *Nested Logit* (Logit emboîté) donc la structure est présentée en Figure 2.5.

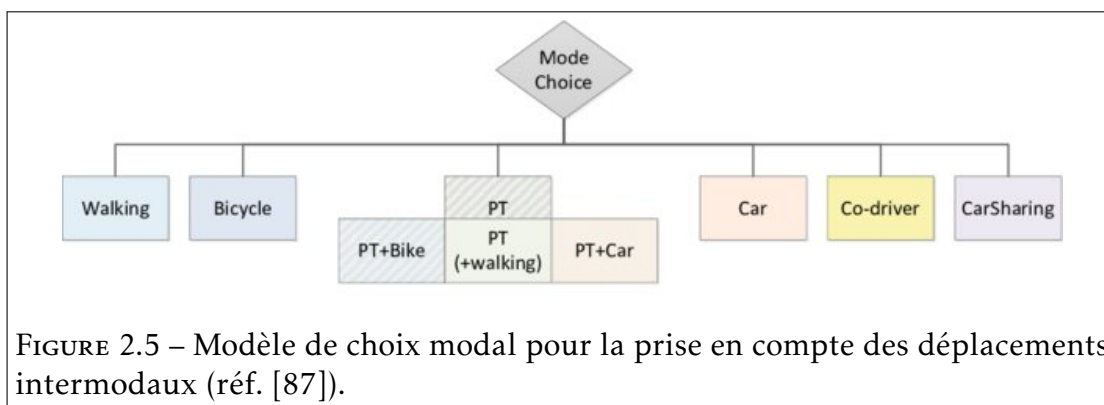


FIGURE 2.5 – Modèle de choix modal pour la prise en compte des déplacements intermodaux (réf. [87]).

Ce modèle considère les transports publics (TP) comme le mode principal avec l'un des modes marche, vélo ou voiture personnelle comme mode d'accès/de sortie secondaire. L'objectif de cette représentation est de tenir compte des évolutions de l'offre de transports publics qui est au coeur des systèmes de

transport intermodal. Il permet ainsi de mesurer les impacts de cette offre sur les principaux modes secondaires, le vélo et la voiture utilisés pour les combinaisons modales avec les TP.

Nous avons également exploité le guide du CEREMA sur la conception des modèles de choix modal [33]. Ce guide préconise pour la prise en compte du parking relais (P+R) pour la combinaison VP+TP. Pour ce faire, la fonction d'utilité doit être décomposée en trois parties :

- l'utilité spécifique de la voiture pour le trajet Origine-Parking relais ;
- l'utilité propre du P+R composée par exemple du coût du stationnement et du temps de correspondance VP/TP ;
- l'utilité des TP pour le trajet entre le P+R et la destination.

La fonction d'utilité (VP+TP) sera donc la somme de ces trois utilités. Les auteurs suggèrent également un modèle emboîté au niveau des TP. Le guide pointe du doigt aussi l'insuffisance des observations pour ces types de pratiques dans les données de déplacements actuelles (EMD, ENTD). Ainsi, il sera difficile pour l'instant d'estimer ces types de modèles.

Pour estimer les modèles de choix discret, on se base généralement sur la méthode du **maximum du log vraisemblance** (*Maximum Likelihood*). Supposons un échantillon d'observations du choix de I individus. La fonction de vraisemblance peut s'écrire :

$$L_I(\beta) = \prod_{i=1}^I P_i \quad (2.4)$$

Où P_i est la probabilité pour i de choisir l'alternative réellement choisie.

$$L_I(\beta) = \prod_{i=1}^I \prod_{n=1}^N (P_{ni})^{y_{in}} \quad (2.5)$$

Où $y_{in} = 1$ si i choisit n et $y_{in} = 0$ dans le cas contraire.

Dans le cas du modèle logit (distribution de Gumbel),

$$P_{in} = \frac{e^{(\beta' z_{in})}}{\sum_{m=1}^N e^{(\beta' z_{im})}}$$

Le principe du maximum de vraisemblance est de trouver les valeurs (coefficients) du vecteur de paramètres β' de sorte à maximiser L_I . L'approche la plus couramment utilisée consiste à maximiser le logarithme de L_I d'où l'appellation **maximum du log vraisemblance**. L'utilisation du logarithme n'a pas d'impact sur les valeurs des paramètres et permet de simplifier les calculs en passant d'un produit à une somme.

$$L_I(\beta) = \prod_{i=1}^I \prod_{n=1}^N (P_{ni})^{y_{in}} \quad \ln \Rightarrow \quad \mathcal{L}(\beta) = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N y_{in} \ln P_{in}$$

$$\mathcal{L}(\beta) = \sum_{i=1}^I \sum_{n=1}^N y_{in} (\beta' z_{in} - \ln \sum_{m=1}^N e^{\beta' z_{im}}) \quad (2.6)$$

Le problème de maximisation du log de vraisemblance devient alors :

$$\hat{\beta}_I = \underset{\beta}{\operatorname{argmax}}(\mathcal{L}(\beta)) \quad (2.7)$$

Il existe différentes méthodes de résolution comme la recherche linéaire avec notamment la méthode de Newton-Raphson [19], l'algorithme BHHH (Berndt–Hall–Hall–Hausman) [20] et la méthode de Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno (BFGS) [25].

Ces différents calculs peuvent être très complexes à faire manuellement. Fort heureusement, il existe de nombreux logiciels pour estimer les modèles de choix discret. Il s'agit pour la plupart des logiciels de Statistiques et d'Econométrie. Un résumé des trois logiciels les plus couramment utilisés est proposé dans [90]. Le Tableau 2.3 donne un aperçu des fonctionnalités de modélisation des trois

logiciels.

TABLEAU 2.3 – Récapitulatif des fonctionnalités de modélisation des trois principaux logiciels d’estimation de modèles de choix discret [90].

| Logiciels | MNL | MXL | Classe latente ^a | MXL bayesian | G-MNL ^b |
|----------------------|-----|-----------------|-----------------------------|--------------|--------------------|
| Nlogit ^c | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |
| Stata ^d | ✓ | UW ^e | UW | UW | UW |
| Biogeme ^f | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |

a. Les modèles à classe latente et G-MNL permettent de tenir compte à la fois des attributs l’individu et de l’hétérogénéité des préférences.

b. GMNL : generalised multinomial logit.

c. <https://www.limdep.com/products/nlogit/>

d. <https://www.stata.com/>

e. UW : user written (commandes écrites par l’utilisateur)

f. <https://biogeme.epfl.ch/>

Nlogit et *Stata* sont des logiciels génériques commerciaux de Statistiques. Ils présentent plus de facilité d’utilisation avec notamment une interface graphique pour *Nlogit*. *Biogeme* est issu d’un programme de recherche et destiné à l’estimation des modèles de choix discrets. Il est donc gratuit et disponible en *open source* (code en Python). Il est plus couramment utilisé dans les sciences de l’Economie des transports. Cependant, il faut plus de temps à un utilisateur non expérimenté pour apprendre et utiliser efficacement le logiciel.

Dans le cadre de notre travail, nous avons fait le choix d’utiliser *Biogeme* pour l’estimation des modèles de choix discret. Ce choix se justifie principalement par l’adaptation de cet outil pour l’estimation des modèles destinés à prédire le choix du mode de transport [50]. En outre, le logiciel est gratuit et open-source permettant ainsi l’ajout de fonctionnalités personnalisées.

Une fois toutes les étapes de génération d’une demande de transport multi-agent réalisées, il faudrait utiliser un outil de simulation pour perturber le modèle (interaction entre la demande et l’offre). De nos jours, il existe une pléthore de logiciels ou plateformes de simulation multi-agent et le choix du bon outil peut s’avérer être une tâche assez difficile. La section suivante décrit l’approche que nous avons suivie pour le choix de notre outil de simulation.

2.3 Choix de l'outil de simulation

Comme déjà évoqué, nous ambitionnons de construire un cadre de simulation multi-agent capable de simuler un système de transport intermodal et les comportements dynamiques des usagers. Deux possibilités s'offrent à nous :

- Soit de développer un simulateur à partir de zéro pour répondre à nos besoins. Dans ce cas, nous devrions implémenter toutes les fonctionnalités du simulateur de A à Z.
- Soit de partir d'un outil de simulation existant pour y intégrer les fonctionnalités souhaitées. A ce niveau, deux cas de figure sont possibles : i) personnaliser (sans avoir accès au code source) les paramètres des agents et les configurations de base d'un simulateur existant afin de répondre à nos exigences, ii) étendre (supposant un accès au code source) un simulateur existant en modifiant et/ou en développant les fonctionnalités dont nous avons besoin.

Une analyse des deux possibilités a permis d'orienter notre choix vers la deuxième solution dans le cadre de notre étude. En effet, le développement d'un nouvel outil de simulation demanderait trop de ressources humaines et nécessiterait plus de temps. En outre, il existe actuellement des plateformes multi-agents « open source » spécifiques au trafic routier ou plus génériques qui pourraient être adaptées à notre situation. Il est donc plus judicieux de partir d'un de ces outils pour développer un simulateur plus spécifique à nos besoins. Dans ce qui suit, nous présentons un aperçu des outils de simulations de systèmes de transport et notre approche de comparaison pour en choisir un. Ce travail a été présenté à la 13ème conférence internationale *ICAART (International Conference on Agents and Artificial Intelligence)* [46].

2.3.1 Les études comparatives des simulateurs de systèmes de transport

Divers travaux ont porté sur l'étude des outils de simulation de système de transport soit de manière générale [133, 85, 154], soit pour choisir un simulateur pour un cas spécifique [51, 116, 57]. Ces études peuvent être regroupées

en deux groupes : les méthodes de comparaison qualitatives et les approches quantitatives.

Les approches qualitatives sont fondées sur la capacité des logiciels à satisfaire certains critères de comparaison comme la nature du logiciel (p. ex., gratuit, *open source*), la documentation, la communauté d'utilisateurs, la création de réseau de transport, la qualité de la simulation (p. ex., réalisme de la visualisation), la mise à l'échelle notamment pour les grandes zones d'études et l'ajout de fonctionnalités complémentaires.

Le travail réalisé dans [51] compare des simulateurs de trafic afin de choisir le plus fiable et adapté pour permettre aux chercheurs de simuler le trafic routier dans l'EDSA (Epifanio de los Santos Avenue) à Manille (Les Philippines)⁶. Les auteurs utilisent l'approche de comparaison proposée dans [85]. Les simulateurs étudiés sont *Matsim*, *SUMO*, *Aimsun* et *PTV Vissim*. Les conclusions tirées par les auteurs ne sont pas suffisamment précises pour guider le choix d'un modélisateur donné dans le choix d'un simulateur de trafic pour des cas particuliers différents.

Les autres travaux quant à eux commencent par une présentation des simulateurs étudiés en faisant ressortir leurs différentes caractéristiques propres [116, 133, 57]. Ensuite, ils effectuent une étude comparative (toujours qualitative) basée sur un ensemble de critères choisis. Les travaux dans [57] ont porté sur l'étude de sept simulateurs (*SUMO*, *TRANSMIS*, *ARCHISIM*, *AIMSUN*, *Paramics*, *VISSIM* et *CORSIM*) en fonction de leur capacité à simuler les systèmes de transports publics.

La comparaison d'outils de simulation réalisée dans [116] a porté sur des simulateurs multi-agents aussi bien génériques que spécifiques au déplacement. Elle visait à choisir un simulateur pour étudier l'information des voyageurs dans les transports en commun sous l'angle des systèmes multi-agent. Les plateformes étudiées sont *AgentPolis*, *Transims*, *MATSim*, *Gama*, *NetLogo*, *Repast*, *Mason* et *Swarm*. Les auteurs ont conclu que *Repast Symphony* était plus adapté pour leur cas d'étude.

Quant à l'étude réalisée dans [133], elle a porté sur onze simulateurs de

6. EDSA est une autoroute périphérique à accès limité autour de Manille, la capitale des Philippines. C'est la principale artère de la région métropolitaine de Manille qui traverse 6 des 17 unités de gouvernement local de la capitale.

trafic routier en général. En plus des sept précédemment cités, il y a *MATSim*, *SimTraffic*, *MITSIMLab* et *TransModeler*. Les critères de comparaison sont assez proches de [57]. Le cadre de comparaison qualitative proposé par ces auteurs [133, 57] est assez explicite. En effet, à travers le tableau récapitulatif, on est informé des fonctionnalités que les simulateurs peuvent satisfaire. Cependant, ces informations ne sont limitées qu'aux fonctionnalités définies par les auteurs. De plus, certaines fonctionnalités n'ont pas été étudiées telles que la portabilité, la génération de demande de transport et l'évolutivité des logiciels.

Le principal inconvénient des approches (qualitatives) évoquées ci-dessus est qu'elles sont subjectives car les critères d'évaluation sont trop spécifiques dans la plupart des cas au projet ou aux modélisateurs (auteurs). Les résultats de l'étude indiquent simplement si le simulateur peut répondre à ces critères ou non. Ainsi, les conclusions de ces études sont générales et difficiles à adapter aux besoins d'un modélisateur particulier. De plus, une évaluation quantitative de chaque simulateur (comme décrit dans ce qui suit) devrait être ajoutée sur la base des conclusions tirées de la comparaison qualitative.

Les approches quantitatives visent à compléter les méthodes qualitatives en proposant une notation aux simulateurs étudiés. A notre connaissance, une seule étude s'est focalisée sur ce type de comparaison en utilisant un système de classement pour comparer les simulateurs *AIMSUN* et *VISSIM* [154]. Les auteurs ont proposé en plus un système de classement permettant de donner un rang à chaque simulateur. Contrairement aux études mentionnées ci-dessus, les critères d'évaluation sont à la fois qualitatifs (p. ex., les capacités fonctionnelles et les caractéristiques d'entrée/sortie) et quantitatifs (p., ex., la précision du simulateur). Ce système prend en compte la priorité du modélisateur en attribuant des poids à chaque critère d'évaluation. L'une des principales limites de cette approche est l'évaluation qualitative réalisée par les auteurs. Les conclusions tirées ne sont pas assez explicites comme dans [133] et [57]. De plus, certains critères désignés par les auteurs comme quantitatifs comme la précision du simulateur et le temps de prise en mains sont difficiles à évaluer sans étudier les simulateurs un peu plus en profondeur. Enfin, le système de classement est assez difficile à reproduire et à étendre à d'autres simulateurs.

Les travaux présentés ci-dessus présentent l'avantage de donner quelques descriptions des simulateurs à travers les comparaisons qualitatives. Cependant, les spécifications des modélisateurs ne sont pas prises en compte. Ainsi, sur la base de ces études, le modélisateur ne pourra pas sélectionner un outil de simulation adapté à ses besoins. De plus, l'absence d'un système de classement des outils étudiés et la non-prise en compte de l'intermodalité rendent ces études peu applicables dans notre cas d'étude.

En général, le choix du simulateur dépend de certains critères (qualitatifs et/ou quantitatifs) tels que spécifiés dans les travaux précités. Il serait intéressant de disposer d'un système de classement qui permettra au modélisateur d'effectuer une sélection rapide sans étudier les simulateurs un peu plus en profondeur. L'objectif est de gagner du temps en évitant d'étudier en profondeur des simulateurs qui ne sont pas susceptibles de répondre à l'étude de cas. Compte tenu des limites des études existantes, il est donc nécessaire de proposer une approche d'évaluation plus intuitive pour guider les modélisateurs dans le choix de leurs outils de simulation de trafic.

2.3.2 Présentation de l'approche de comparaison utilisée

En nous appuyant sur les approches présentées ci-dessus, nous proposons un système de comparaison généraliste des logiciels de simulation des systèmes de transport, mais assez détaillé et complet afin de prendre en compte le plus grand nombre de leurs caractéristiques communes. Elle consiste d'abord à définir les critères de comparaison. Ensuite, les simulateurs les plus populaires sont évalués en fonction de leur capacité à répondre aux critères de comparaison définis. A l'issue de cette étape, une liste restreinte de simulateurs est réalisée grâce à un système de classement pour une étude plus approfondie.

Nous avons identifié cinq catégories pour regrouper les critères d'évaluation de l'état de l'art, que nous avons complété :

- **Nature du logiciel** qui regroupe les critères tels que le type de licence (p. ex, gratuit, open source), la portabilité (Windows, Linux, Mac), l'équipe de développement (voir Tableau B.1).
- **Création du réseau routier et demande de transport** qui regroupe les

différentes possibilités de création comme les outils, la prise en compte des données géographiques, les données des transports publics (voir Tableau B.2)

- **Réalisme de simulation** qui regroupe la qualité de l'affichage (p. ex., 2D, 3D), le réalisme de la simulation, le besoin de ressources mémoire (voir Tableau B.3)
- **Documentation et GUI** qui regroupe les types de supports de documentation, la communauté, l'interface utilisateur (voir Tableau B.4)
- **Spécifications du modélisateur** qui regroupe les critères spécifiques au modélisateur. Dans notre cas, il s'agissait notamment du modèle de simulation (microscopique), la mise à l'échelle, les caractéristiques des modes et des individus, les données de sortie, la combinaison de modes (voir Tableau B.5).

Le système de classement peut être décrit en deux étapes :

1. Attribuer un *coefficient (poids)* entre 1 (peu important) et 5 (obligatoire) à chacune des catégories des critères en fonction de leur importance pour le modélisateur (chercheur);
2. Attribuer une note à chaque simulateur pour chaque catégorie de critères d'évaluation (*note_q*). Il s'agit ici de tenir compte à la fois de la disponibilité de la/les fonctionnalités (impliquée(s) par le critère) dans le simulateur et de la facilité de l'incorporer. Pour ce faire, chaque simulateur sera évalué qualitativement en fonction du critère. Des coches (*check mark*) seront faites pour chaque critère et/ou fonctionnalité respectés par le simulateur. A cet effet, le modélisateur peut désigner des critères et/ou fonctionnalités comme « rédhibitoires ». Ainsi, tout simulateur ne respectant pas ce critère sera systématiquement éliminé pour la suite de l'étude. Le total des coches détermine la note du simulateur pour cette catégorie de critères par l'application d'une règle de proportionnalité (on suppose que le nombre total de sous-critères correspondant à 10)⁷.

7. On calcule un arrondi supérieur à l'entier suivant si la décimale est supérieure ou égale à 0,5. Sinon on conserve l'entier sans la décimale.

La note pondérée attribuée à un simulateur pour une catégorie de critères est obtenue en multipliant son coefficient (de la catégorie) par la note obtenue par le simulateur comme présenté dans la FORMULE 2.8.

$$notePondSim_{cat} = coefficient_{cat} \times note_q \quad (2.8)$$

Enfin, le simulateur ayant obtenu le score le plus élevé et qui a respecté tous les critères rédhibitoires, est le simulateur qui répond au mieux aux exigences du modélisateur. Le score est calculé comme une moyenne pondérée des notes pour chaque catégorie de critères (voir FORMULE 2.9). Les simulateurs ayant obtenu une moyenne supérieure à un « seuil » (définie par le modélisateur) sont choisis pour la deuxième phase de sélection.

$$ScoreSim = \frac{\sum_{cat \in [1..n]} notePondSim[cat]}{\sum_{cat \in [1..n]} coefficient[cat]} \quad (2.9)$$

Ce système de comparaison présente l'avantage d'être plus objectif et donc évite au chercheur de tomber dans une subjectivité souvent peu évidente. En outre, il permet de ne pas rentrer directement dans la simulation en testant les simulateurs sans une présélection. En effet, dès la première étape, des simulateurs sont retirés, car ne respectant pas certains critères de sélection. Cela permet donc de gagner en temps en évitant de tester systématiquement tous les simulateurs. Enfin, au cas où plusieurs simulateurs sont retenus, le chercheur est en mesure d'effectuer des comparaisons entre les résultats produits par les différents scénarios, permettant d'obtenir une meilleure appréciation du modèle implémenté.

2.3.3 Evaluation des simulateurs existants selon les critères

Comme dans [116], nous avons basé notre étude sur des plateformes de simulations multi-agents génériques et spécifiques aux déplacements.

1. **Les simulateurs de déplacement.** Il s'agit des plateformes de simulation

spécifiques (destinées uniquement) au trafic routier. Les simulateurs choisis sont :

- *Matsim (Multi-Agent Transport Simulation) - Version 0.10.1* (Open-source) [9, 75]
- *SUMO (Simulation of Urban Mobility) - Version 1.0.1* (Open-source) [95, 86, 14]
- *Aimsun Next - Version 8.1.4* (propriétaire)
- *PTV Vissim (Planung Transport Verkehr AG Verkehr In Städten - SIMulationsmodell) - Version 10* (propriétaire)

2. **Les plateformes multi-agent génériques.** Ce deuxième groupe prend en compte les plateformes généralistes de simulation à base d'agents. N'étant pas spécifiques aux systèmes de transport uniquement, elles peuvent être adaptées pour la modélisation de plusieurs systèmes, dont le trafic routier. Notre choix s'est porté sur :

- *GAMA (GIS Agent-based Modeling Architecture) - Version 1.8* (Open-source) [62]
- *NetLogo - Version 6.0.4* (Open-source)
- *AnyLogic - Version 8.3.3* (propriétaire)

Bien que les logiciels de simulation mentionnés ci-dessus ne soient pas les seuls dans la littérature, ils sont les plus évoqués dans la littérature [57, 133, 51]. Quant à *GAMA*, les récents travaux menés dans [61] nous incitent à l'étudier. Ainsi, nous allons nous appuyer sur ces différents travaux pour compléter notre étude comparative sur le plan qualitatif notamment sur les critères pris en compte dans lesdits travaux.

Compte tenu de notre étude de cas qui consiste à savoir s'il existe un simulateur adapté pour simuler les politiques d'intermodalité, nous avons attribué des coefficients à chaque catégorie de critères comme présenté dans le Tableau 2.4.

Le Tableau 2.5 présente un aperçu des résultats de comparaison à travers les cinq catégories. Il apparaît qu'aucun simulateur n'est « idéal » pour satisfaire tous nos besoins et exigences.

Les simulateurs dédiés au trafic, obtiennent des meilleures scores allant jusqu'à 7,4. La délimitation entre logiciels commerciaux et logiciels *OpenSource*

TABLEAU 2.4 – Attribution de coefficients aux catégories de critères en fonction de nos priorités et besoins.

| Catégorie de critères | Coefficient |
|---|--------------------|
| Nature du logiciel (Cat. 1) | 4 |
| Création du réseau et de la demande de transport (Cat. 2) | 5 |
| Qualité de la visualisation de la simulation (Cat. 3) | 3 |
| Documentation et interface utilisateur (Cat. 4) | 4 |
| Nos propres spécifications (Cat. 5) | 5 |
| Total des coefficients | 21 |

TABLEAU 2.5 – Comparaison des simulateurs selon des critères choisis (première étape).

| Simulateur | Catégorie de critères | | | | | <i>ScoreSim</i> |
|--------------------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------------|
| | Cat.1 | Cat.2 | Cat.3 | Cat.4 | Cat.5 | |
| Total coefficient | 4 | 5 | 3 | 4 | 5 | 21 |
| <i>SUMO</i> | 10 | 10 | 5 | 7 | 9 | 8.48 |
| <i>MATSim</i> | 10 | 8 | 3 | 10 | 8 | 8,05 |
| <i>Aimsun Next</i> | 7 | 8 | 10 | 6 | 7 | 7,48 |
| <i>PTV Vissim</i> | 4 | 8 | 10 | 9 | 7 | 7,48 |
| <i>GAMA</i> | 10 | 5 | 8 | 9 | 4 | 6,90 |
| <i>NetLogo</i> | 10 | 5 | 5 | 7 | 5 | 5.70 |
| <i>AnyLogic</i> | 7 | 8 | 10 | 9 | 3 | 7.36 |

est également claire. Les logiciels commerciaux gèrent efficacement les données provenant de SIG pour créer, configurer la simulation et fournir une interface graphique et une vue de simulations qualitatives. Cependant, elles restent obscures compte tenu de l'impossibilité d'entrer dans le code source de la simulation et de fournir des comportements et une simulation personnalisée.

Les simulateurs choisis pour être approfondis en mettant en œuvre des scénarios d'intermodalité sont *MATSim* et *SUMO*. Pour ce travail, nous sommes intéressés aux modules de simulation de l'intermodalité en particulier le choix intermodal et les calculs d'itinéraires pour les combinaisons de différents modes de transport.

2.3.4 L'intermodalité dans *MATSim* et *SUMO*

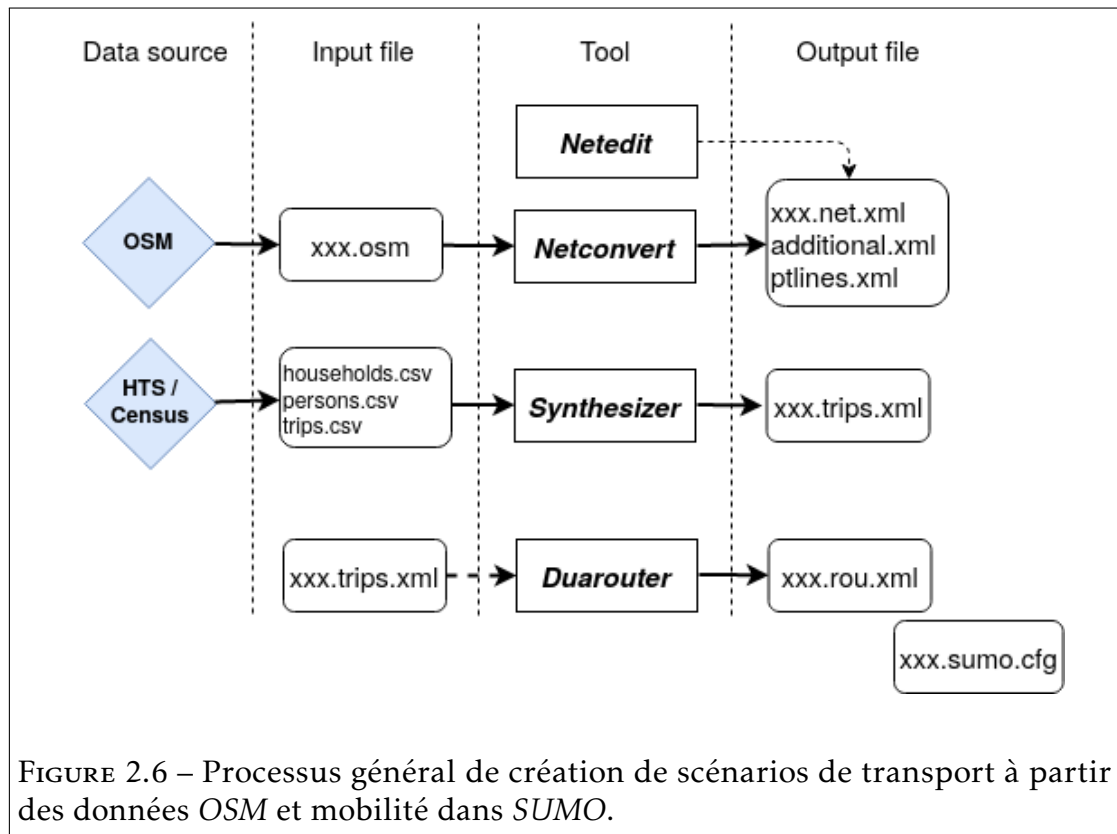
Dans la deuxième étape de comparaison, nous avons donc étudié plus en profondeur ces simulateurs sur leurs capacités à simuler les comportements de déplacement intermodal. Pour ce faire, l'accent sera mis sur quatre éléments : 1) création d'un réseau de transport multimodal complet, 2) définition de la disponibilité des modes de transport, 3) le choix modal et le routage intermodal et 4) degré de difficulté dans la définition de nouveaux comportements intermodaux.

Après une description de la génération de scénarios de simulation de transport dans *MATSim* et *SUMO* dans la première sous-section, les deux autres sous-sections détaillent ces différents points pour chaque simulateur.

Cadre de génération de scénarios de simulation de transport

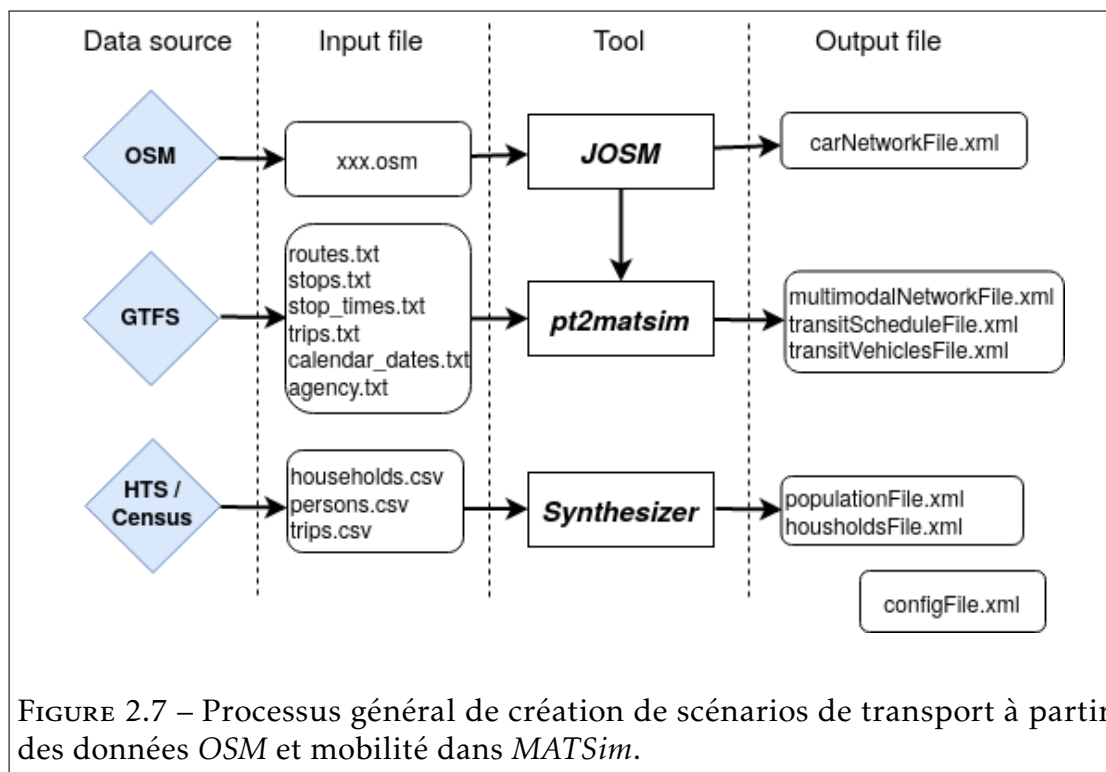
L'utilisation de *SUMO* et de *MATSim* repose sur plusieurs outils pour générer des configurations de simulation à partir des formats de données classiques. Les figures 2.6 et 2.7 présentent un cadre global de génération d'un scénario de transport à partir de *OpenStreetMap* (*OSM*) et les données de déplacements (voir sous-section 1.3.3) dans *SUMO* et *MATSim* respectivement.

Le réseau routier est généralement produit à partir des données *OSM* de la zone d'étude extraites de *OpenStreetMap*. De plus, il est possible d'inclure des données *GTFIS* permettant une meilleure description de l'offre de transport



public dans le contexte *MATSim*. Des détails sur les outils de génération de réseau sont présentés dans les sous-sections dédiées à chaque simulateur.

La demande de transport initiale est généralement créée à partir d'un synthétiseur de population d'agents synthétiques (voir sous-section 2.2.2). Cette population reflète les données de mobilité, par exemple issues des enquêtes ménages déplacements et/ou des données de recensement. Il est à noter ici que cette population synthétique n'est pas forcément spécifique au format du simulateur. Ainsi, à partir des informations de mobilité de la population générée, il est possible de créer une demande de déplacement au format simulateur (p., ex., xxx.trips.xml dans *SUMO* et populationFile.xml dans *MATSim*). Cette demande peut alors être directement simulée sans définir d'itinéraires de déplacement. Par contre, cela prend beaucoup de temps en ce qui concerne le temps de routage. Ainsi, l'outil *Duarouter* permet de créer une demande de trafic (xxx.rou.xml) avec des routes calculées qui peuvent être facilement simulées par *SUMO*.



Choix modal et routage intermodal dans SUMO

Pour effectuer un routage intermodal, nous avons besoin d'un réseau multimodal, de la disponibilité de plusieurs modes de transport pour les combiner, et de la définition d'une fonction de coût du choix modal. De plus, le routage intermodal est un peu plus particulier que dans le cas du calcul d'itinéraires pour un seul mode. En effet, il doit prendre en compte des trajets avec des modes non contraints (sur le plan spatio-temporel) comme la voiture et des modes dépendant d'un programme horaire et des itinéraires à suivre comme le bus et les métros [67]. Ces différentes étapes seront étudiées pour chacun des deux simulateurs.

Le réseau multimodal est bien modélisé dans SUMO. L'outil *Netconvert* permet de créer le réseau routier pour SUMO. *Netedit* permet d'apporter des corrections au réseau créé car certaines informations issues du site *OpenStreetMap* peuvent être erronées, comme l'utilisation d'un feu tricolore au lieu d'un arrêt prioritaire à une intersection. Chaque voie propre à une catégorie de mode de

transport peut être modélisée. Par exemple, il est possible d'avoir des voies dédiées uniquement aux voitures, vélos, bus, trains et à la marche à pied. *SUMO* permet également la cohabitation de plusieurs modes de transport sur une même voie tels que les voitures, les bus et les motos (voir Figure 2.8). Des interactions entre piétons et automobilistes sont également possibles aux passages piétons. Les systèmes de contrôle du trafic comme les feux tricolores, les stops sont également pris en compte. La simulation des déplacements en véhicules est effectuée en suivant un algorithme de suivi de voiture (*car_following*). Cet algorithme prend en compte par exemple la distance inter-véhiculaire et les temps de réaction. Ainsi, chaque véhicule, piéton, cycliste, etc. sont simulés et les interactions sont assez réalistes avec des apparitions de congestions dans certaines zones du réseau.

Le réseau de transport public est généré uniquement à partir des données *OSM*. Ainsi, le réseau ne comprend que les arrêts et les lignes répertoriés sur *OpenStreetMap*. Les informations sur les horaires de transit et les types de véhicules affectés à chaque ligne ne sont pas couvertes. L'outil *Netedit* permet de compléter le réseau multimodal. Il est donc possible d'avoir un réseau modélisé proche de la réalité et d'y ajouter des éléments de l'infrastructure routière.

La prise en compte des modes de transport disponibles ou accessibles par l'agent permet d'éviter des situations irréalistes. Par exemple, il ne serait pas possible d'utiliser un vélo ou une voiture puis de prendre le train, si l'agent ne dispose pas de ces modes. *SUMO* prend en compte les modes de transport disponibles dans un trajet intermodal grâce à l'attribut *modes* dans le module *personTrip*, qui contiendra le nom de ces modes. Par exemple, *modes="car public"* signifie que l'agent peut utiliser la voiture, ou les transports publics ou une combinaison des deux. La marche est supposée être disponible pour tous les agents tandis que les autres modes doivent être fournis explicitement.

La disponibilité des modes de transport permet de déterminer le(s) mode(s) de transport à utiliser pour effectuer le déplacement. Comme vu dans la sous-section 2.2.3, le choix modal (intermodal) est effectué grâce à un modèle de choix discret pour tenir compte de plusieurs facteurs liés à la fois au mode et à l'individu. Actuellement, *SUMO* ne prend en compte que le temps de parcours des modes de transport et n'utilise pas la notion d'utilité. Ainsi, le mode choisi est

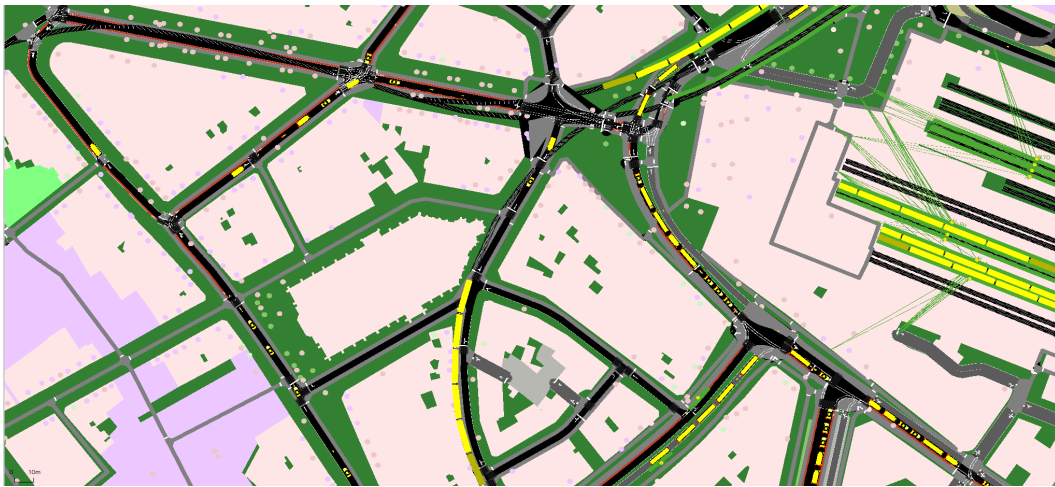


FIGURE 2.8 – Rendu visuel d'un tronçon du réseau routier autour de la gare Lille Flandres de la MEL dans *SUMO* extrait de *OpenStreetMap*. On peut distinguer les voies dédiées aux différents modes de transport (en noir pour les autos, en gris avec les flèches pour les bus et les rails pour le métro et le train), les arrêts de bus (en vert) et les véhicules sur le réseau (voiture, camion, bus, métro, train en gare).

déterminé par celui qui a le temps de trajet le plus court selon l'itinéraire calculé par *Duarouter* (ou la succession de modes en cas de déplacement multi-modal).

Pour effectuer le routage des déplacements, le réseau de transport est généralement considéré comme un graphe pondéré composé de nœuds (intersections) et d'arêtes (tronçons). Des coûts comme le temps de parcours sont assignés aux tronçons pour faire cette pondération. L'objectif est de trouver le chemin le plus court d'une source (origine) à une cible (destination). Pour calculer le temps de trajet, *Duarouter* utilise l'algorithme de calcul du plus court chemin *Dijkstra*. Le temps de parcours d'un tronçon est généralement calculé en absence de trafic en fonction de la vitesse maximale du mode (p. ex., voiture, vélo, marche) et de la vitesse limite du tronçon. Les temps de trajet en transports publics (TP) sont calculés à partir de l'heure de départ, du temps d'attente et de la différence de temps intermédiaires entre les arrêts successifs. Dans *SUMO*, le réseau automobile étant confondu avec celui des TP, le routage intermodal est effectué simplement en considérant les différents temps de parcours pour chaque mode.

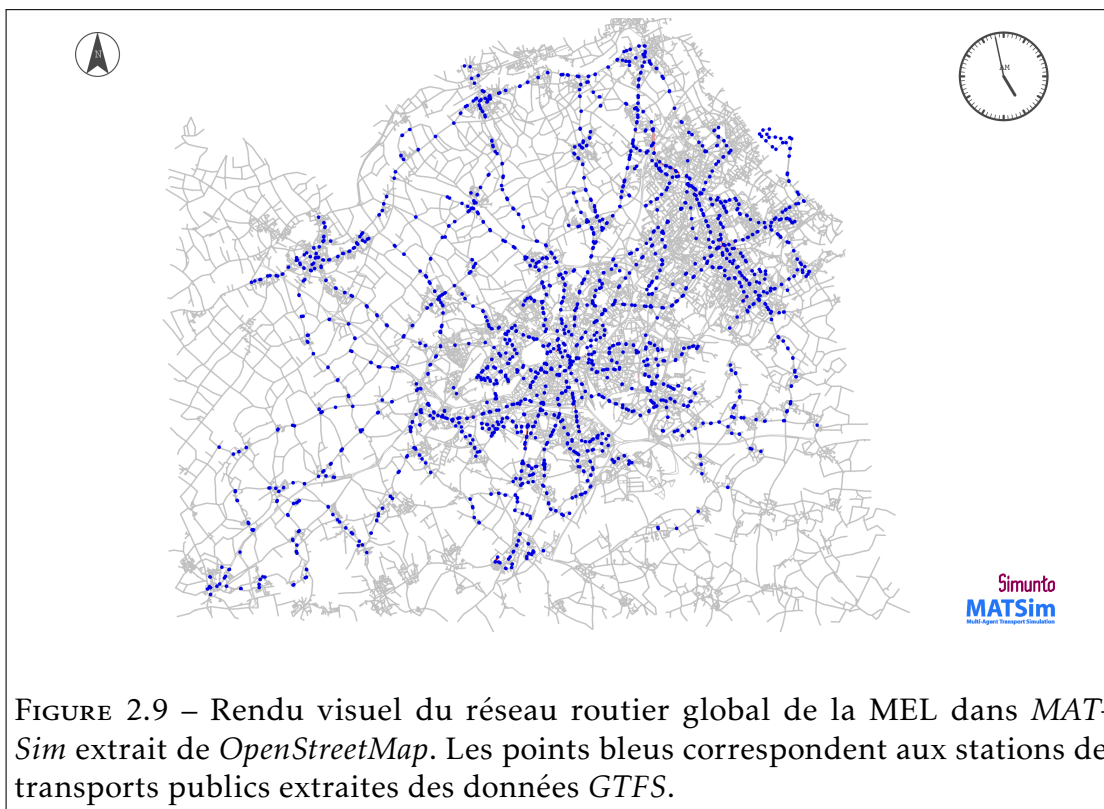
Il faut noter ici que le routage est fait en tenant compte uniquement du trajet comme dans les modèles traditionnels en quatre étapes. Il n’y a donc pas de lien entre les modes de transport secondaire. Il est possible d’utiliser une voiture différente de celle prise pour le trajet aller. Les lieux (points) d’échange ne sont pas n’ont plus pris en compte.

Dans *SUMO*, une personne peut être dans trois états durant son déplacement : *riding* (rouler), *walking* (marcher) ou *stopping* (arrêter). L’état *riding*, à travers l’attribut *modes* du module *personTrip*, permet l’utilisation de plusieurs modes de transport pour effectuer un trajet. *SUMO* prend également en compte certains paramètres individuels des automobilistes comme l’imperfection (*sigma* compris entre 0 et 1 où 0 correspond à une conduite parfaite), le temps d’avancement (minimum) souhaité (*tau* en secondes) et l’impatience traduisant la volonté d’entraver les véhicules ayant une priorité plus élevée (*impatience* compris entre 0 et 1 où 0 correspond à une conduite sans manoeuvre) du conducteur. Par conséquent, il est possible de définir un comportement de mobilité intermodale entre les points d’origine et de destination (tronçons) en définissant les modes de transport disponibles pour un agent. Cependant, la disponibilité des modes de transport n’est pas le seul facteur influençant le choix modal. La dimension humaine et l’offre de transport doivent être prises en compte. Par exemple, le choix des combinaisons modales doit tenir compte à la fois des caractéristiques (p. ex., âge et CSP) de l’individu et des attributs du mode de transport (p. ex., temps de parcours, coût et confort). De telles modifications ne peuvent pas être effectuées en personnalisant simplement les attributs des agents et les modes de transport. Par conséquent, certains ajustements ou ajouts au code source peuvent être nécessaires pour envisager de nouveaux comportements de mobilité intermodale. Cependant, la complexité du code source de *SUMO* rend cette opération très fastidieuse [93].

Choix modal et routage intermodal dans *MATSim*

Le réseau multimodal pour *MATSim* est généré avec le module *pt2matsim* [124]. Par conséquent, les voitures et les bus peuvent interagir sur les mêmes voies quand celles-ci se confondent. La prise en compte des données *GTFS*,

permet une meilleure représentation de l'offre des transports publics (TP). La Figure 2.9 donne un aperçu du réseau multimodal de la Métropole européenne de Lille (MEL). Les points en bleu correspondent aux différents arrêts de TP dans la MEL. L'un des avantages de *MATSim* est sa capacité à simuler de très grands réseaux de transport. Cependant, il n'y a pas de voie réservée aux piétons et donc pas d'interactions entre conducteurs et piétons. Les piétons sont ainsi « téléportés » entre les points d'origine et de destination à une certaine durée correspondant normalement à leurs temps de marche. Certains systèmes de contrôle du trafic comme les feux de circulation ne sont pas modélisés dans *MATSim*. Des ajustements tels que la définition de la vitesse libre et le lien de suppression/ajout sont possibles via l'outil *JOSM*⁸ via un plugin supplémentaire [108]. A noter que ce plugin permet de créer un réseau de transport monomodal pour les voitures particulières.

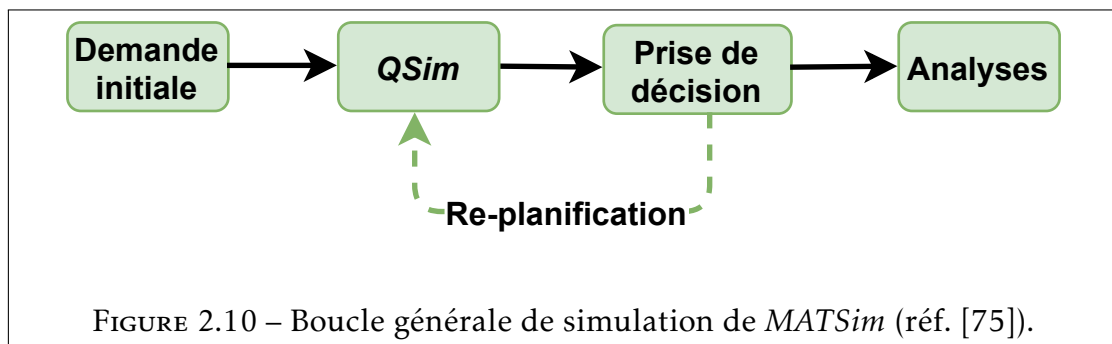


MATSim prend en compte la disponibilité des modes de transport lorsqu'un

8. <https://josm.openstreetmap.de/>

agent effectue un déplacement. La marche est toujours possible (téléportation dans ce cas). Les modes doivent être définis soit globalement (paramètre *main-Mode* dans le module *QSim*) soit individuellement pour chaque agent (attribut *mode* du paramètre *leg* dans le plan d'une personne). Si un mode n'est pas défini dans *QSim*, l'agent utilisant ce mode sera « téléporté ».

Pour comprendre la fonction de coût de choix modal, il est nécessaire d'avoir une vue d'ensemble sur le fonctionnement global de *MATSim*. La Figure 2.10 présente la boucle générale de simulation de *MATSim*. La demande initiale



est composée du réseau routier et des chaînes d'activités quotidiennes (p. ex., domicile - travail - achats - domicile) ainsi que des déplacements à effectuer par chaque individu (agent). Ces éléments, contenus dans le plan de l'agent, seront simulés simultanément sur le réseau routier par le module de micro-simulation *QSim* (*Queues Simulation*) pour un nombre donné d'itérations (une itération est généralement équivalente à une journée (24h)). Les véhicules intègrent les routes en passant par des files d'attente (*queues*) avec le principe *First-in First-out* (*FIFO*). Ce processus d'interactions entre les véhicules et le réseau peut occasionner des congestions par endroit sur le réseau dues à la saturation des tronçons (liens).

À la fin de chaque itération, de nouveaux temps et distances de déplacement sont fournis au module de prise de décision *Decision making*. Ces nouvelles valeurs peuvent varier d'une itération à une autre (p. ex., présence ou non de congestions). Au niveau du module de décision, une portion (entre 5 à 20%) d'agents sont autorisés à modifier leur plan initial en changeant soit **l'heure de départ**, soit **le mode de transport** ou soit **l'itinéraire** en fonction de ces informations dans une étape de re-planification. Cette phase se fait à travers l'évaluation

(*scoring*) de tous les plans des agents dans chaque cycle de simulation (itération) sur la base d'une fonction d'utilité. Le score d'un plan dépend de l'utilité des activités réalisées et de celle des déplacements (généralement négative) vers ces activités en fonction du mode de transport utilisé. Formellement, le score d'un plan est défini par :

$$S_{plan} = \sum_{n=0}^{N-1} S_{act,q} + \sum_{n=0}^{N-1} S_{trav,mode(q)} \quad (2.10)$$

Où N est le nombre d'activités, $S_{act,q}$ est l'utilité pour effectuer l'activité q , et $S_{trav,mode(q)}$ est l'utilité du déplacement dont le motif est l'activité q .

L'utilité relative à la réalisation d'une activité est définie par :

$$S_{act,q} = \beta_{dur} \times t_{typ,q} \times \ln(t_{dur,q}/t_{0,q}) \quad (2.11)$$

Où $t_{dur,q}$ et $t_{typ,q}$ sont respectivement les durées réelles et typiques de l'activité q ; β_{dur} est l'utilité marginale de la durée de l'activité ou l'utilité marginale du temps en tant que ressource; $t_{0,q}$ est la durée minimale, qui n'a essentiellement aucun effet tant que l'abandon d'activités n'est pas autorisé.

L'utilité propre au mode de déplacement est décrite par :

$$S_{trav,mode(q)} = C_{mode(q)} + \beta_{trav,mode(q)} \times t_{trav,q} + \beta m \times \Delta m_q \quad (2.12)$$

Où $C_{mode(q)}$ est la constante spécifique alternative (ASC), $t_{trav,q}$ est le temps de déplacement et Δm_q est la variation du coût du déplacement entre l'activité q et $q + 1$; $\beta_{trav,mode(q)}$ est l'utilité marginale directe du temps de déplacement, qui vient s'ajouter à l'utilité marginale du temps en tant que ressource; et βm est l'utilité marginale de l'argent⁹.

Par conséquent, les agents autorisés à modifier leur plan chercheront à maxi-

9. Pour une description plus détaillée des utilités des activités et des déplacements, le lecteur peut se référer au chapitre 3 du livre sur *MATSim* [75].

miser leur score à chaque itération jusqu'à atteindre un équilibre utilisateur où aucune amélioration n'est possible. Cette proportion d'agents est déterminée de façon à obtenir des temps de trajet stables sur le réseau. En effet, une forte valeur implique que beaucoup d'agents ont effectué des choix (p. ex., utilisation ou non de la voiture). Ces stratégies sont configurables par le modélisateur qui peut choisir le pourcentage d'agents qui changeront de plan entre deux itérations. Dans cette étude de cas, nous nous intéressons plus au changement de mode de transport. Actuellement, la fonction d'utilité du mode de transport repose sur un seul facteur, le temps de trajet qui est calculé à chaque fin de cycle.

Le routage des déplacements en voiture est également fondé sur des algorithmes de calcul du plus court chemin tels que *Dijkstra* pour estimer les temps de trajet lors de la simulation. Contrairement à *SUMO*, *MATSim* dispose de module de routage spécifique pour les transports publics (TP). Il est fondé sur l'algorithme *Round-based Public Transit Optimized Router (RAPTOR)* [42]. La version actuelle de *MATSim* utilise une version améliorée du *RAPTOR* à savoir le *SwissRailRaptor* qui prend en charge les transports ferroviaires [131]. L'algorithme *RAPTOR* n'est pas fondé sur la théorie des graphes. Il utilise la notion de la programmation dynamique (PD) [16]. En considérant un tableau de programmation dynamique avec une colonne par station/arrêt de TP et une ligne par tour, une cellule (s, r) représente après le tour r l'heure d'arrivée la plus proche possible à la station s en utilisant au plus r étapes. L'algorithme permet également de tenir compte de certains critères lors du routage (p. ex., trouver l'itinéraire le plus rapide ou celui avec le moins de transferts, trouver la connexion optimale compte tenu d'un intervalle d'heure de départ). Le routage intermodal dans *MATSim* ne tient pas compte non plus de la chaîne (lien) des modes de transport combinés pour éviter certains cas d'utilisation irréalistes.

MATSim permet de simuler les déplacements quotidiens d'une population donnée incluant les trajets domicile-travail, les déplacements loisirs, etc. Chaque agent est modélisé en tenant compte de sa capacité (p. ex., âge et possession d'un permis de conduire) à utiliser un mode de transport donné. Le choix modal repose sur une fonction d'utilité prenant en compte la dimension humaine. Ainsi, en personnalisant certains attributs/paramètres de fonction d'utilité tels

que **utilité marginale de l'argent** et **utilité marginale du temps de trajet**, il est possible de reproduire certains comportements d'intermodalité de base. En revanche, pour définir de nouveaux comportements il est nécessaire de modifier certaines fonctionnalités dans le code source. Heureusement, ces fonctionnalités sont conçues de manière modulaire et *MATSim* offre une grande flexibilité dans la modification de ses modules.

Discussion

Le Tableau 2.6 résume notre analyse sur les différents aspects d'évaluation (agents, réseau et choix modal). Le réseau multimodal de *SUMO* est modélisé plus

TABLEAU 2.6 – Principales caractéristiques de l'agent, du réseau, du choix modal et routage intermodal dans *SUMO* et *MATSim*.

| Simulateur | Comportement de l'agent | | | | | Réseau multimodal | | | Choix modal et routage | | | | |
|---------------|-------------------------|---------|----------|-------------|----------------------|-------------------|------------------|----------------|------------------------|----------------|------------|------------|---------------|
| | riding | walking | stopping | in activity | crossing interaction | multimodal | transit schedule | control system | utility function | multi-criteria | trip-based | tour-based | shortest-path |
| <i>SUMO</i> | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | | | ✓ | | ✓ |
| <i>MATSim</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

finement que dans *MATSim*. Il faut noter à ce niveau la difficulté de corriger le réseau multimodal *SUMO* pour des zones d'étude plus vastes. Cela peut prendre beaucoup de temps à travailler sans être sûr du résultat final. Par exemple, il a été identifié des problèmes de flux aux intersections où les véhicules pouvaient rester bloqués sans entrer dans le rond-point, provoquant ainsi des embouteillages irréalistes [93]. Prenant en compte les données *GTFS*, le réseau multimodal *MATSim* présente une offre de transport public plus réaliste. L'intégration des données *GTFS* dans *SUMO* est toujours en cours.

MATSim, grâce à son approche fondée sur l'activité et l'agent, permet de mieux modéliser les comportements de déplacement en prenant en compte, par exemple, le motif du déplacement, les chaînes d'activités quotidiennes, et certains attributs de l'individu tels que la disponibilité de la voiture. Le choix modal est également basé sur une fonction d'utilité qui peut prendre en compte

plusieurs critères tels que le temps et le coût du trajet. Ce choix peut être effectué en amont de la simulation via un appariement avec un modèle de choix discret [73]. Ainsi, il est plus aisé de générer et de simuler des scénarios de transport (demande et offre de transport) avec l'ensemble des éléments intervenant dans ce processus. De nombreux travaux reproductibles de simulation de demande de transport ont pu être menés avec l'outil *MATSim*. L'un des premiers scénarios a été réalisé pour la ville de Santiago (Chili) [83]. Le premier outil de synthèse *open-source* pour la création de scénarios de transport pour l'Ile-de-France (France) a été proposé dans [82]. Un scénario ouvert pour la ville de Berlin (Allemagne) a été également réalisé dans [156]. Tout récemment, un synthétiseur *open-source* avec tous les détails de génération de la demande de transport pour une étude de cas sur Paris et l'Ile-de-France a été développé [71].

De plus, grâce à la boucle *MATSim*, il est possible de mieux évaluer le comportement de déplacement des agents qui, grâce à la re-planification, peuvent modifier leurs habitudes. C'est assez intéressant car on peut imaginer de nouveaux individus qui apprennent à définir leurs choix modaux et/ou d'itinéraires au fur et à mesure qu'ils découvrent le réseau routier et l'état du trafic. *SUMO* dispose également d'un module d'itération (*dua-iterate*), mais il ne s'appuie que sur les temps de trajet pour faire le choix du mode de transport.

Cependant, en raison d'un niveau d'abstraction élevé, *MATSim* ne simule pas les interactions microscopiques entre les différents modes de transport. *SUMO* est plus indiqué dans ce cas notamment pour les études portant sur les interactions entre différents modes dans une zone multimodale spécifique telle qu'une place de ville avec une gare, des bus, des vélos, un parking. Il est plus adapté pour étudier les comportements des usagers dans le trafic à un niveau microscopique assez détaillé comme la gestion des feux tricolores dans les intersections [29, 15].

Au regard de notre cas d'étude visant à simuler les comportements des individus dans leurs pratiques intermodales, nous avons retenu *MATSim* comme étant la plateforme de simulation la mieux adaptée. Dans ce qui suit, nous présentons quelques points essentiels d'ajustements et/ou d'ajouts à effectuer dans *MATSim* pour répondre à nos besoins.

Identification des principaux développements à faire dans *MATSim*

Comme évoqué précédemment, la version actuelle de *MATSim* n'intègre pas spécifiquement de comportements d'intermodalité. Les combinaisons de modes sont possibles. Cependant, le choix de ces combinaisons et leur routage sur le réseau ne sont pas encore bien formalisés pour correspondre à des situations réalistes. Il est nécessaire de faire certains ajustements et/ou ajouts pour améliorer les comportements de déplacement intermodal. Les points suivants ont été identifiés :

- Sur le plan du choix modal, l'intégration d'un modèle complet de choix discret avec les alternatives intermodales dans le processus de décision permettra une meilleure reproduction du comportement individualisé. Il existe un premier travail de couplage de modèle de choix discret modal (CDM) avec *MATSim* [73]. La version de *MATSim* résultante s'appelle *eqasim* [70]. La Figure 2.11 décrit le processus de couplage du module de choix discret et *MATSim* dans *eqasim*. L'étape de prise de décision avec notamment l'évaluation des plans des agents (*scoring*) dans la version standard de *MATSim* n'est plus utilisée. C'est le module de choix discret (éléments en bleu clair dans la Figure 2.11) qui remplace cette étape pour la détermination du choix modal. Les **estimateurs** calculent l'utilité de chaque alternative en se basant sur les attributs (p. ex., coût du mode) issus des **variables** et **paramètres du mode**, et les opérations (p. ex., calcul du temps et du coût) définies dans les **prédicateurs** et **modèles de coût** de chaque mode et en intégrant les informations issues de la simulation (*QSim*) comme les temps de parcours, les coûts du service [73]. Le module de choix discret (CDM) effectue par la suite le choix du/des mode(s) en fonction de l'approche utilisée (*trip-based* i.e un seul mode pour chaque déplacement ou *tour-based* i.e la chaîne de modes pour l'aller/retour au domicile) et du modèle de choix (p. ex., le modèle logit multinomial (*MNL*)) à partir des utilités calculés. Ce choix se fait aussi en tenant compte de certaines contraintes pour ne pas générer des combinaisons irréalistes comme le fait d'utiliser la voiture sans avoir de permis de conduire.

Le choix du plan et par conséquent du mode de transport s'effectue donc

a posteriori et non *a priori* comme c'était le cas dans la version standard de *MATSim*. En effet, avec le module de choix discret, le choix du mode de transport est déterminé en fonction des informations issues de la simulation (*QSim*) comme les temps de parcours, les coûts du service [73]. Tandis que dans la version standard, ce choix est effectué avant de réaliser la simulation sans tenir compte de ces informations. Le module de choix discret permet donc de mieux tenir compte de la situation du trafic dans le choix du mode de transport. Un autre avantage de l'intégration du module de choix discret est l'obtention de valeurs de paramètres pertinentes nécessaires à une calibration rapide de la simulation. En effet, les coefficients des paramètres de simulation issus des fonctions d'utilités des activités 2.11 et des déplacements 2.12 sont réputés difficiles à calculer lors du calibrage [83].

Bien que ce travail ne tienne pas compte des alternatives intermodales, il peut être une très bonne base pour intégrer les comportements de déplacements intermodaux. Il va falloir définir proprement ces nouvelles alternatives en implémentant leurs fonctions d'utilité et les conditions d'utilisation.

- Sur le plan du routage intermodal, le calcul des itinéraires des déplacements combinant voiture et transports publics devra tenir compte des points d'échange prévus à cet effet (p. ex., les parkings relais). Le développement d'un nouveau module de routage peut donc être nécessaire pour assurer cette fonctionnalité.

Conclusion

Dans ce deuxième chapitre consacré à la revue de littérature, nous avons décrit quelques concepts fondamentaux du paradigme de la modélisation/simulation multi-agent que nous avons sélectionnée comme méthode pour évaluer les politiques d'intermodalité. A cet effet, quelques exemples d'application de simulation multi-agent ont été présentés pour examiner différentes problématiques des systèmes de transport.

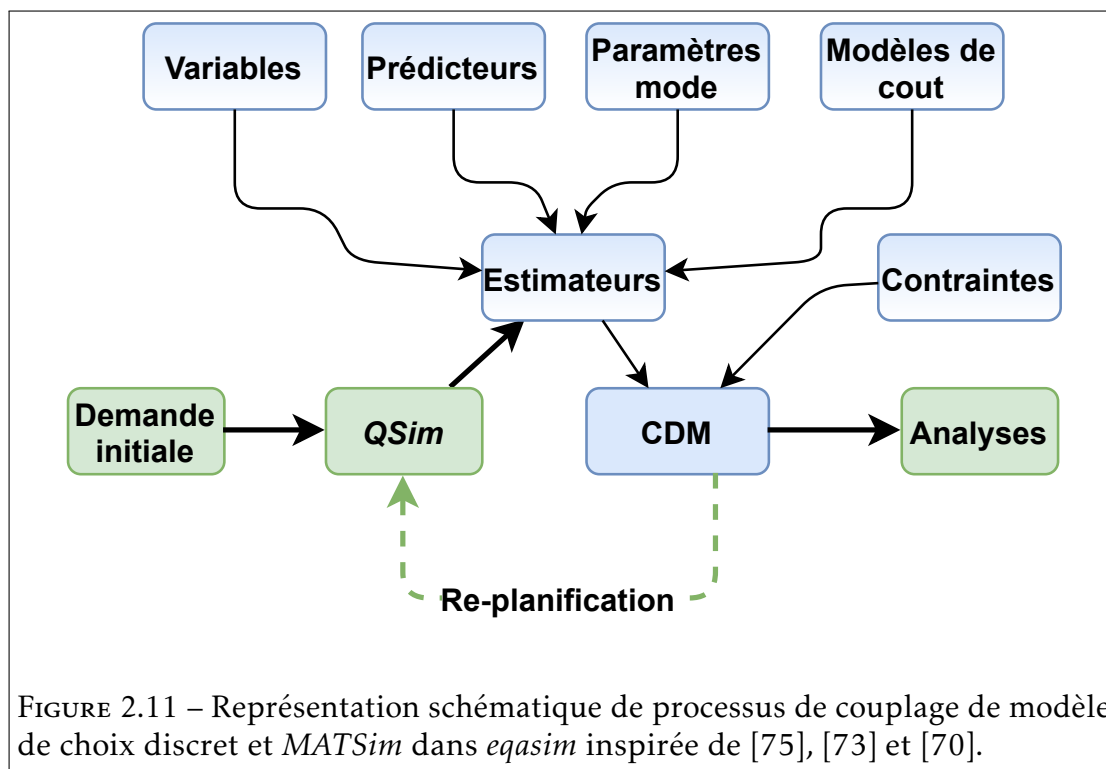


FIGURE 2.11 – Représentation schématique de processus de couplage de modèle de choix discret et MATSim dans eqasim inspirée de [75], [73] et [70].

Ensuite, le chapitre s'est focalisé sur les techniques de génération d'une demande de transport multi-agent. Un bref rappel du modèle traditionnel à quatre étapes (génération, distribution, choix modal et affectation) a été présenté pour introduire les différentes étapes de cette génération. La demande de transport multi-agent repose en général sur la génération d'une population synthétique qui contient les éléments caractéristiques de la population réelle de la zone d'étude. Différentes sources données sont également nécessaires pour réaliser une simulation multi-agent de système de transport. Ces données doivent être désagrégées pour tenir compte de la diversité et l'hétérogénéité des individus au sein d'une population réelle. Les différentes techniques couramment utilisées sont la reconstruction synthétique, l'optimisation combinatoire et l'apprentissage statistique. La modélisation du choix modal est également un élément important dans la mise en place d'une simulation multi-agent de transport. Le choix du mode de transport est généralement modélisé grâce à des modèles de choix discret comme le *Multinomial logit* (MNL).

Enfin, nous avons mené une étude comparative des différents logiciels de

simulation microscopiques à base d'agents existants afin de choisir celui qui est le plus adapté à notre cas d'étude. Pour ce faire, nous avons exploité les études comparatives de l'état de l'art sur les simulateurs de trafic. Sur la base de ces travaux, nous avons proposé une nouvelle approche de comparaison qui prend en compte des critères propres au modélisateur. Nous avons ainsi évalué sept simulateurs : quatre spécifiques aux systèmes de transport (*Aimsun Next*, *PTV Vissim*, *SUMO* et *MATSim*) et trois génériques (*GAMA*, *NetLogo* et *Anylogic*). Nous avons retenu *SUMO* et *MATSim* et comparé leurs capacités à simuler les comportements de déplacement intermodal d'une population donnée. *SUMO* permet une modélisation fine de chaque individu et de la géométrie des zones multi-modales. Cependant dans le cadre de notre étude, *MATSim* a été sélectionné comme l'outil de simulation le plus approprié pour reproduire ces types de comportements à grande échelle (un territoire, une agglomération). Nous avons également identifié les points de développements sur *MATSim* pour permettre la simulation des déplacements intermodaux de manière plus réaliste. La partie suivante présente nos contributions sur la manière de modéliser des comportements de déplacement intermodal.

Partie II. Contributions

Modélisation de comportements de déplacement intermodal

Introduction

Dans le chapitre introductif, nous avons esquissé notre approche méthodologique pour réaliser une simulation multi-agent des systèmes de transport. Les deux chapitres précédents ont permis de mettre en évidence les différentes étapes nécessaires à la mise en place d'une simulation. Nous avons pu également identifier les différentes sources de données disponibles en France à considérer pour notre modélisation. Enfin, à l'issue de notre étude comparative, nous avons retenu *MATSim* comme outil de simulation multi-agent. Dans ce chapitre 3, nous décrivons de manière plus détaillée les différentes parties de notre approche pour caractériser les comportements de déplacements intermodaux, en intégrant la logique sous-jacente à l'outil de simulation *MATSim*. La Figure 3.1 donne un aperçu de ses différentes parties.

La spécification des modèles de choix discret doit tenir compte des données disponibles pour formuler les différentes fonctions d'utilité relatives à chaque alternative. Les données les plus pertinentes s'appuient principalement sur les enquêtes de déplacements (p. ex., EMD) puis sur le recensement pour la demande de transport couplé aux données *OpenStreetMap* pour la création du réseau multimodal. Cependant, ce jeu de données ne permet pas de générer directement

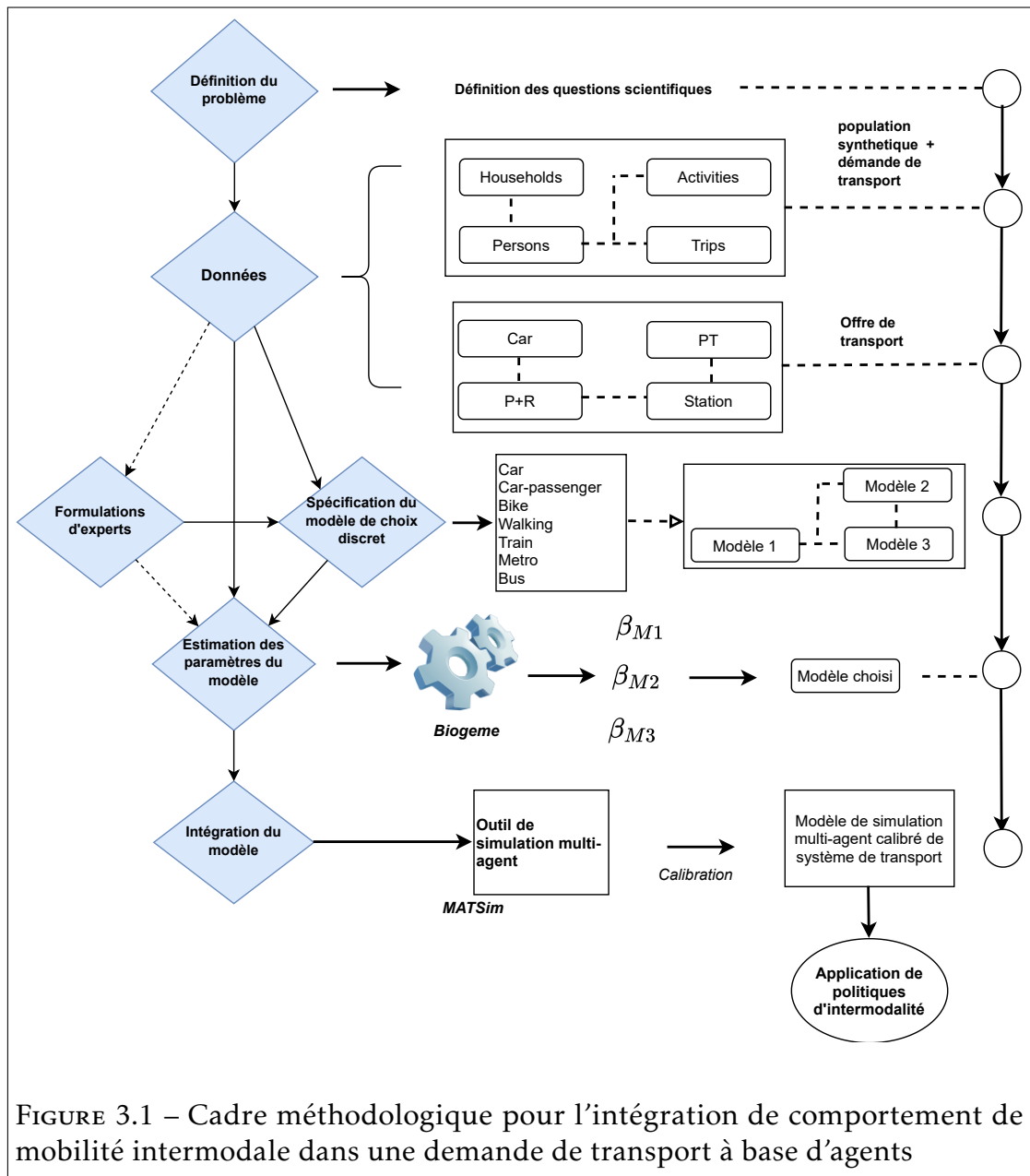


FIGURE 3.1 – Cadre méthodologique pour l'intégration de comportement de mobilité intermodale dans une demande de transport à base d'agents

une simulation d'un système de transport et de ses usagers. La construction de plusieurs modèles de choix discret peut être nécessaire pour étudier les relations entre les alternatives, notamment en intégrant des alternatives multimodales. Le modèle retenu sera par la suite intégré dans l'outil de simulation (*MATSim*) pour réaliser différents scénarios de mobilité sur un territoire donné.

La structuration du chapitre se présente comme suit. La première section présente notre approche pour reconstruire les informations manquantes (les communes d'activités, les coordonnées XY des origines/destinations (O/D) des déplacements, les distances et temps de parcours des autres alternatives, les combinaisons modales) issues de l'Enquête Ménage Déplacement (EMD). La section suivante décrit notre approche de modélisation du choix modal en tenant compte d'alternatives intermodales. Enfin, nous détaillons les adaptations réalisées dans *MATSim* pour permettre la simulation des déplacements intermodaux.

3.1 Reconstruction des informations manquantes de l'EMD

Pour éviter l'identification indirecte de personnes interrogées dans les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD), les zones (communes) de résidence et d'activités sont floutées et les coordonnées des O/D des déplacements sont supprimées. En outre, les informations sur les pratiques intermodales ne sont pas directement exploitables sans un travail préalable sur ces données. Nous montrons comment reconstruire ces informations sans trahir la protection des données personnelles.

3.1.1 Reconstitution des déplacements intermodaux

Comme évoqué précédemment (cf. sous-section 1.2.4), seules les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) permettent de renseigner sur les déplacements effectués par des modes de transport combinés. En effet, les données de l'EMD sont regroupées dans quatre fichiers permettant de traiter spécifiquement les informations sur les ménages, les personnes, les déplacements et les trajets. Le fichier *ménages* renseigne sur toutes les caractéristiques du ménage (p. ex., motorisation, localisation, type d'habitat). Celui sur les personnes informe sur les caractéristiques comme l'âge, l'occupation professionnelle, et la possession de permis de conduire. Le fichier *déplacements* renseigne sur le mode principal de transport utilisé, le motif, l'heure de départ et la distance du déplacement. Le mode principal est déterminé en fonction d'une hiérarchie élaborée par le

CEREMA [1] (cf. Tableau 3.1). Ainsi, lorsque deux ou plusieurs modes sont

TABLEAU 3.1 – Hiérarchisation des modes de transport (Cerema [1]).

| Ordre | Modes de transport |
|-------|---|
| 1 | Passager métro Transpole |
| 2 | Passager tramway Transpole |
| 3 | Passager bus Transpole |
| 4 | Réseau de Lijn |
| 5 | Réseau TEC |
| 6 | Passager cars départementaux (Arc en ciel) |
| 7 | Passager train |
| 8 | Passager Shuttle (Tunnel sous la Manche en voiture/moto) |
| 9 | Passager autres autocars |
| 10 | Transport employeur (exclusivement) |
| 11 | Passager taxi, VTC |
| 12 | Conducteur de fourgon, camionnette, camion |
| 13 | Passager de fourgon, camionnette, camion |
| 14 | Autres modes (tracteur, engin agricole, quad, etc.) |
| 15 | Conducteur de véhicule particulier (VP) |
| 16 | Passager de véhicule particulier (VP) |
| 17 | Conducteur de deux ou trois roues motorisés $\geq 50cm^3$ |
| 18 | Passager de deux ou trois roues motorisés $\geq 50cm^3$ |
| 19 | Conducteur de deux ou trois roues motorisés $< 50cm^3$ |
| 20 | Passager de deux ou trois roues motorisés $< 50cm^3$ |
| 21 | Conducteur « Vélos Libre-Service » (V'Lille, Vélib, etc.) |
| 22 | Conducteur de vélo |
| 23 | Passager de vélo |
| 24 | Trottinette |
| 25 | Skate |
| 26 | Roller |
| 27 | Fauteuil roulant |
| 28 | Passager autre réseau urbain |
| 29 | Transport Fluvial ou maritime |
| 30 | Avion |
| 31 | Marche |

utilisés lors du déplacement, c'est celui qui a la plus haute hiérarchie qui est retenu. Par exemple, un déplacement en voiture (en tant que conducteur) plus train, sera considéré comme avoir été effectué en train en mode principal. Le

fichier *trajets* informe sur le ou les modes de transport réellement utilisés durant le déplacement. En effet, un déplacement est composé d'un ou plusieurs trajets comme prendre une correspondance bus/métro ou combiner les modes voiture et tramway. Ce fichier permet donc de reconstituer les informations de déplacements intermodaux. Il faut noter ici que nous considérons comme un déplacement intermodal, la combinaison de plusieurs modes mécanisés. La combinaison de plusieurs moyens de transport public (TP) (p. ex., bus et le métro) est donc un déplacement intermodal [113, 112].

Pour reconstituer les déplacements intermodaux, nous avons identifié tous les trajets pour chaque déplacement en fusionnant ces deux fichiers. En outre, nous avons utilisé la modélisation suivante :

- Tous les modes de transports publics (bus, métro, tramway, train) sont représentés par un seul mode *TP*.
- Le mode voiture en tant conducteur ou passager est considéré comme voiture privée (*VP*). Par exemple, $VP_{conducteur} + TP = TP + VP$ et $VP_{passager} + TP = TP + VP$.
- Ne pas considérer deux fois le même mode hors TP lors du déplacement. Par exemple, $VP + TP + TP = TP + VP$ ou encore $Vélo + TP + TP = TP + Vélo$.
- Ne pas considérer les combinaisons trop peu représentatives comme $VP + Vélo$ ou encore $VP + Vélo + TP$.

Grâce à cette modélisation, nous avons pu identifier les parts modales des combinaisons de modes. La représentativité des pratiques modales dépend donc de la zone d'étude et par ricochet des données recueillies dans l'EMD. Nous reviendrons sur le choix des combinaisons de modes retenues dans le cadre de notre étude en sous-section 4.1.2 . La sous-section suivante présente notre approche pour générer les données relatives aux alternatives non considérées dans le choix de l'individu lors de son déplacement.

3.1.2 Génération des alternatives non prises en compte dans le choix de départ de l'individu dans l'EMD

L'estimation d'un modèle de choix discret nécessite l'utilisation des données faisant ressortir les préférences des individus vers l'ensemble des alternatives disponibles. Pour le cas du choix modal, il faut disposer d'une base de données contenant l'ensemble des caractéristiques (p. ex., le temps et la distance de parcours) pour chaque mode de transport mis en concurrence. En général, ces types de données sont fournis par des enquêtes de type déclaré (*stated preferences survey*) permettant de recueillir les préférences des individus face à une situation hypothétique. Une autre option consiste à utiliser une enquête de type révélé (*revealed preferences survey*) comme les enquêtes ménages déplacements (EMD). Pour ce faire, il faut générer les autres alternatives non prises en compte durant l'enquête, en affectant tous les déplacements via une API de routage comme celle de Google¹ ou de Bing². Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé l'API de Google. En effet, la base de données Google est plus riche et plus fiable notamment ce qui concerne les temps de trajet.

L'utilisation des API de routage nécessite au moins la donnée de cinq informations :

- Le mode de transport qui détermine les types de voies pouvant être empruntés lors du calcul d'itinéraire.
- L'heure de départ qui doit correspondre à un temps futur en précisant le jour et l'heure (h :m :s) du départ. Les API de routage ne peuvent pas faire des requêtes pour des dates passées. Elles se basent sur les données passées du trafic pour faire le calcul d'itinéraire. Nous avons choisi la date du **13/09/2020** comme le jour de départ des différents déplacements issus de l'EMD. Cette date a été choisie pour correspondre à un jour ouvrable hors période de vacances pour s'approcher au mieux de la période de réalisation de l'enquête. Elle correspondait également à une période de situation normale après le premier confinement du 17 mars au 11 mai 2020. Par la suite, nous avons conservé les mêmes heures de départ que

1. <https://developers.google.com/maps/documentation/directions/overview>

2. <https://docs.microsoft.com/en-us/bingmaps/rest-services/routes/>

celles présentes dans l'EMD pour les déplacements. Bien que l'enquête ait été réalisée en 2016, nous espérons ainsi obtenir des résultats proches (en termes d'itinéraire et de temps de parcours) de ce qu'auraient pu obtenir les personnes enquêtées.

- Les adresses d'origine et de destination du déplacement qui correspondent soit à une adresse postale, soit à une coordonnée géographique (latitude/longitude). Puisque l'EMD ne renseigne pas sur ces informations, nous avons donc dû reconstruire ces coordonnées pour permettre le routage. Nous montrons dans la sous-section 3.1.4 comment faire cette reconstruction.

Le tableau 3.2 donne un aperçu des résultats du calcul des temps et distances de parcours des modes de transport pour 10 déplacements issus de l'EMD. Les six premières colonnes correspondent aux données de l'EMD et se présentent comme suit :

- l'heure de départ (*dep. time*);
- le motif (*purpose*) du déplacement comme le travail et l'éducation ;
- la distance euclidienne (*euclidean distance*) est la distance à vol d'oiseau entre les points origine et destination ;
- le mode principal de transport (*mode*) utilisé pour le déplacement ;
- la distance de routage (*routed distance*) calculée par le CEREMA grâce à un modèle d'affectation ;
- la durée du déplacement (*trip duration*) fournie par la personne enquêtée.

Les autres colonnes proviennent du résultat de routage avec l'API Google et renseignent sur les distances et les durées pour les autres alternatives de transport. Les colonnes *origin address* et *destination address* correspondent respectivement aux adresses postales origine et destination qui ont été reconstruites³. On note quelques écarts entre les durées et distances de référence (EMD) et celles issues du routage pour le même mode de transport (voir les données en gras dans le tableau). Ces écarts peuvent se justifier soit par la situation du trafic durant les deux périodes, soit par les coordonnées XY des O/D reconstruites.

3. Ces adresses, issues des requêtes Google, ne sont pas liées aux personnes interrogées dans l'enquête.

Comme on pouvait s'y attendre, les temps et distances de parcours varient en fonction du mode de transport. En fonction de l'état du trafic, il est parfois plus rapide d'utiliser le vélo que la voiture (p. ex., les déplacements des lignes 1 et 2). Cependant, la voiture reste le mode de transport le plus rapide même si les distances à parcourir sont plus importantes.

TABLEAU 3.2 – Extrait du calcul des temps et distances de parcours des modes de transport avec l'API Google Directions pour 10 déplacements issus de l'EMD.

| Data from EMD (2016) | | | | | Reconstructed Data | | | | | Data from Google Maps API (obtained in 2020) | | | | | | |
|----------------------|---------|------------------------|------|---------------------|--------------------|---|--|------------------|------------------|--|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|
| dep. time | purpose | euclidean distance (m) | mode | routed distance (m) | trip duration (s) | origin address | destination address | distance car (m) | duration car (s) | duration in traffic car (s) | distance pt (m) | duration pt (s) | distance bike (m) | duration bike (s) | distance walking (m) | duration walking (s) |
| 10:40:00 | other | 120 | bike | 216 | 60.0 | 4 Rue Jean Baptiste Lebas, 59390 Lys-lez-Lannoy | 86 Av. Jean Jaurès, 59390 Lys-lez-Lannoy | 352 | 123 | 123 | 352 | 260 | 352 | 86 | 352 | 260 |
| 08:20:00 | other | 1867 | car | 2275 | 300.0 | 86 Rue de la Vigne, 59100 Roubaix | 81 Rue Ferdinand Buisson, 59150 Wattrelos | 3499 | 410 | 452 | 2288 | 1020 | 2695 | 585 | 2626 | 1943 |
| 08:00:00 | work | 2289 | pt | 3434 | 1200.0 | 84 Rue de Lannoy, 59800 Lille | 2 Rue du Barreau, 59650 Villeneuve-d'Ascq | 3080 | 541 | 536 | 9680 | 2066 | 3076 | 639 | 2877 | 2171 |
| 19:50:00 | other | 324 | car | 583 | 300.0 | 40 Av. de l'Europe, 59139 Wattignies | 68 Av. de l'Europe, 59139 Wattignies | 2500 | 394 | 369 | 1985 | 1297 | 2241 | 450 | 1963 | 1468 |
| 23:37:00 | home | 406 | walk | 467 | 420.0 | 123 Rue Charles Gou-nod, 59700 Marcq-en-Barœul | 4 Rue Henri Dunant, 59700 Marcq-en-Barœul | 589 | 150 | 143 | 521 | 382 | 607 | 125 | 521 | 382 |
| 11:15:00 | home | 870 | walk | 1000 | 900.0 | 100 Av. Willy Brandt, 59777 Lille | 28 Rue Nationale, 59800 Lille | 2638 | 622 | 674 | 1089 | 826 | 1228 | 538 | 1089 | 826 |
| 16:00:00 | home | 955 | car | 1574 | 300.0 | 16 All. Georges Clemenceau, 59130 | 74 All. du Château Blanc, 59130 | 1304 | 262 | 286 | 2249 | 834 | 1603 | 376 | 1304 | 983 |
| 13:30:00 | other | 3101 | car | 4310 | 1800.0 | 28 All. des Aulnes, 59290 Wasquehal | 7 Rue des Châteaux, 59700 Marcq-en-Barœul | 7407 | 761 | 831 | 17918 | 5210 | 5909 | 1250 | 4836 | 3634 |
| 18:00:00 | leisure | 870 | walk | 1000 | 900.0 | 81 Rue Desmazières, 59110 La Madeleine | 2 Rue du Président Georges Pompidou, 59110 | 946 | 205 | 211 | 896 | 684 | 946 | 238 | 896 | 684 |
| 11:00:00 | shop | 580 | walk | 667 | 600.0 | 5 Rue des Résistants, 59280 Armentières | 29 Rue Arthur Defer, 59280 Armentières | 904 | 173 | 191 | 904 | 690 | 904 | 205 | 904 | 690 |

3.1.3 Calcul du coût du transport

Le coût du transport est un facteur important dans le choix du mode de transport. Cette variable doit donc intervenir dans les fonctions d'utilité des alternatives modales. Après avoir généré toutes les alternatives constituant l'univers de choix de l'individu, on peut calculer les différents coûts pour chaque mode de transport. Nous supposons que le vélo (non prise en compte des vélos en location) et la marche à pied n'engendrent pas de coût de transport. Les coûts d'utilisation de la voiture sont évalués par km parcourus et sont calculés en fonction des recommandations du CEREMA [33] :

- Coûts « d'usage » (entretien et dépréciation évalués respectivement à 8.9 c€/km et 1.3c€/km (2010).
- Coûts de carburant : selon le guide d'information CO2 des prestations de transport de l'Agence de la transition écologique (ADEME)⁴, un véhicule de tourisme moyen consomme 0,07 litre par km. Le prix du carburant dépend de la motorisation (diesel ou essence), du type de carburant (p. ex., sans plomb 95-E10, sans plomb 95, sans plomb 98, superéthanol E85) et de la station de service. Nous avons donc décidé de prendre un prix moyen de 1,52 euros pour un litre de carburant. La formule de calcul du coût de déplacement en voiture est définie par :

$$\begin{aligned} \text{coutDepVoiture} &= \text{distance}(km) \times \text{consoVoiture} \times \text{prixCarburantLitre} \\ &= \text{distance}(km) \times 0,07(l/km) \times 1,52(€/l) \end{aligned}$$

- Coûts de péage autoroutier (s'il y a lieu).

Le coût du déplacement en transports publics (TP) est conditionné par la possession d'un titre de transport valide. Ce titre peut être soit un ticket unitaire, soit un abonnement mensuel ou annuel. Dans le cas de possession d'un abonnement, le coût du déplacement sera égal à zéro. Sinon, un montant moyen de 1,75 € par déplacement sera considéré.

4. https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/86275_7715-guide-information-co2-transporteurs.pdf

Nous tenons compte également de la valeur du temps (*value of time VOT*)⁵ en fonction du motif (p. ex., professionnel, éducatif) et de la zone (urbaine et non urbaine) de déplacement pour calculer le coût total du déplacement en voiture et en transports publics. Pour ce faire, nous avons utilisé les valeurs de référence proposées dans [102]. Le Tableau 3.3 présente les valeurs du temps pour une zone urbaine en France en fonction du motif du déplacement.

TABLEAU 3.3 – Valeurs urbaines du temps, tous modes (en €/h en 2010 en France) [102].

| Motif du déplacement | Valeurs (€/h) |
|--|---------------|
| Professionnel | 17,5 |
| Domicile-lieu de travail/école/- crèche | 10,0 |
| Autre (achat, visite, loisir) | 6,8 |
| Pas de raison donnée | 7,9 |

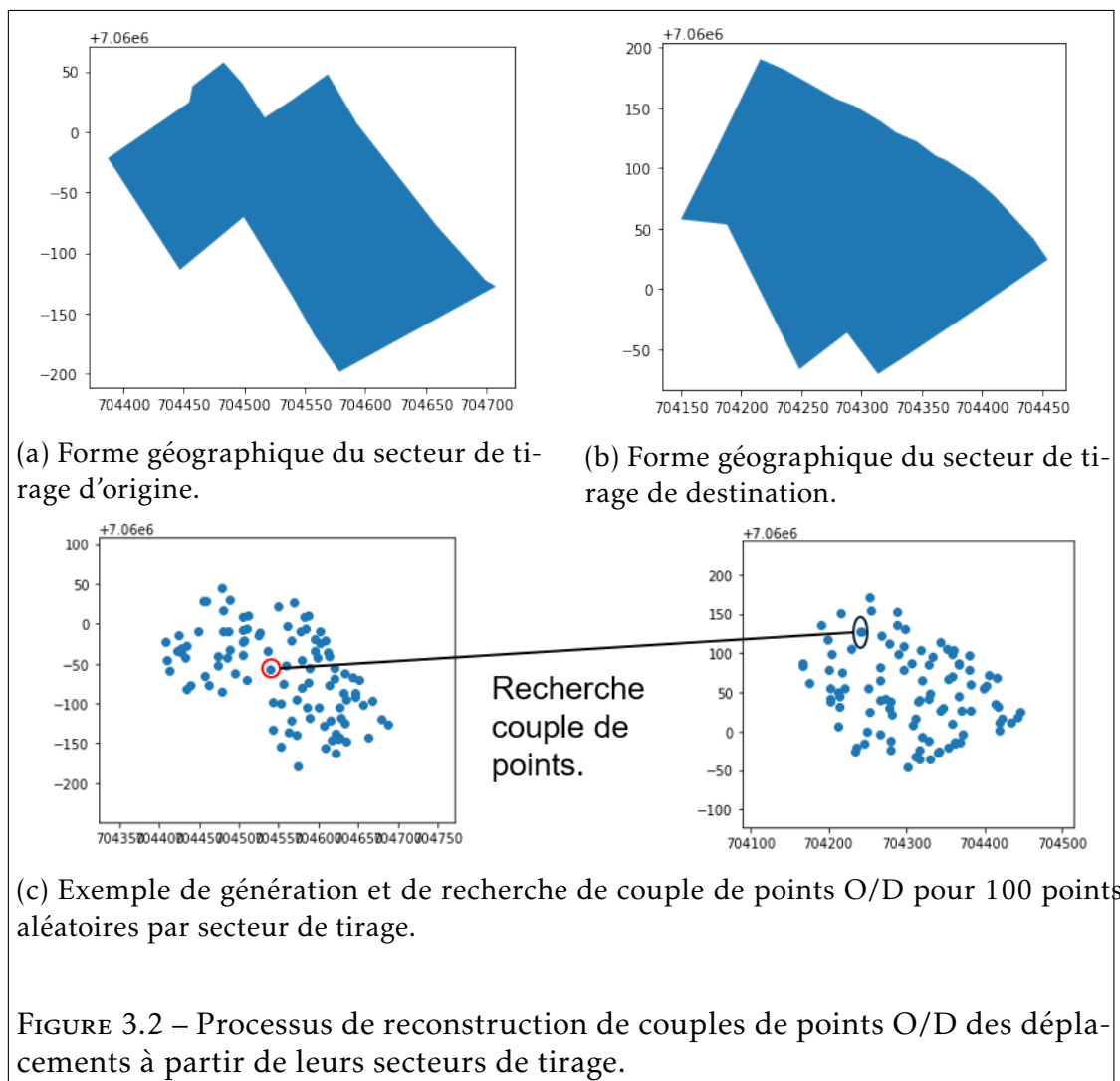
3.1.4 Reconstruction des coordonnées O/D des déplacements

Selon les données de l'EMD, seules la distance euclidienne (distance à vol d'oiseau) et les O/D à l'échelle des secteurs de tirage pour chaque déplacement sont disponibles. Ces coordonnées sont nécessaires à l'estimation des paramètres du modèle de choix discret de mode de transport. En effet, il faut reproduire le déplacement initial (comme défini dans l'enquête) avec toutes les autres alternatives de transport. Pour cela, nous avons besoin des coordonnées géographiques des O/D du déplacement pour tenir compte de toute l'offre de transport disponible (p. ex., la proximité d'un arrêt de transport public). Ainsi, l'individu pourra faire son choix en fonction de l'utilité que lui apporte chaque mode. La méthode que nous utilisons est assez simple et est définie en deux étapes :

5. En économie des transports, la valeur du temps correspond au coût d'opportunité (perte de valeur ou d'avantage pour une activité donnée) du temps qu'un individu consacre à son voyage, c'est à dire le montant que l'individu est prêt à payer pour gagner du temps (ou à accepter comme compensation pour le temps perdu) lors de son déplacement. Ce coût varie en fonction des individus et du motif de déplacement [137].

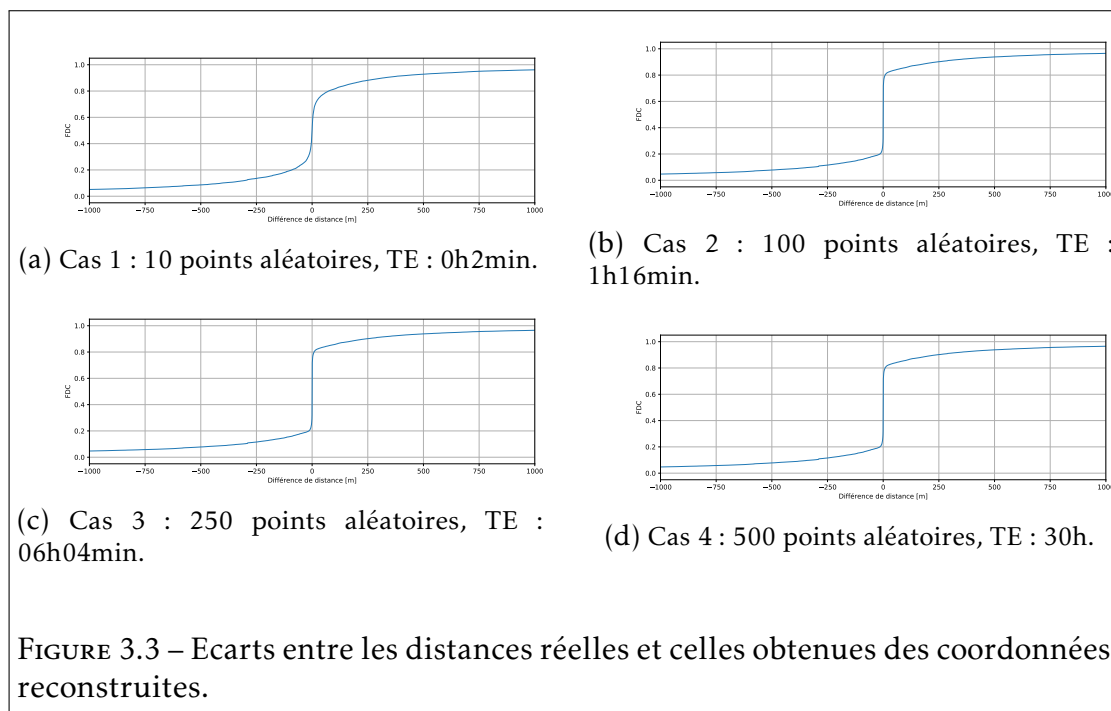
1. Génération aléatoire $N \in \mathbb{N}$ points dans les secteurs de tirage des O/D ;
2. Recherche d'un point dans la zone d'origine correspondant à un point de la zone de destination de sorte que la distance (euclidienne) entre ces deux points soit la plus proche possible à celle fournie dans l'enquête.

Il faut noter ici que nous conservons la coordonnée du point correspondant au domicile pour garantir la consistance des déplacements entre le domicile et les autres activités (p. ex., travail, éducation). Un exemple de génération et de recherche de couple de points pour deux secteurs de tirage O/D donnés est fourni dans la Figure 3.2c. Les formes des secteurs de tirage O/D sont représentées



respectivement dans les figures 3.2a et 3.2b. Dans cet exemple, les deux points identifiés fournissent une distance proche de celle de référence.

Pour évaluer la qualité des points générés et le processus de mise en correspondance des points O/D, nous avons analysé les écarts entre les distances réelles (de l'EMD) et celles obtenues des coordonnées reconstruites. La Figure 3.3 donne un aperçu de cette évaluation avec respectivement 10 (Figure 3.3a), 100 (Figure 3.3b), 250 (Figure 3.3c) et 500 (Figure 3.3d) points à générer aléatoirement dans les zones de secteurs de tirage et leur temps d'exécution (TE). Le nombre de couples de coordonnées O/D à reconstruire est 24 630 correspondant à l'ensemble des déplacements de l'EMD 2016 de la MEL. Les calculs ont été réalisés sur une machine équipée d'un processeur *Intel Xeon CPU E5-2650 v4 2.2 GHz* (2 processeurs) avec 128 Go de RAM.



La différence entre les deux distances (réelles et reconstruites) est représentée par l'axe des abscisses. Sur l'axe des ordonnées, nous avons la fonction de distribution cumulative (FDC) de cette différence. Comme on pouvait s'attendre, plus il y a de points générés, plus la différence entre les distances est moindre. Egalement, plus le nombre de points à générer est important, plus le temps d'exé-

cution sera considérablement grand. En effet, on passe de 2 min pour 10 points à 1 800 min pour 500 points (soit 900 fois plus de temps). Cette importance du temps d'exécution est due à la complexité de notre algorithme de recherche qui est de l'ordre de $\mathcal{O}(n^2)$ (quand on ajoute un nouveau point, il faut faire $2 \times n$ opérations).

Bien que le temps de calcul soit important, l'algorithme produit des résultats satisfaisants à partir d'une centaine de points à générer. En effet, on peut voir dans les Figures 3.3b, 3.3c et 3.3d que la base de la courbe est bien centrée au niveau de 0 sur l'axe des abscisses. En outre les écarts entre deux distances restent relativement faibles (au tour de 250 à 1 000 m); ce qui est acceptable dans notre cas d'étude visant à se rapprocher de la situation réelle.

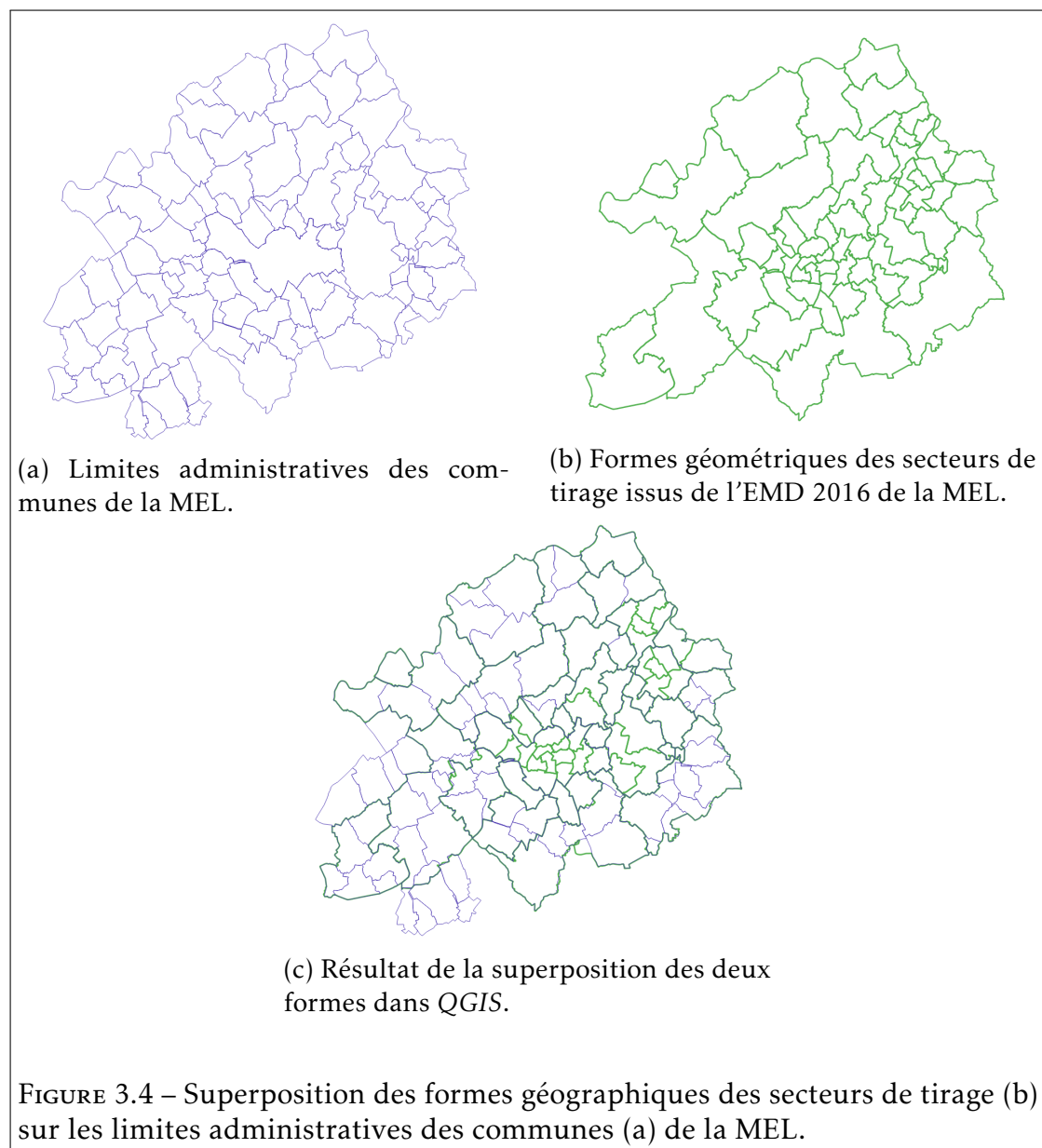
3.1.5 Reconstruction des communes origine/destination

Pour garantir la protection des données à caractère personnel, les communes de résidence et des zones d'activités ont été floutées dans les EMD. En général, les zones géographiques de résidence et d'activités sont représentées par le code *IRIS* (6 chiffres dont les cinq premiers correspondent au code BP de la commune). Pour flouter ces informations, les zones ont été codées en 4 chiffres dont les trois premiers correspondent aux secteurs de tirage disponibles avec les données d'enquête. Le dernier chiffre renseigne sur la nature de la zone : 0 pour zone fine simple⁶, 1 – 8 pour désigner un générateur de trafic (p. ex., 1 pour commerce, 3 pour éducation). Par conséquent, pour trouver les communes, nous avons superposé les formes géographiques des secteurs de tirage avec les informations de délimitation des communes de la zone d'étude (généralement disponibles en données ouvertes). Cette superposition peut se faire grâce à l'utilisation d'un logiciel de traitement des données géographiques comme *QGIS* et *ARCGIS*. Ces communes ainsi reconstituées pour compléter les données de l'enquête de déplacements, sont utilisées pour la génération de la population synthétique afin de créer la demande de transport.

La Figure 3.4c donne un aperçu de cette superposition du cas de la Métropole

6. Les zones fines décrivent précisément les O/D des déplacements dans une zone géographique plus petite que le secteur de tirage.

Européenne de Lille : les contours géographiques (limites administratives) des communes (disponibles en accès public⁷) (en bleu) sont représentées à la Figure 3.4a et ceux des secteurs de tirage (en vert) dans la Figure 3.4b. On peut voir



que le centre correspondant à la ville de Lille (commune principale) est composé

7. https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/mel_communes/information/?disjunctive.insee&sort=-insee

de plusieurs secteurs de tirage tandis que certaines communes (périphériques) appartiennent à une même zone statistique. Grâce à cette méthode, il est possible d'identifier facilement les communes de résidence et d'activités à partir des secteurs de tirage issus de l'enquête de déplacements. En effet, comme on peut le voir sur la Figure 3.4c, la taille du secteur de tirage est inférieure ou égale à celle de la commune. Quand la commune a une forte densité démographique (comme le cas de Lille), elle est composée de plusieurs secteurs de tirage.

Une fois toutes les données nécessaires à l'estimation des modèles de choix discret de mode et de demande de transport, nous pouvons passer à l'étape de définition proprement dite de ces modèles.

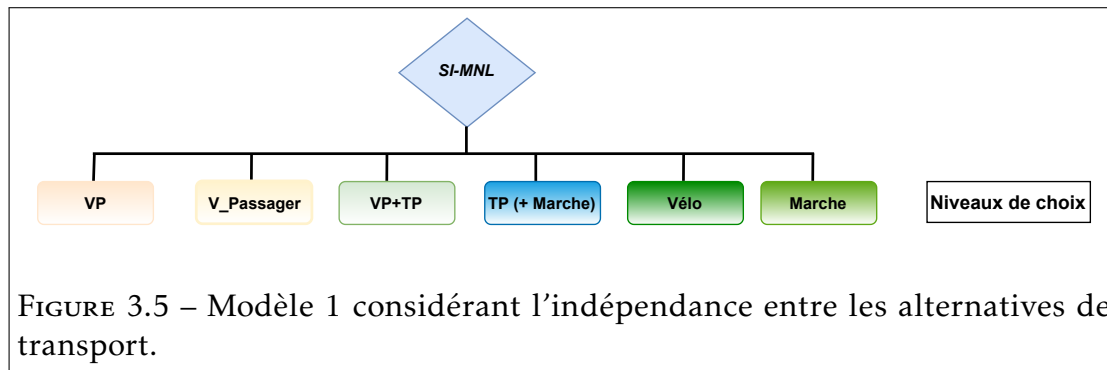
3.2 Modèles de choix discret avec l'alternative intermodale Voiture Personnelle + Transports publics (VP+TP)

Les modèles de choix discret interviennent dès lors que la dimension humaine entre dans le processus de décision pour le choix d'une alternative (voir sous-section 2.2.3). Cette section présente les différentes structures des modèles de choix discret pour la prise en compte de l'alternative intermodale Voiture Personnelle + Transports publics (VP+TP) dans le choix du mode de transport. Elle détaille ensuite les différentes fonctions d'utilité pour chaque alternative.

3.2.1 Structures des modèles proposés

La définition de plusieurs modèles « tests » peut être nécessaire pour se rapprocher le plus de la réalité ou pour mieux répondre aux questions scientifiques. Ainsi, nous allons étudier la nécessité ou non d'emboîter le modèle, de même que la nécessité de segmenter ou non certains paramètres/constantes d'alternatives. Nous proposons quatre modèles *logit multinomial* (MNL). Comme présenté précédemment (voir sous section 2.2.3), le choix des modèles logit multinomial se justifie par la simplicité de leur mise en oeuvre pouvant être supportés par des travaux existants. Ces différents modèles sont présentés ci-dessous.

Modèle 1 - Simple Intermodal MNL (SI-MNL) model : Indépendance entre les modes de transport. Ce modèle est fondé sur l'une des propriétés des modèles MNL à savoir l'indépendance entre les alternatives *IIA*⁸. Nous supposons donc que les alternatives sont indépendantes et que les termes d'erreur ne sont pas corrélés. La Figure 3.5 présente la structure du modèle.



Comme on peut le voir, il n'existe aucune hiérarchie entre les alternatives. Tous les modes sont au même niveau. En se basant sur l'équation 2.3, la probabilité pour un individu i de choisir par exemple la voiture est :

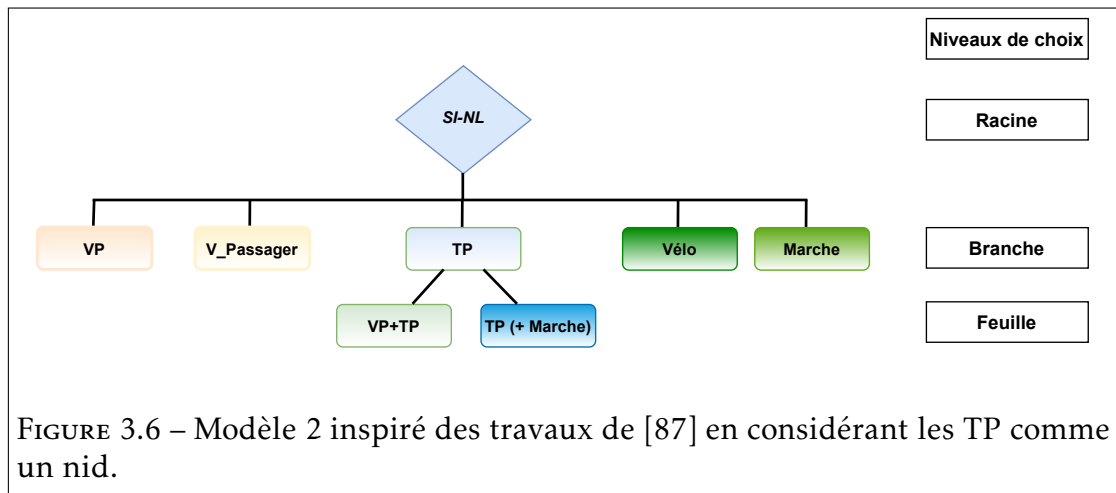
$$P_{i,VP} = \frac{e^{(\beta z_{i,VP})}}{e^{(\beta z_{i,V_passenger})} + e^{(\beta z_{i,VP_TP})} + e^{(\beta z_{i,TP})} + e^{(\beta z_{i,Velo})} + e^{(\beta z_{i,Marche})}} \quad (3.1)$$

Où z et β sont les vecteurs correspondant respectivement aux variables explicatives observées et les coefficients appliqués à ces variables.

Modèle 2 Simple Intermodal nested logit (SI-NL) model : La structure de ce modèle est inspirée de celle proposée dans [87]. Ce modèle considère les transports publics (TP) comme le mode principal avec l'un des modes individuels (vélo ou voiture personnelle) comme mode d'accès/de sortie secondaire dans la combinaison intermodale (Figure 3.6).

Ce deuxième modèle hiérarchique permet de prendre en compte les évolutions de l'offre de transports publics (TP) qui est au coeur des systèmes de transport intermodal. Il permet aussi de mesurer les impacts de cette offre sur

8. *Independence of Irrelevant Alternatives* est la propriété d'indépendance vis-à-vis des autres alternatives. C'est une des hypothèses de base du modèle MNL.



les principaux modes secondaires que sont le vélo et la voiture, utilisés pour les combinaisons modales avec les TP. Il est important de noter ici que les diagrammes représentent simplement les modèles d'imbrication et la structure des modèles logit et non l'idée de la manière séquentielle dont les individus font leurs choix.

La clé des modèles *nested logit* (NL) ou logit emboîté dépend de la façon dont sont formés les nids (différentes structures de nid produiront un résultat différent). En général, le choix du nid est fait en fonction des alternatives (modes) qui sont potentiellement proches ou similaires pour permettre les corrélations entre elles. Ces alternatives sont regroupées dans des ensembles de choix appelés nids ou branches. Les nids sont supposés indépendants (non corrélés en eux). L'utilité d'une alternative (choix) dans un nid (branche) est définie par :

$$U(\text{Choix}, \text{Branche}) = U(\text{Choix}|\text{Branche}) + U(\text{Branche}) \quad (3.2)$$

où :

- $U(\text{Branche})$ est une fonction de certaines variables caractéristiques de la branche comme le prix ou le confort.
- $U(\text{Choix}|\text{Branche})$ est une fonction de certaines variables caractéristiques de l'individu (p. ex., âge) et du choix (p. ex., temps de parcours).

Ainsi, la probabilité de choisir une alternative dans un nid (branche) est condi-

tionnée par le choix de ce nid et est définie par :

$$Prob(Choix, Branche) = Prob(Choix|Branche) \times Prob(Branche) \quad (3.3)$$

L'estimation du choix (alternative) dans un nid ou une branche nécessite donc deux modèles : un modèle de sélection de la branche (nid) et un modèle de choix, compte tenu de la sélection de la branche (nid). On utilise généralement les modèles logit (ou multinomial logit) pour estimer ces sélections. Par exemple, dans le cas de notre modèle *SI-NL*, la probabilité pour un individu i de choisir l'alternative VP+TP est définie par :

$$P_{i,VP_TP} = P_{i,VP_TP|TP} \times P_{i,TP} \quad (3.4)$$

Avec

$$P_{i,VP_TP|TP} = \frac{e^{(\beta z_{i,VP_TP})/\lambda_{TP}}}{e^{(\beta z_{i,VP_TP})/\lambda_{TP}} + e^{(\beta z_{i,TP_Marche})/\lambda_{TP}}}$$

$$P_{i,TP} = \frac{e^{Z_{TP}\alpha} (e^{(\beta z_{i,VP_TP})/\lambda_{TP}} + e^{(\beta z_{i,TP_Marche})/\lambda_{TP}})^{\lambda_{TP}}}{V_{i,TP}}$$

$$V_{i,TP} = e^{Z_{TP}\alpha} (e^{(\beta z_{i,VP_TP})/\lambda_{TP}} + e^{(\beta z_{i,TP_Marche})/\lambda_{TP}})^{\lambda_{TP}} + e^{(\beta z_{i,VP})} + e^{(\beta z_{i,V_Passager})} + e^{(\beta z_{i,Velo})} + e^{(\beta z_{i,Marche})}$$

— $\lambda \in]0, 1]$, Corrélation à l'intérieur du nid = $1 - \lambda$

Si $\lambda = 1$, alors il n'y a pas de corrélation entre les alternatives du nid.

— Z_{TP} le vecteur des caractéristiques spécifiques à la branche (nid) « TP » (p. ex., prix ou confort) et α un facteur d'échelle attribué au nid (généralement égal à 1).

Bien que la structure de ce deuxième modèle soit inspirée de [87], toutes

les fonctions d'utilités des alternatives et les calculs associés font partie de notre contribution. En effet, dans l'article de référence, aucune définition de ces fonctions d'utilité n'a été proposée.

Modèle 3 - *Intermodal double nested logit (I-2NL) model* : *Nested logit* avec deux nids « alternatives à la voiture » et « TP ». Ce modèle est une des recommandations du CEREMA [33]. La Figure 3.6 donne un aperçu de ce modèle.

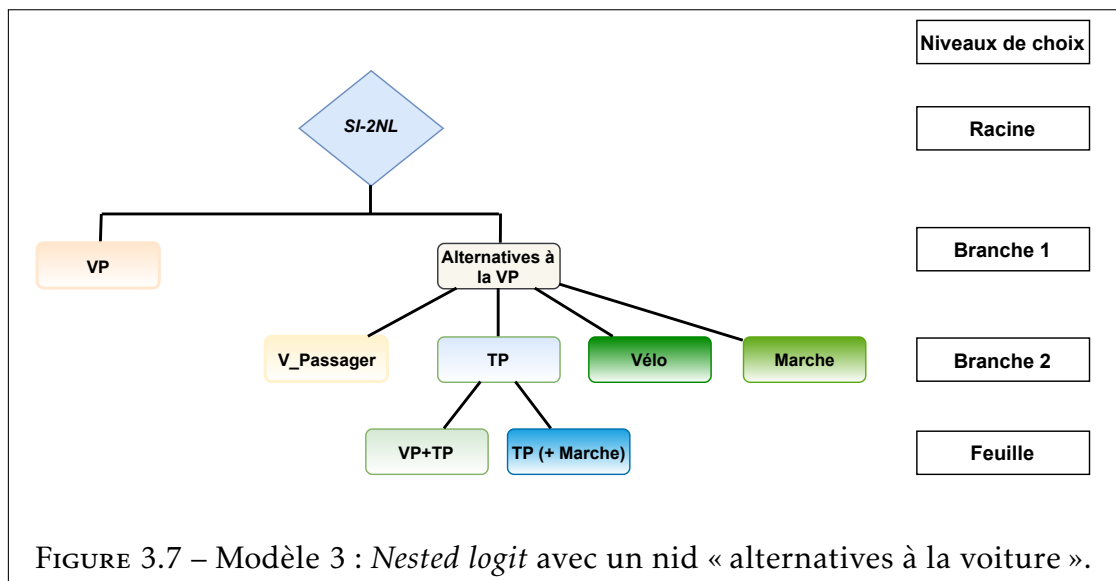


FIGURE 3.7 – Modèle 3 : *Nested logit* avec un nid « alternatives à la voiture ».

Ce modèle tient compte de la relation entre l'utilisation de la voiture personnelle avec les autres modes qui sont considérés comme une alternative dans ce cas. Cette approche permet de réduire l'influence de la forte utilisation de la voiture personnelle sur les autres modes de transport considérés individuellement. L'utilité du nid « Alternatives à la VP » est mieux perçue par le modélisateur et est composée des utilités des modes qui le composent (*V-Passager*, *TP*, *Vélo* et *Marche*). Par la suite, on considère un deuxième nid basé sur les transports publics comme dans le deuxième modèle.

Le modèle ainsi obtenu est plus complexe que les deux précédents. Il contient deux nids : le nid « Alternatives à la VP » et le nid « TP ». Pour le calcul des probabilités de choix, on procède d'abord par le nid le plus bas. Ainsi, l'utilité

du nid « TP » est calculée comme dans le premier modèle. Ensuite, celle du nid « Alternatives à la VP » est évaluée de la même manière en tenant compte des utilités des alternatives ($V_{Passager}$, TP , $Vélo$ et $Marche$). La formule du calcul de la probabilité pour un individu i de choisir l'alternative VP+TP reste inchangée (cf. équation 3.4). Mais, la probabilité de choisir la branche (nid) « TP » alors est conditionnée par le choix du nid « Alternatives à la VP » et est définie par :

$$P_{i,TP} = P_{i,TP|Alternatives_VP} \times P_{i,Alternatives_VP} \quad (3.5)$$

Avec

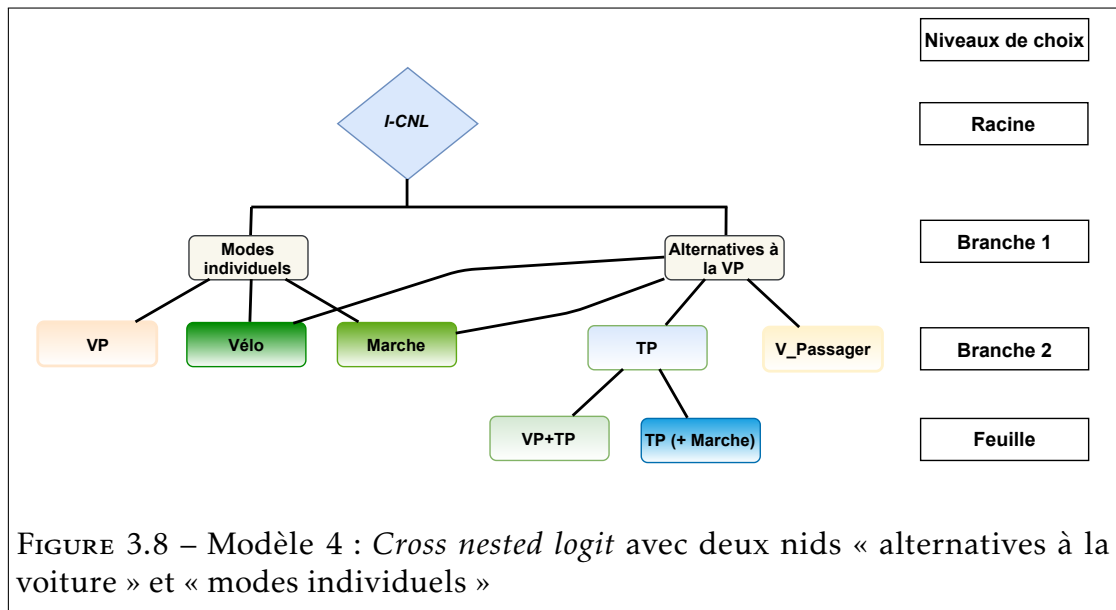
$$P_{i,TP|Alternatives_VP} = \frac{e^{(\beta z_{i,TP})/\lambda_{Alternatives_VP}}}{V_{i,Alternatives_VP}}$$

$$V_{i,Alternatives_VP} = e^{(\beta z_{i,TP})/\lambda_{Alternatives_VP}} + e^{(\beta z_{i,V_Passager})/\lambda_{Alternatives_VP}} + e^{(\beta z_{i,Vélo})/\lambda_{Alternatives_VP}} + e^{(\beta z_{i,Marche})/\lambda_{Alternatives_VP}}$$

$$P_{i,Alternatives_VP} = \frac{e^{Z_{Alternatives_VP}\alpha} (V_{i,Alternatives_VP})^{\lambda_{Alternatives_VP}}}{e^{Z_{Alternatives_VP}\alpha} (V_{i,Alternatives_VP})^{\lambda_{Alternatives_VP}} + e^{(\beta z_{i,VP})}}$$

Modèle 4 - Intermodal Cross nested logit (I-CNL) model : Cross nested logit (CNL) avec trois nids « alternatives à la voiture », « modes individuels » et « TP ». Ce modèle est une imbrication des modes de deux nids « alternatives à la voiture » et « modes individuels ». Il permet de définir une appartenance d'un mode à plusieurs nids. Le but est de prendre encore plus en considération les relations entre les différents modes de transport en particulier les modes individuels et les modes collectifs tout en tenant compte des alternatives à la voiture. Cette approche permet au modélisateur de mieux saisir l'utilité des modes personnels par rapport à celle des modes partagés perçue par l'individu.

La prise en compte des relations éventuelles entre les alternatives rend ce



modèle très complexe. Il est composé de trois nids avec des choix appartenant à des nids différents. Le principe de calcul des probabilités des nids reste similaire à celui utilisé dans les modèles imbriqués. On procède étape par étape pour calculer la probabilité à chaque niveau hiérarchique. La difficulté à ce niveau est l'appartenance des alternatives à des nids différents comme le vélo et la marche à pied qui appartiennent à la fois aux nids « Modes individuels » et « Alternatives à la VP ». Nous ne nous sommes pas pour l'instant focalisés sur la probabilité de choix de ces nids.

Le Tableau 3.4 donne un récapitulatif des différents modèles proposés. Nous avons fait le choix d'implémenter dans un premier temps les modèles 1 (SI-MNL) et 2 (SI-NL) pour tester notre approche méthodologique. En effet, les modèles 3 et 4 ont une structure hiérarchique plus complexe faisant intervenir plusieurs niveaux d'imbrications. Leurs implémentations nécessiteraient plus de temps de calcul sans l'assurance d'être autant plus efficaces et mieux que les deux premiers modèles.

Suite à la construction des différents modèles, nous pouvons maintenant passer à l'étape de définition des fonctions d'utilité pour chaque alternative.

TABLEAU 3.4 – Récapitulatif des différents modèles de choix discret proposés.

| Modèle | Prise en compte de IIA | Nombre de nids | Avec imbrication | Niveau hiérarchique |
|-------------------|--------------------------|--|------------------|---------------------|
| Modèle 1 (SI-MNL) | Non | Aucun | Non | Simple |
| Modèle 2 (SI-NL) | Entre TP et autres modes | 1 (TP) | Non | Moyen |
| Modèle 3 (SI-2NL) | Tous les modes | 2 (<i>Alternatives à la VP et TP</i>) | Non | Élevé |
| Modèle 4 (I-CNL) | Tous les modes | 3 (<i>Modes individuels, Alternatives à la VP et TP</i>) | Oui | Très élevé |

3.2.2 Fonctions d'utilité

Comme évoqué précédemment, le choix modal dépend de plusieurs facteurs aussi bien liés à l'individu qu'au mode de transport [113]. La Figure 3.9 donne un aperçu schématique de cette relation. En général, une personne dispose d'une ou plusieurs activités (p. ex., travail, éducation et achats) à réaliser durant la journée qu'on appelle la chaîne d'activités. Aussi, la réalisation d'une activité nécessite le plus souvent un déplacement qui s'effectue par le biais d'un mode de transport à utiliser. Enfin, le choix du mode de transport à utiliser dépend de plusieurs facteurs définis ci-dessus et influençant ce choix. Ainsi, le choix du mode de transport est effectué chaque fois qu'un usager décide de se déplacer.

Les fonctions d'utilités U des alternatives doivent donc tenir compte de la spécificité de chaque mode de transport et de l'individu ou de groupe d'individus (cf. équation 2.1). Les fonctions d'utilité que nous avons définies sont adaptées de celles proposées dans [73] et tiennent compte des recommandations du CEREMA [33]. Ces fonctions sont dans l'ensemble des sommes de produits des paramètres à estimer et les variables explicatives observées issues des données d'enquêtes de déplacement. Elles se présentent comme suit :

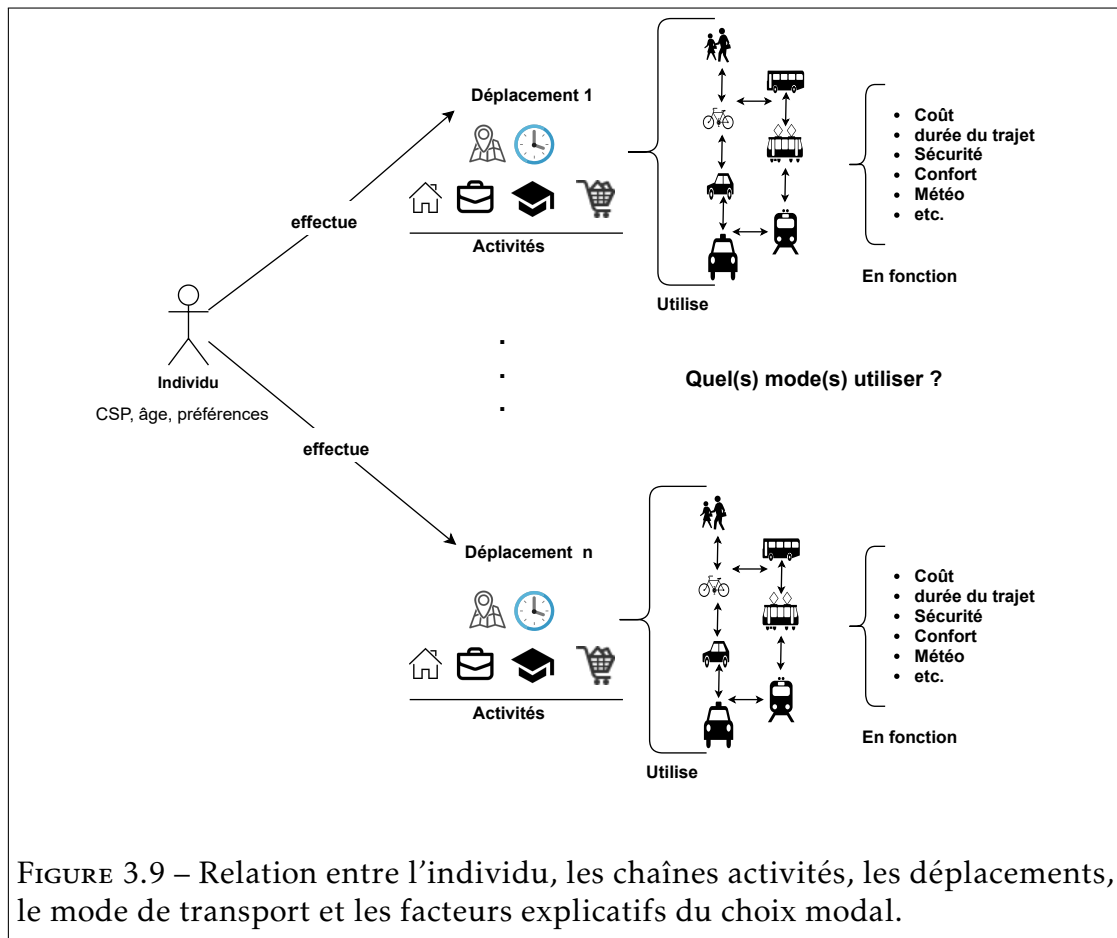


FIGURE 3.9 – Relation entre l’individu, les chaînes activités, les déplacements, le mode de transport et les facteurs explicatifs du choix modal.

$$\begin{aligned}
 U_{i,car} = & \beta_{ASC,car} + \beta_{inVehicleTime,car} \times x_{inVehicleTime,car} \\
 & + \beta_{inVehicleTime,car} \times \theta_{parkingSearchPenalty} \\
 & + \beta_{accessEgressWalkTime} \times \theta_{accessEgressWalkTime} \\
 & + \beta_{cost} \times x_{cost,car}
 \end{aligned}
 \tag{3.6}$$

$$\begin{aligned}
 U_{i,pt} = & \beta_{ASC,pt} + \beta_{inVehicleTime,pt} \times x_{inVehicleTime,pt} + \beta_{accessEgressTime,pt} \times x_{accessEgressTime,pt} \\
 & + \beta_{numberTransfers} \times x_{numberTransfers} + \beta_{transferTime,pt} \times x_{transferTime,pt} \\
 & + \beta_{cost} \times x_{cost,pt}
 \end{aligned}
 \tag{3.7}$$

$$U_{i,bike} = \beta_{ASC,bike} + \beta_{travelTime,bicycle} \times x_{travelTime,bike} + \beta_{highAge,bike} \times \begin{cases} 1 & \text{if } a_{age} \geq 60 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (3.8)$$

On suppose ici que l'utilisation du vélo peut être pénible à partir d'une certaine tranche d'âge (60 ans et plus). Par conséquent, son utilité peut être moins attrayante pour cette catégorie d'individus.

$$U_{i,walk} = \beta_{ASC,walk} + \beta_{travelTime,walk} \times x_{travelTime,walk} \quad (3.9)$$

Où,

- i : individu ;
- β : paramètres (coefficients) du modèle à estimer définis comme suit :
 - $\beta_{ASC,car}$: *Alternative Specific Constant* (ASC) (constante spécifique d'alternative) capture (appréhende) l'effet moyen sur l'utilité de l'alternative de tous les facteurs non inclus dans le modèle. Ainsi, $\beta_{ASC,car}$ capture pour l'utilité de la voiture ;
 - $\beta_{inVehicleTime,car}$: paramètre lié au temps de parcours passé dans la voiture ;
 - $\beta_{accessEgressWalkTime}$: paramètre lié au temps de marche pour accéder à la voiture et à la destination ;
 - $\beta_{ASC,pt}$: cas de l'utilité des transports publics ;
 - $\beta_{inVehicleTime,pt}$: paramètre lié au temps de parcours passé dans les transports publics ;
 - $\beta_{accessEgressTime,pt}$: paramètre lié au temps d'entrée/sortie des transports publics ;
 - $\beta_{transferTime,pt}$: paramètre lié au temps de transfert (s'il y a lieu) lors de l'utilisation des transports publics ;
 - $\beta_{numberTransfers}$: paramètre lié au nombre de transferts (s'il y a lieu) lors de l'utilisation des transports publics

- β_{cost} : paramètre lié au coût d'utilisation d'une alternative (voiture et transport public).
 - $\beta_{ASC,bike}$: cas de l'utilité du vélo;
 - $\beta_{travelTime,bicycle}$: paramètre lié au temps de parcours à vélo;
 - $\beta_{highAge,bike}$: paramètre lié à l'âge de l'individu pour l'utilisation du vélo;
 - $\beta_{ASC,walk}$: cas de l'utilité de la marche;
 - $\beta_{travelTime,walk}$: paramètre lié au temps de parcours à pied.
- x : variables explicatives observées (p. ex., temps de parcours, coût) du choix modal (fournies en entrée au modèle de choix discret) définies comme suit :
- $x_{inVehicleTime,car}$: temps de parcours en voiture;
 - $x_{cost,car}$: coût d'utilisation de la voiture;
 - $x_{inVehicleTime,pt}$: temps de parcours passé dans les transports publics;
 - $x_{accessEgressTime,pt}$: temps de parcours d'entrée/sortie aux transports publics;
 - $x_{numberTransfers}$: nombre de transferts effectués en transports publics;
 - $x_{cost,pt}$: coût d'utilisation des transports publics;
 - $x_{travelTime,bike}$: temps de parcours à pied;
 - a_{age} : age de l'individu;
 - $x_{travelTime,walk}$: temps de parcours à pied.
- θ : paramètres de calibration qui seront à ajuster (estimer) manuellement définis comme suit :
- $\theta_{parkingSearchPenalty}$: valeur moyenne de temps pour chercher une place de stationnement;
 - $\theta_{accessEgressWalkTime}$: valeur moyenne de temps à pied pour accéder à la voiture et à la destination finale.

Nous considérons un seul paramètre β_{cost} appliqué aux fonctions d'utilité de la voiture et des transports publics. En effet, nous supposons que les individus n'ont pas les mêmes perceptions de dépenser leur argent en termes d'utilité. De ce fait, cette dépense n'est pas liée nécessairement au mode de transport (alternative) mais plutôt à l'individu.

A partir des fonctions d'utilité pour *car* et *pt*, on peut aussi définir celle pour le mode *car_pt* comme la somme des utilités de ces deux alternatives en ajoutant la constante d'alternative *ASC* (cf. équation 3.10). Il faut noter ici, que cette fonction d'utilité n'est pas utilisée réellement dans l'estimation du modèle de choix discret. Elle intervient uniquement dans la simulation de la demande de transport. En effet, la fonction que nous avons définie est volontairement simplifiée par manque de données nécessaires à l'estimation des paramètres rentrant dans l'utilisation des TP et des voitures personnelles à travers les parkings relais (P+R). Il manque notamment les données sur l'utilisation des P+R et les étapes de changement de modes. Par exemple, les principaux attributs pour évaluer l'utilité des parkings relais sont le coût, le temps d'attente moyen pour accéder à un transport public les horaires d'ouverture et la disponibilité des places de stationnement. Le paramètre β_{ASC,car_pt} est donc estimé manuellement au même titre que les paramètres de calibration.

$$U_{i,car_pt} = \beta_{ASC,car_pt} + U_{i,car} - \beta_{inVehicleTime,car} \times \theta_{parkingSearchPenalty} + U_{i,pt} - \beta_{ASC,car} - \beta_{ASC,pt} \quad (3.10)$$

Suite à la construction du modèle de choix discret avec les alternatives intermodales, il faut définir leurs conditions d'utilisation et leurs critères de routage dans l'outil de simulation. La section présente ces différents développements.

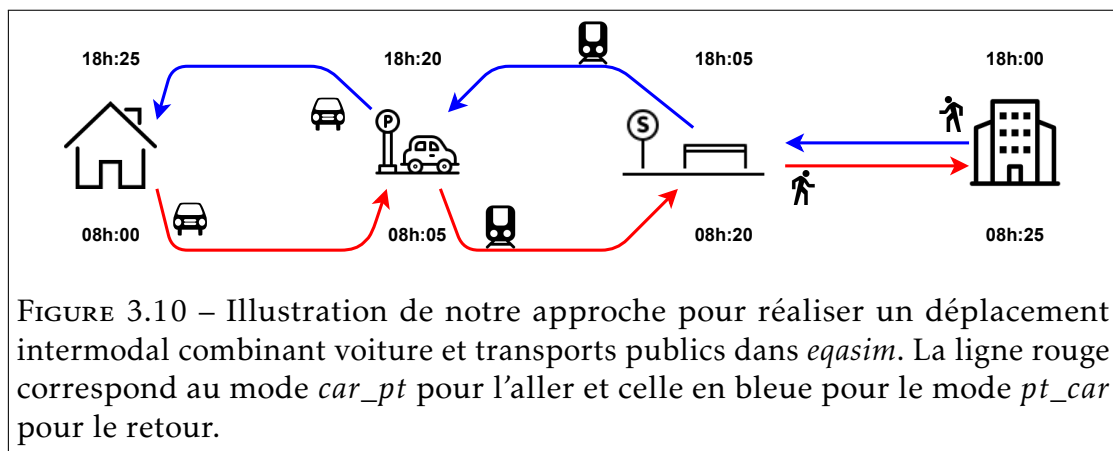
3.3 Intégration du comportement intermodal

Nous avons identifié précédemment (voir sous-section 2.3.4) les développements nécessaires à effectuer dans la version utilisée de *MATSim* (*eqasim*) pour permettre la simulation des comportements d'intermodalité. *eqasim* intègre déjà

la possibilité de simuler les déplacements monomodaux avec les modes standards (transports publics, voiture, vélo et la marche à pied). Notre contribution se situe donc dans l'intégration de l'option d'intermodalité. Nos principaux développements réalisés sont la création des modes de transport intermodal pour la combinaison voiture personnelle et transports publics (VP+TP), la définition des conditions d'utilisation et les critères de routage (affectation) de cette nouvelle alternative⁹.

3.3.1 Création d'une alternative intermodale (VP+TP)

La combinaison voiture personnelle et transports publics (VP+TP) doit se faire au travers des infrastructures dédiées notamment les parkings relais (P+R). Pour rendre possible cette combinaison, nous avons créé deux nouveaux modes de transport complémentaires désignés par *car_pt* et *pt_car* respectivement pour les allers et les retours. La Figure 3.10 présente une illustration de notre approche pour permettre les déplacements intermodaux combinant la voiture et les transports publics dans *eqasim*.



L'alternative *car_pt* (idem pour *pt_car*) est composée de deux modes de transport la voiture (*car*) et les transports publics (*pt*) pour correspondre aux deux trajets du déplacement. Nous nous sommes focalisés pour l'instant sur les déplacements intermodaux composés de deux trajets et dont l'origine est

9. L'ensemble de nos développements est disponible ici <https://github.com/diallitoz/eqasim-java-intermodality/tree/develop>

le domicile. La destination peut être toute autre activité comme le travail dans le cas de l'exemple présenté à la Figure 3.10. En outre, nous avons adopté une approche *tour-based* (contrairement au *trip-based*) pour pouvoir tenir compte des contraintes de combinaison modale (cf. sous-section 3.3.2). L'alternative *car_pt* (schématisée en rouge) est utilisée pour le départ du domicile avec la voiture comme mode de transport jusqu'au parking relais (premier trajet). Le deuxième trajet est réalisé en transports publics (p. ex., bus, métro, tramway, train) du parking relais à la destination du déplacement plus précisément à la station la plus proche (l'individu termine le déplacement à pied). On effectue le processus inverse pour le retour en utilisant l'alternative *pt_car*. Cette fois-ci le premier trajet est réalisé en transports publics depuis la destination précédente au même parking relais utilisé à l'aller. Enfin l'individu rejoint son domicile en utilisant sa voiture qui était restée au parking relais.

Les deux modes de transport *car_pt* et *pt_car* utilisés pour représenter l'alternative intermodale voiture personnelle et transports publics (VP+TP), ont les mêmes caractéristiques et les mêmes fonctions d'utilité (cf. équation 3.10). Seules les méthodes de routage sont différentes.

3.3.2 Contraintes d'utilisation de l'alternative intermodale VP+TP

Afin d'assurer une consistance dans la génération de cas d'utilisation possibles de l'alternative VP+TP nous avons défini quatre contraintes présentées comme suit :

- Seuls les agents disposant d'une voiture et d'un titre de TP peuvent utiliser l'alternative VP+TP.
- Il faut utiliser le même parking relais (P+R) à aller comme au retour.
- Le domicile doit être respectivement l'origine et la destination du déplacement en *car_pt* et en *pt_car*. Dans ce cas, la voiture doit être prise et déposée au domicile de l'agent.
- Grâce à l'utilisation de l'approche *tour-based*, il est possible de définir la liste des modes de transport utilisés pour l'ensemble des déplacements. Dans le cas de l'alternative VP+TP, cette liste doit contenir les deux modes *car_pt* et en *pt_car*. Sinon, elle n'est pas valide.

Une fois les conditions d'utilisation de l'alternative VP+TP définies, il faut effectuer le routage des déplacements utilisant les modes *car_pt* et *pt_car*. Comme on peut le voir (Figure 3.10), ce routage dépend du parking relais utilisé. Nous avons ainsi développé un module de recherche de parking relais qui est présenté dans la section suivante.

3.3.3 Module de recherche du parkings relais (P+R)

Le choix du parking relais est défini comme la décision de sélectionner celui parmi un ensemble de P+R situés à proximité du domicile de l'agent. Le processus de recherche d'une place de stationnement ainsi que la capacité du P+R ne sont pas pour l'instant pris en compte afin de garder le modèle simple. Par conséquent, le choix du P+R est construit de manière statique et déterministe plutôt que des décisions dynamiques et aléatoires pour chaque agent. En outre, le choix de l'utilisation du P+R le plus de proche du domicile de l'individu est aussi pertinent dans la mesure où les politiques de mobilité actuelles visent à promouvoir les transports publics au détriment de la voiture personnelle. Ce choix de modélisation se justifie également par le manque de données relatives à l'usage des P+R pour identifier des préférences individuelles lorsqu'on prend en compte les éléments comme le temps de recherche, le coût du parking et le temps de marche [69].

Un exemple de choix de P+R et de calcul d'itinéraire, illustré par la ligne noire en pointillé, est présenté à la Figure 3.11. Dans cet exemple, il y a douze installations de P+R dans la zone d'étude représentée par les symboles de parkings. Ce déplacement commence par le domicile et a pour motif de destination le travail en passant par un P+R. Dans cet exemple, on peut voir que l'individu dispose de trois P+R à côté de son domicile. Il choisit celui le plus proche de son domicile. Une fois le choix du P+R effectué, le module de routage calcule l'itinéraire en voiture du domicile au P+R sélectionné. Ensuite, il effectue le routage en TP du P+R vers le point d'arrêt le plus proche de la destination. L'agent termine le reste du déplacement à pied pour arriver au point de destination (le lieu de travail dans ce cas).

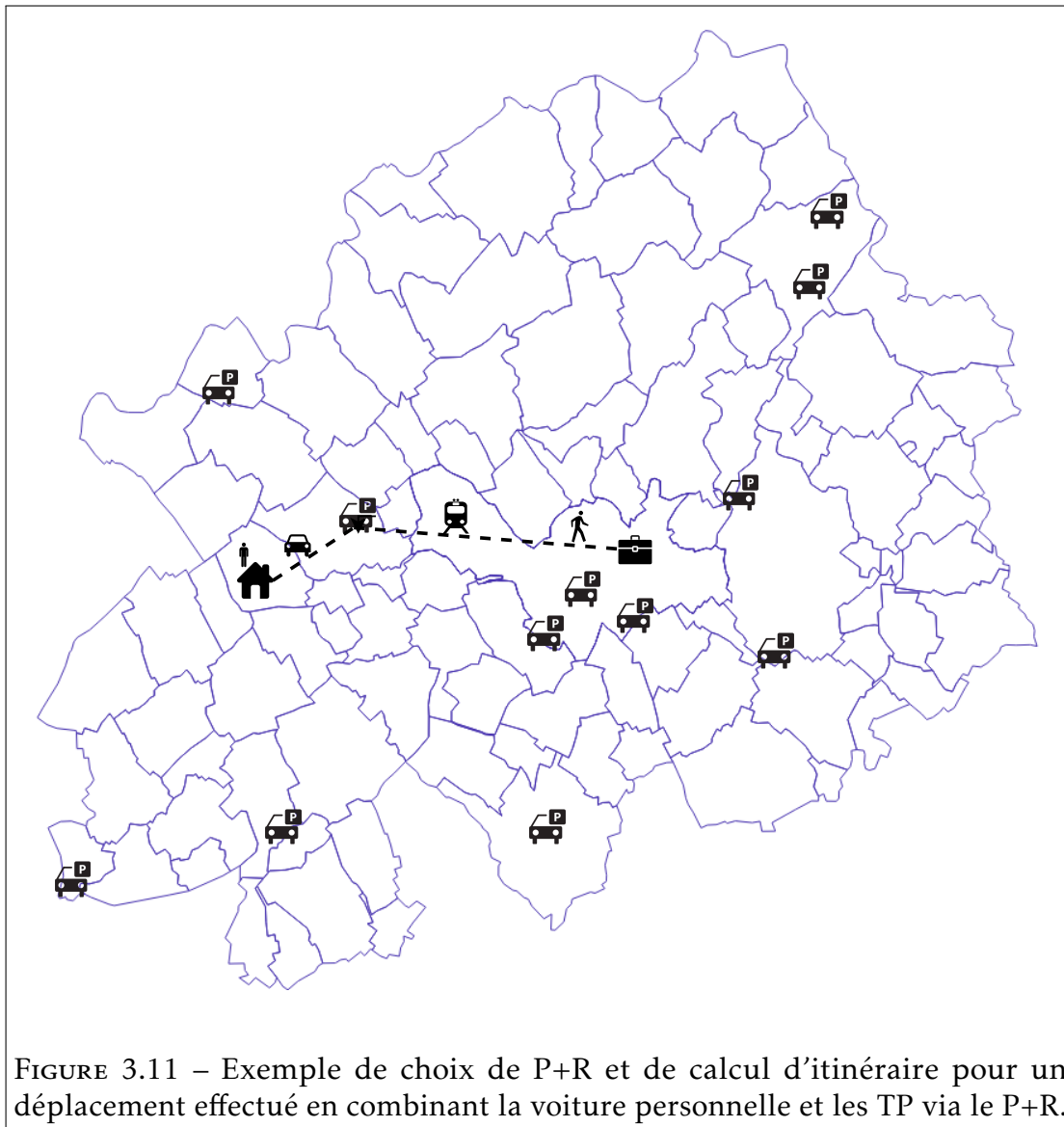


FIGURE 3.11 – Exemple de choix de P+R et de calcul d’itinéraire pour un déplacement effectué en combinant la voiture personnelle et les TP via le P+R.

3.3.4 Routage l’alternative intermodale VP+TP

L’algorithme de routage des déplacements en *VP+TP* que nous avons développé, se présente comme suit :

1. Trouver le P+R le plus proche du domicile de l’agent (voir section précédente 3.3.3 sur le mécanisme de choix).
2. Effectuer le routage en voiture entre le domicile et le P+R en utilisant le

module de routage par défaut de *MATSim*.

3. Effectuer le routage entre le P+R et la destination en faisant appel au module de routage des transports publics. Pour ce faire, on peut utiliser le module de routage par défaut ou le *SwissRailRaptor*. Il est également possible de « téléporter » les agents à ce niveau pour réduire les temps de calcul. Nous avons choisi le calcul d'itinéraires avec le module de routage par défaut de *MATSim*.
4. Pour le retour, on procède de la même manière, mais cette fois en commençant par le trajet en transports publics.

Cette approche garantit de passer toujours par le même P+R pour effectuer le déplacement en voiture et en TP. En outre, un déplacement VP+TP est uniquement sur domicile vers autres d'activités comme le travail, l'éducation ou les courses. Ainsi, lors de la simulation le module de routage de VP+TP reçoit les informations suivantes : l'agent effectuant le déplacement, l'O/D du déplacement et la localisation du parking relais (fournie par le module de recherche de P+R) nécessaires au calcul de l'itinéraire.

Notre approche méthodologique ainsi que les choix effectués sont discutés dans la section suivante.

3.4 Discussion

Dans cette section nous proposons une discussion sur nos différents choix et approches méthodologiques. Nous présentons également quelques limites des méthodes utilisées.

3.4.1 Modèles de choix discrets *vs* méthodes d'apprentissage supervisé

La prédiction du choix du mode de transport pourrait être envisagé au moyen de l'apprentissage supervisé. L'objectif étant de trouver un modèle qui liera correctement les variables explicatives (p. ex., CSP, âge, temps de parcours et coût) au choix modal. Il s'agit donc dans notre cas plus d'un problème de prédiction

que d'une simple classification. En effet, nous cherchons à prédire correctement le choix d'un mode de transport à travers une estimation de probabilité. Le principe est donc le même que pour les modèles de choix discrets. Nous discutons dans la suite de l'adéquation de l'apprentissage supervisé à notre problématique et justifions notre choix d'utiliser les modèles de choix discret.

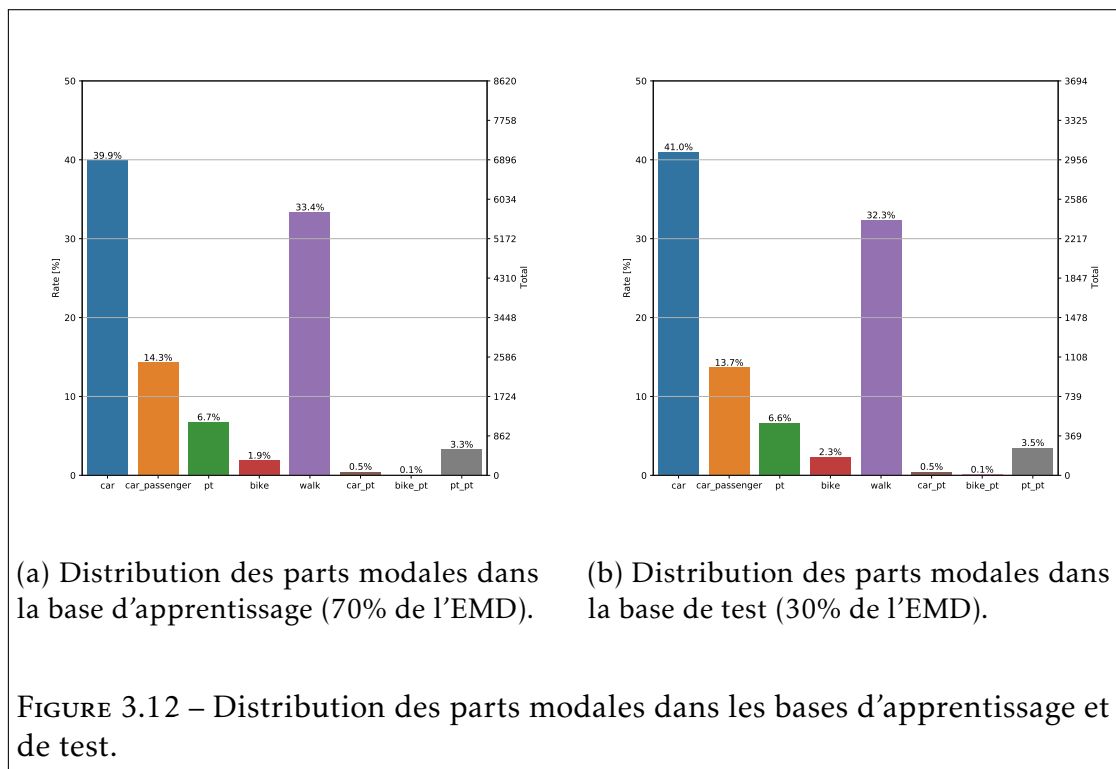
Parmi les méthodes d'apprentissage supervisé qui permettent de faire ce type de prédiction, il y a les arbres de décision *decision tree (DT)* et la régression logistique multinomiale (*multinomial logistic regression, MNLR*). Nous avons donc mené une étude pour évaluer la capacité de ces deux algorithmes à prédire un choix modal et ainsi générer des populations d'agents crédibles du point de vue d'une demande de transport. Nous avons ainsi utilisé la librairie *Scikit-Learn* [122] pour avoir accès aux modèles d'apprentissage sélectionnés. Par la suite les modèles ont été appliqués sur les données de l'enquête ménage déplacement (EMD) avec une répartition 70%/30% entre base d'apprentissage et base test respectivement. Les variables explicatives utilisées sont : l'âge, le genre, le statut (employé ou élève/étudiant), la possession d'un titre de transport public (ticket ou abonnement), la possession du permis de conduire, la disponibilité de la voiture, la disponibilité du vélo, le coût, la distance euclidienne et la durée du déplacement. Ces variables ont été sélectionnées suite à une étude de corrélation avec le choix modal. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 3.5.

La précision générale (*accuracy*) est une des métriques des modèles d'apprentissage supervisé. Elle désigne la proportion de prédictions correctes faites par le modèle. Formellement, l'*accuracy* se définit comme suit :

$$Accuracy = \frac{\text{Numbers of correct predictions}}{\text{Total number of predictions}} \quad (3.11)$$

Nous constatons ainsi que la prédiction globale des arbres de décisions (DT) est nettement meilleure que celle de la régression logistique multinomiale (MNLR) avec respectivement 85% et 68%. Nous pourrions donc conclure que les modèles notamment les arbres de décision affichent des résultats satisfaisants du point de vue de la prédiction du choix modal de transport. En regardant de près les résultats, sur les 7 389 observations de l'ensemble de tests, il y a respectivement 2 357 de prédictions erronées pour la régression logistique

multinomiale et 1 133 pour les arbres de décision. Sur les 7 389 observations, il y a plus de 3 000 et 2 390 concernant les voitures (*car*) et la marche à pied (*walking*) respectivement, soit plus de 70% de la base (cf. Figure 3.12b). Alors que la précision globale de 85% peut sembler bonne à première vue, la prédiction des modes de transport minoritaires (*bike*, *car+pt*, *bike+pt* et *pt+pt*) peut être biaisée. L'*Accuracy* seule ne reflète donc pas la réalité de la situation lorsqu'il y a un « déséquilibre » entre les catégories de classe de l'ensemble de données. Nous nous sommes donc intéressés à la précision (*precision*) et le rappel *recall* de prédiction pour chaque catégorie de classe pour mieux évaluer nos modèles.



La *precision* permet de savoir si la proportion d'identifications positives était réellement correcte. La précision peut être définie comme suit :

$$Precision = \frac{True\ Positives\ (TP)}{True\ Positives\ (TP) + False\ Positives\ (FP)} \quad (3.12)$$

Le *recall* permet de déterminer que la proportion de positifs réels a été

TABLEAU 3.5 – Résultats des méthodes d'apprentissage utilisées pour prédire le choix modal de transport.

| Mode de transport | Représentation dans la base (%) | Métriques (%) | DT | MNLR |
|-------------------|---------------------------------|---------------|-----------|------|
| | | Accuracy | 85 | 68 |
| car | 40,2 | Precision | 85 | 66 |
| | | Recall | 97 | 88 |
| | | F1-score | 90 | 75 |
| car_passenger | 14,1 | Precision | 79 | 39 |
| | | Recall | 63 | 4 |
| | | F1-score | 70 | 7 |
| pt | 6,6 | Precision | 56 | 30 |
| | | Recall | 41 | 18 |
| | | F1-score | 47 | 23 |
| bike | 2,0 | Precision | 73 | 0.0 |
| | | Recall | 9 | 0.0 |
| | | F1-score | 16 | 0,0 |
| walking | 33,1 | Precision | 94 | 77 |
| | | Recall | 94 | 95 |
| | | F1-score | 95 | 85 |
| car_pt | 0,5 | Precision | 52 | 0.0 |
| | | Recall | 35 | 0,0 |
| | | F1-score | 42 | 0,0 |
| bike_pt | 0,1 | Precision | 0,0 | 0,0 |
| | | Recall | 0,00 | 0,00 |
| | | F1-score | 0,00 | 0,00 |
| pt_pt | 3,3 | Precision | 52 | 0,00 |
| | | Recall | 53 | 0,00 |
| | | F1-score | 52 | 0,00 |

identifiée correctement. Formellement, le *recall* est défini comme suit :

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives (TP)}}{\text{True Positives (TP)} + \text{False Negatives (FN)}} \quad (3.13)$$

Comme on pouvait s’y attendre, la *precision* et le *recall* des modes majoritaires sont très bons (entre 85% et 97% pour la voiture; 94% pour la marche à pied et pour le modèle d’arbre de décision). Par contre, pour les modes de transport avec moins de 10% de représentativité, les modèles sont moins efficaces. On ne note par exemple aucune bonne prédiction pour la régression logistique multinomiale (*MNLR*) pour ces modes. L’arbre de décision parvient moyennement à prédire correctement les proportions positives. Mais, il présente moins de succès pour l’identification de la proportion de positifs réels (p. ex., 41% et 9% pour les transports publics et le vélo). Ce manque de performance pour les modes de transport peu représentatifs s’explique principalement par la nature du jeu de données avec un très fort déséquilibre de classe. Les modèles apprennent bien les classes majoritaires au détriment de celles minoritaires.

Ce problème de « déséquilibre » des données (*imbalanced dataset*) est bien connu dans le domaine de l’apprentissage automatique [11]. Une technique largement adoptée pour traiter ce problème est appelée *resampling*. Elle consiste soit à retirer des échantillons de la classe majoritaire (sous-échantillonnage) soit à ajouter d’autres exemples de la classe minoritaire (sur-échantillonnage) [11]. La deuxième méthode a été identifiée comme permettant des résultats plus précis. Il est également possible de combiner les deux approches. Dans notre étude, nous avons utilisé la méthode de sur-échantillonnage *SMOTE* (*Synthetic Minority Over-sampling Technique*) [37]. Cette méthode consiste à créer de nouvelles observations de classe minoritaire en interpolant entre plusieurs autres de ladite classe qui se trouvent ensemble. Cette approche évite de dupliquer simplement (aléatoirement) les observations minoritaires. Pour ce faire, nous avons utilisé l’API de *resampling imbalanced-learn* [92]. Cette API est compatible avec *Skil-learn*. Les résultats de prédiction des modèles suite au *resampling* sont présentés au Tableau 3.6.

De manière générale, on note une baisse de la précision globale (*Accuracy*)

TABLEAU 3.6 – Résultats des méthodes d'apprentissage utilisées pour prédire le choix modal de transport après le *resampling* des données.

| Mode de transport | Représentation dans la base après le <i>resampling</i> (%) | Métriques (%) | DT | MNLR |
|-------------------|--|---------------|-----------|------|
| | | Accuracy | 68 | 35 |
| car | 12,5 | Precision | 61 | 39 |
| | | Recall | 77 | 67 |
| | | F1-score | 68 | 49 |
| car_passenger | 12,5 | Precision | 78 | 0,0 |
| | | Recall | 53 | 0,0 |
| | | F1-score | 63 | 0,0 |
| pt | 12,5 | Precision | 67 | 22 |
| | | Recall | 48 | 30 |
| | | F1-score | 56 | 25 |
| bike | 12,5 | Precision | 64 | 32 |
| | | Recall | 68 | 15 |
| | | F1-score | 66 | 20 |
| walking | 12,5 | Precision | 93 | 58 |
| | | Recall | 89 | 76 |
| | | F1-score | 91 | 65 |
| car_pt | 12,5 | Precision | 68 | 36 |
| | | Recall | 69 | 52 |
| | | F1-score | 69 | 43 |
| bike_pt | 12,5 | Precision | 58 | 20 |
| | | Recall | 94 | 15 |
| | | F1-score | 72 | 17 |
| pt_pt | 12,5 | Precision | 62 | 29 |
| | | Recall | 42 | 26 |
| | | F1-score | 50 | 27 |

des deux modèles. Cette baisse est d'autant plus importante pour le modèle de régression logistique multinomiale (*MNLR*) avec seulement 35% contre 68% pour l'arbre de décision (*DT*). Cette baisse de performance du *MNLR* est visible également sur la précision et le rappel des modes de transport avec notamment aucune bonne prédiction pour le mode *car_passenger*. L'arbre de décision présente de meilleurs résultats de prédiction pour les catégories de classes. Ce modèle présente plus de 60% de prédictions correctes des proportions positives (*precision*) et d'identification des éléments de positifs réels (*recall*) pour la majorité des modes de transport (voiture, vélo, marche à pied, voiture+TP, vélo+TP). Le *resampling* a donc eu un effet positif sur les arbres de décision contrairement aux modèles de régression logistique.

Comme on peut le voir, le problème de « déséquilibre » des données affecte beaucoup la performance des modèles d'apprentissage en présence de classes minoritaires. On peut y remédier en utilisant les techniques de *resampling* en créant par exemple des observations supplémentaires pour les classes peu représentatives. Cependant, cette approche n'est toujours pas pertinente. Dans notre cas d'étude par exemple, créer autant d'observations pour le vélo que la voiture n'est pas réaliste au regard du nombre réel d'utilisateurs de ces deux modes. Les modèles de choix discrets sont moins sensibles à ce déséquilibre de données. En effet, dans ces modèles, toutes les alternatives (classes) sont reconstituées avec ses propres caractéristiques (p. ex., coût, temps et distance de parcours) afin de reproduire une situation concurrentielle équitable de choix pour l'individu [144].

Outre le problème de déséquilibre des données, les modèles d'apprentissage supervisé sont des modèles *black box* où il n'est pas possible d'influencer directement l'algorithme utilisé. Il existe bien évidemment des paramètres pour personnaliser les modèles mais cette personnalisation reste limitée. Elle consiste généralement à choisir différentes options dans le classifieur comme le *splitter* : "*random*", "*best*" qui détermine la manière dont l'arbre de décision recherche les entités pour faire une subdivision¹⁰ ou encore sa profondeur maximale

10. "*best*" signifie que pour chaque nœud, l'algorithme considère toutes les caractéristiques et choisit la meilleure répartition. Si "*random*", alors un sous-ensemble aléatoire de fonctionnalités sera pris en compte.

"*max_deph*" : *integer*¹¹. De part cette approche, il n'est pas possible de récupérer les coefficients issus du modèle reliant les variables explicatives à la variable indépendante. Dans les modèles de choix discrets, c'est au modélisateur de définir les fonctions d'utilité mettant en relation ces deux entités. De ce fait, il est possible de récupérer les paramètres (coefficients) liés à chaque variable explicative. La donnée de ces coefficients est très importante pour la réutilisation des modèles en les intégrant par exemple dans les outils de simulation comme dans notre cas d'étude. De récents travaux en apprentissage automatique approfondi (*deep learning*) permettraient de récupérer les coefficients reliant les variables explicatives aux classes dépendantes [150]. Cette avancée significative peut ouvrir donc de nouvelles perspectives quant à la réutilisation des modèles d'apprentissage supervisé.

3.4.2 De la reconstruction des origines/destinations des déplacements

La précision de l'algorithme de reconstruction des coordonnées origines/destinations (O/D) repose à la fois sur la taille de la zone et sur le nombre de points à générer aléatoirement. Plus la taille de la zone est petite, meilleure est la qualité des points reconstruits. De plus, plus le nombre de points aléatoires est élevé, plus nous avons de chances de trouver des points O/D dont la distance est plus proche de la distance de référence. Cependant, l'analyse considérée produit un temps de calcul très élevé comme nous avons pu le voir précédemment (cf. Figure 3.3). Une solution à ce problème serait d'utiliser des bases de données géographiques comme la BD TOPO¹², la base permanente des équipements (BPE)¹³ et les données OSM pour générer un ensemble fixe d'emplacements O/D correspondant aux zones d'activités éventuelles (p. ex., domicile, lieu de travail, école, commerce). Cette étape de pré-traitement supplémentaire permettra d'éviter de générer un trop grand nombre de points aléatoires irréalistes (p. ex. couples

11. Le "*max_deph*" est l'un des moyens pour régulariser l'arbre ou limiter sa croissance pour éviter le sur-apprentissage.

12. https://geoservices.ign.fr/blog/2020/10/26/Grand_angle_diffusion_BDTOPO.html

13. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3568638>

de points trop proches pour des distances euclidiennes plus importantes). Par conséquent le temps de mise en correspondance sera réduit. Cette approche permettrait également d'améliorer la qualité des coordonnées reconstruites en tenant compte de la réalité du terrain.

3.4.3 La fonction d'utilité de l'alternative intermodale VP+TP

Concernant le modèle de choix discret, la fonction d'utilité de l'alternative VP+TP est essentiellement basée sur celles de la voiture personnelle (VP) et des transports publics (TP). Cependant, les déplacements combinant ces deux modes de transport sont fortement dépendants des installations de pôles d'échanges comme les parkings relais. Par conséquent, il peut être intéressant de prendre en compte les attributs relatifs aux parkings relais tels que le prix (abonnement), la capacité, l'accessibilité et le temps de transfert. Ainsi, la fonction d'utilité de l'alternative VP+TP pourrait être définie en trois composantes [33] :

- l'utilité de mode en VP (entre le domicile et le PR) composée des paramètres de l'utilité de la voiture ;
- l'utilité spécifique du P+R en prenant en compte les éléments définis ci-dessus ;
- l'utilité des TP (entre le P+R à la destination) composée des paramètres des transports publics.

Malheureusement, à notre connaissance, il n'existe pas de base de données relatives à l'utilisation des parkings relais notamment les fréquences, les caractéristiques des usagers et les motifs de déplacements. Ces informations peuvent être normalement disponibles auprès des sociétés en charge de ces installations. Nous avons entrepris des démarches avec des rencontres pour avoir accès à ces données. Avec la situation sanitaire, ces démarches n'ont pas encore abouti.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail notre approche méthodologique pour construire un cadre de simulation multi-agent afin d'étudier les

comportements de déplacements intermodaux. Tout d'abord, le chapitre décrit notre technique pour reconstruire les informations nécessaires à la construction de nos différents modèles. Il s'agit notamment des origines/destinations des déplacements, des communes d'activités et les combinaisons intermodales qui ne sont pas directement accessibles dans les enquêtes de mobilité (enquêtes ménages déplacements (EMD)).

Après l'étape de reconstruction des données complémentaires, nous avons proposé quatre modèles de choix discret pour modéliser le choix du mode de transport. Il s'agit des modèles de type multinomial logit (MNL) simple, le *SI-MNL* (modèle 1) avec des variantes emboîtées (nested logit (NL)), le *SI-NL* (modèle 2) et le *I-2NL* (modèle 3); et imbriquée (*cross nested logit (CNL)*), le *I-CNL* (modèle 4) pour tenir compte de l'alternative intermodale VP+TP.

Par la suite, nous avons présenté comment intégrer l'alternative intermodale combinant la voiture personnelle et les transports publics dans *MATSim*. Cette étape à consister premièrement à définir les modes de transports nécessaires à la prise compte de cette nouvelle alternative. Nous avons également défini ses contraintes d'utilisation. Ensuite, nous avons créé un module de routage intermodal pour les calculs d'itinéraires des déplacements effectués avec cette alternative intermodale.

Une discussion sur les méthodes et approches utilisées a été faite à la fin du chapitre. Il s'agit notamment du choix des modèles de choix discret pour exprimer le choix du mode de transport des individus. Nous avons montré pourquoi cette méthode était particulièrement adaptée à notre contexte d'étude comparative aux modèles d'apprentissage supervisé couramment utilisés pour la prédiction. Nous avons également discuté de la reconstitution des informations manquantes dans les données d'enquêtes de déplacements.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les résultats des différentes expérimentations effectuées à travers le cadre de simulation développé.

Résultats d'expérimentations : cas de la MEL

Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les principaux résultats des différentes expérimentations des simulations réalisées. La section 4.1 présente dans un premier temps la zone d'étude à savoir la Métropole Européenne de Lille (MEL). Elle renseigne notamment sur les caractéristiques socio-démographiques et les comportements de mobilité de la métropole. La section suivante 4.2 présente les résultats de l'estimation des modèles de choix discrets à savoir le *SI-MNL* et le *SI-NL*. Nous faisons également une comparaison de ces deux modèles.

La section 4.3 renseigne sur les étapes de la mise en place de la simulation avec notamment la phase de génération de la demande et de l'offre de transport multi-agents et de paramétrage. Cette section présente également les résultats de la phase de calibration de la simulation afin de correspondre à la situation de référence.

Le chapitre fournit par la suite dans la section 4.4 les résultats relatifs à l'évaluation des parkings relais (P+R) dans la combinaison de la voiture personnelle et les transports publics (TP) ainsi que les profils d'utilisateurs utilisant cette pratique. La section 4.5 quant à elle, présente les résultats de l'évaluation de l'impact d'un péage urbain dans la réduction de l'usage de la voiture personnelle

au profit de leur combinaison avec les TP.

4.1 Présentation de la MEL

Dans cette section, nous présentons la zone d'étude à savoir la Métropole Européenne de Lille (MEL) en mettant l'accent sur ses caractéristiques socio-démographiques et la situation de la mobilité de sa population.

4.1.1 Caractéristiques socio-démographiques de la MEL

La Métropole Européenne de Lille (MEL) est une communauté d'agglomérations française de type métropolitain, composée autour des villes de Lille, Roubaix et Tourcoing située au centre du département du Nord en région Hauts-de-France. Aujourd'hui, la MEL est composée de 95 communes pour un total de 1,2 million d'habitants sur une superficie de 672 km^2 . La Figure 4.1 donne un aperçu de la répartition spatiale des populations¹ et de la possession d'une voiture (au moins une voiture) par ménage² dans les communes de la MEL. On constate une forte concentration de la population au niveau des principales villes de la métropole notamment à Lille, Roubaix et Tourcoing, alors que la densité de population reste faible dans les zones périphériques (p. ex., Illies, Fretin, Deùlémont et Baisieux). Le phénomène inverse est observé en ce qui concerne le nombre de voitures par ménage. Les zones périphériques enregistrent une plus grande concentration de voitures par habitant contrairement aux grandes villes, où moins de 75% des ménages ont une voiture. Ce phénomène est national et s'observe dans presque toutes les grandes villes de France.

La Figure 4.2 présente quelques-unes des principales caractéristiques socio-démographiques de la population de la MEL en 2017 selon l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques (INSEE). Les principales observations que l'on peut relever sont les suivantes :

- près de 59% de la population active de la MEL occupe un emploi ;

1. Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3698339#consulter>

2. Source : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/taux-de-motorisation-des-menages/>

3. <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=EPCI-245900410#chiffre-cle-1>

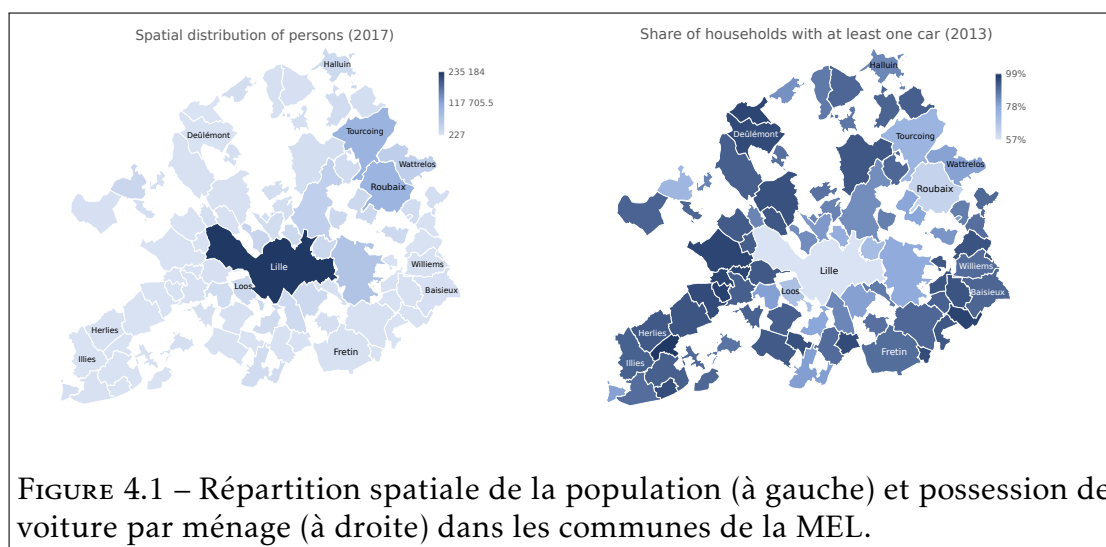


FIGURE 4.1 – Répartition spatiale de la population (à gauche) et possession de voiture par ménage (à droite) dans les communes de la MEL.

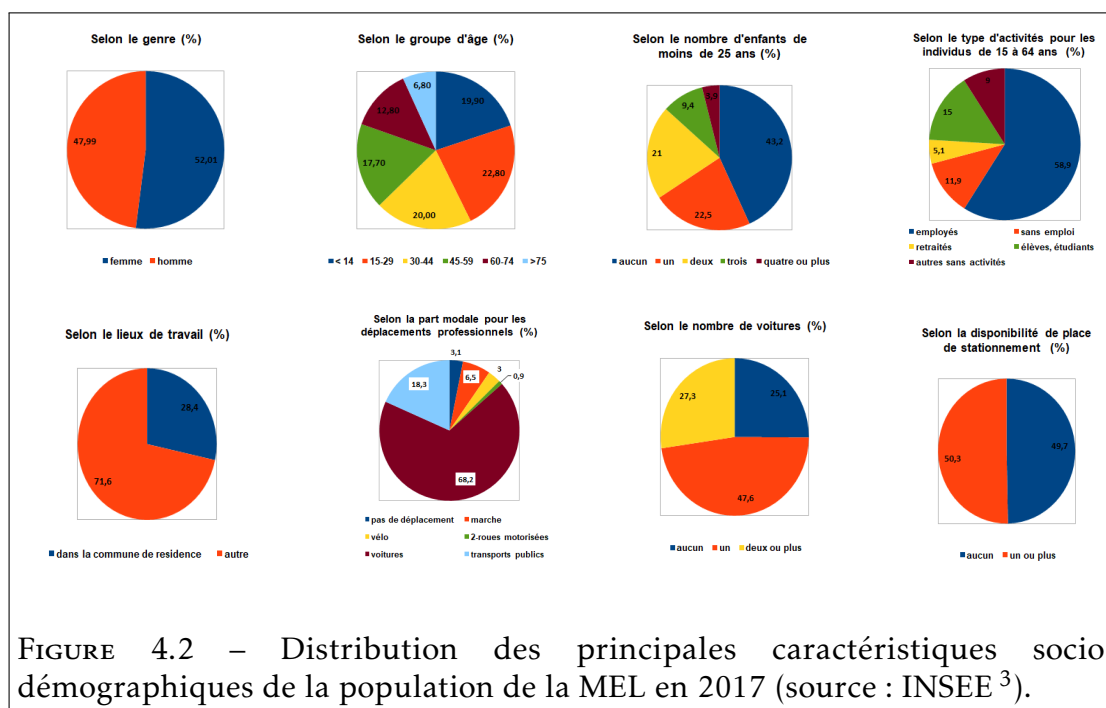


FIGURE 4.2 – Distribution des principales caractéristiques socio-démographiques de la population de la MEL en 2017 (source : INSEE ³).

- plus de 70% des actifs travaillent à l'extérieur de leur commune de résidence ce qui induit des déplacements de longue distance pour se rendre au travail ;
- les déplacements professionnels sont effectués majoritairement en voiture (68%) avec seulement 18,3% pour les transports publics et 6,5% pour la

marche ;

- près de la moitié des individus n'ont pas de place de parking pour leur véhicule, occasionnant donc des problèmes de stationnement.

4.1.2 La mobilité dans la MEL

Selon la dernière enquête ménage-déplacement (EMD) de la MEL, réalisée en 2016⁴, plus de la moitié des déplacements (tous motifs confondus) sont réalisés en utilisant la voiture individuelle (57,9%), la marche vient en seconde position avec près de 30%, suivie des transports publics (TP) avec 6,7% et du vélo qui a moins de 2% de part modale (cf. Figure 4.3). Seulement 4% des déplacements sont intermodaux (combinaison de plus deux modes de transport mécanisés). 82,5% des déplacements intermodaux ne comportent que des correspondances entre services de transports publics. Les formes d'intermodalité recherchées par les pouvoirs publics (TP+VP par l'utilisation des parkings relais) concernent moins de 16% de ces déplacements.

Ces chiffres paraissent très faibles comparés par exemple aux données de l'étude menée à Berlin sur la pratique intermodale [113]. En effet, 83,5% des personnes enquêtées ont révélé faire de la combinaison de différents modes de transport régulièrement ou occasionnellement. Les plus importantes combinaisons de modes révélées par cette enquête sont TP+TP, TP+Vélo et TP+VP avec respectivement 70,7%, 33,1% et 15,0% (dont 29,5%, 9,9% et 2,7,0% pour les déplacements journaliers). Cette différence s'explique par la nature de l'étude qui était plus orientée sur les comportements de déplacement intermodal contrairement à l'EMD qui est plus générique. La forte représentation TP+Vélo s'explique par le fait que 18,1% des actifs de la ville Berlin utilisent le vélo comme mode de transport pour les déplacements professionnels et éducatifs [114].

Sur le plan de l'offre de transport, la MEL a été la première métropole en France à expérimenter le métro avec la technologie du véhicule automatique léger (VAL) au début des années 1970 [10]. Le lancement officiel de la première

4. Une version des données de cette enquête est disponible en libre accès sur le site open data de la MEL (<https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/enquete-deplacement-2016/information/?location=10,50.65641,3.03338&basemap=jawg.streets>).

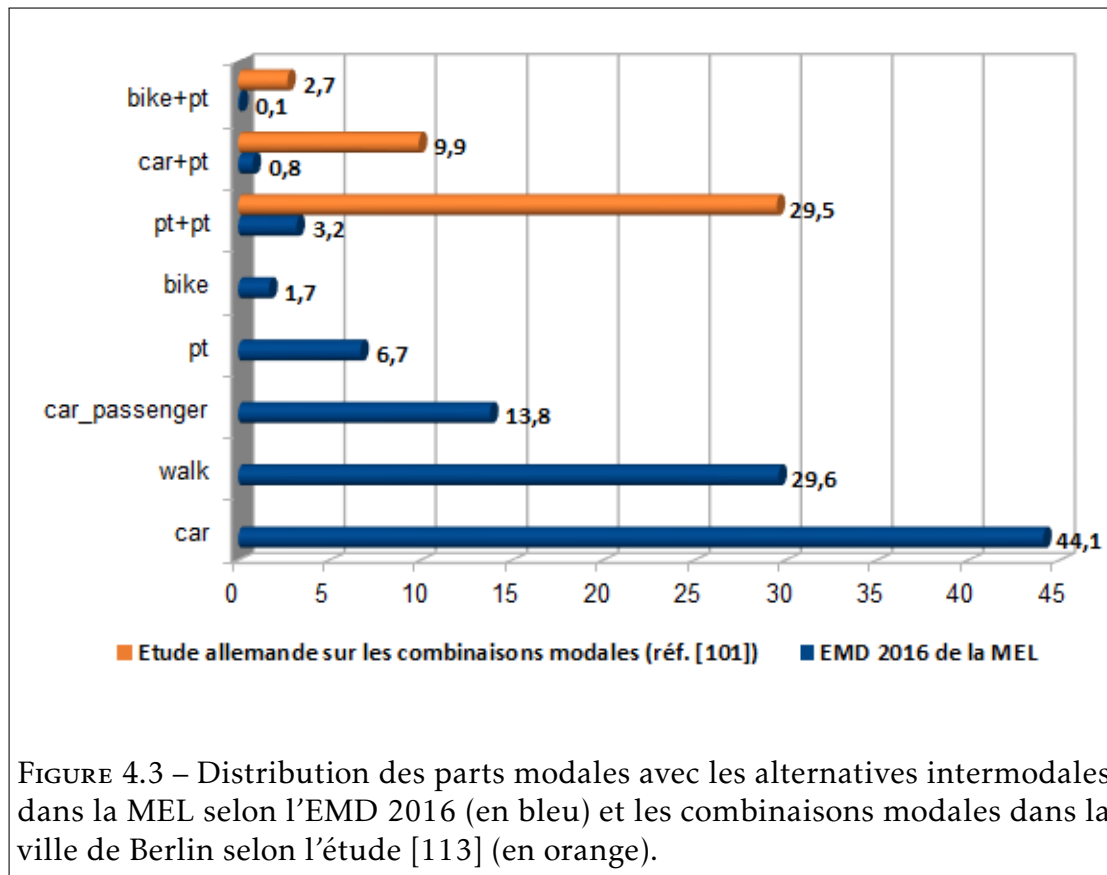


FIGURE 4.3 – Distribution des parts modales avec les alternatives intermodales dans la MEL selon l’EMD 2016 (en bleu) et les combinaisons modales dans la ville de Berlin selon l’étude [113] (en orange).

ligne a été réalisé finalement en 1983. Aujourd’hui, le réseau de transports en commun comprend deux lignes de métro (43,6 km), deux lignes de tramway (22 km) et environ 90 lignes de bus. Les investissements dans les transports publics incluent notamment le renouvellement du matériel roulant et les infrastructures, la création de nouvelles lignes de bus, la mise en place de contrôle d’accès dans le métro et le développement du système d’information voyageurs⁵.

A partir de 2011, un service de vélos en libre-service (VLS), le *V’Lille*, a été mis en place, principalement à Lille et dans quelques communes voisines, à Roubaix et Tourcoing. En 2018, le système comprenait 2 200 VLS et 232 stations⁶. Depuis le début des années 2000, la métropole poursuit l’objectif de développer

5. <https://www.lillemetropole.fr/votre-metropole/grands-projets/grands-projets-mobilite/les-assises-des-mobilites-et-de>

6. <https://www.lepoint.fr/societe/a-lille-les-velos-en-libre-service-ont-trouve-leur-vitesse-de-23.php>

les déplacements à vélo. Mais, la part modale des vélos est encore faible. La MEL avait prévu donc d'augmenter les pistes cyclables de 100 km entre 2017 et 2020.

Pour encourager la combinaison des voitures personnelles et les TP, la MEL s'est engagée en 2016 à créer et développer des pôles d'échanges et de parkings relais sur le territoire afin de faciliter les échanges entre les modes de transports : train, bus, métro, vélo, voiture, marche⁷. Aujourd'hui, la MEL dispose de douze parkings relais (P+R) correspondants à 5 005 places de stationnement pour des correspondances avec le bus, le métro et le train et pour le covoiturage⁸. De plus, il y a 33 abris vélos indépendamment du stationnement pour les vélos en libre-service. La Figure 4.4 donne un aperçu des emplacements des parkings relais, des abris vélos, des principales gares, des stations métro et le nombre d'arrêts de bus dans la MEL⁹. On peut voir une forte connectivité des services de transports publics (métros, bus, trains) autour des grandes villes comme Lille, Roubaix et Tourcoing. Par contre, dans les zones périphériques (p. ex., Fretin, Warneton et Herlies), l'offre de TP est très faible avec souvent aucune station de métro et moins de 20 arrêts de bus. Cette situation est une des explications à la forte utilisation de la voiture personnelle dans ces zones.

Sur le plan de l'impact environnemental des systèmes de transport, la pollution de l'air est principalement liée au transport routier. La prise en compte des enjeux climatiques et énergétiques reste également une préoccupation des autorités de la MEL. Les principales sources d'émissions de gaz à effet de serre sont le transport de personnes, suivi par les bâtiments résidentiels et le transport de marchandises. Ces émissions sont associées à une forte consommation énergétique due notamment à l'utilisation massive de la voiture particulière comme moyen de transport¹⁰.

Ces différentes offres de transport et les projets d'investissement qui en découlent font de la MEL un cas d'étude intéressant pour l'analyse des politiques alternatives de transport à l'échelle métropolitaine. L'objectif de cette thèse est donc de fournir par le biais de la simulation multi-agent, ce cadre permettant

7. Voir point 3 du résumé des engagements de 10 : <https://www.lillemetropole.fr/sites/default/files/2018-10/bilan%20engagements%20mobilit%C3%A9%20NET.pdf>

8. <https://www.ilevia.fr/cms/institutionnel/se-deplacer/parkings-pr/>

9. Référence : https://opendata.lillemetropole.fr/map/reseau_mel/

10. <http://www.scot-lille-metropole.org/IMG/pdf/7-environnement.pdf>

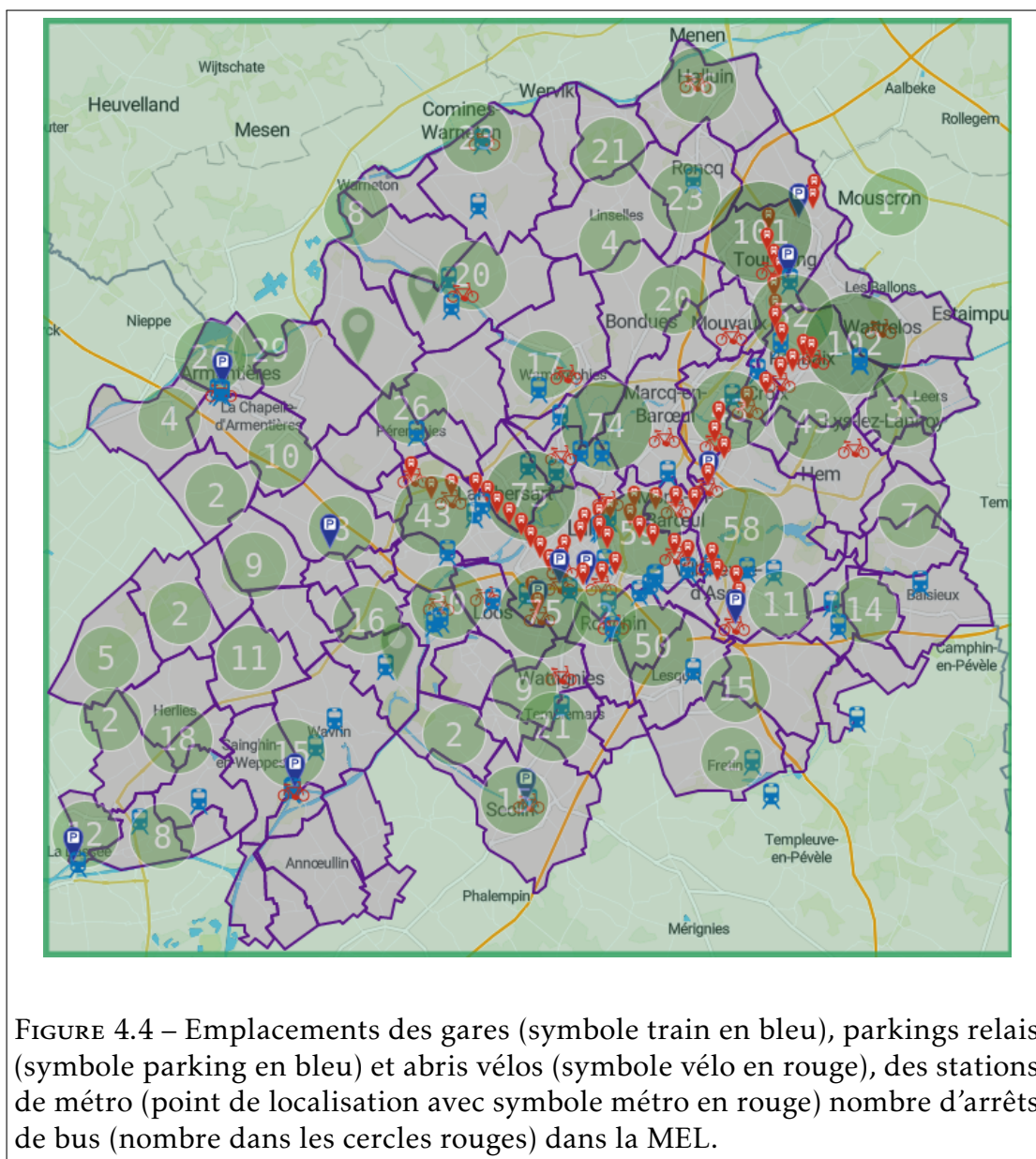


FIGURE 4.4 – Emplacements des gares (symbole train en bleu), parkings relais (symbole parking en bleu) et abris vélos (symbole vélo en rouge), des stations de métro (point de localisation avec symbole métro en rouge) nombre d'arrêts de bus (nombre dans les cercles rouges) dans la MEL.

l'évaluation de l'impact du développement des parkings relais (P+R), des abris vélos et des pôles d'échanges et autres mesures sur les nouveaux comportements de mobilité intermodale. En fait, nous défendons l'hypothèse que la simulation est l'une des solutions les plus efficaces, nécessitant peu de ressources humaines, matérielles et financières pour évaluer les politiques de mobilité.

4.2 Valeurs des paramètres des modèles de choix discret

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'estimation des modèles de choix discret que nous avons retenus dans le chapitre précédent. Puis, nous proposons une évaluation des modèles estimés.

4.2.1 Configurations de base pour l'estimation des modèles

Parmi les quatre modèles proposés (cf. section 3.2), nous avons estimé les paramètres des deux premiers : *Simple Intermodal MNL (SI-MNL)* et *Simple Intermodal nested logit (SI-NL)* pour évaluer la faisabilité de notre approche méthodologique. Rappelons que le premier modèle *SI-MNL* suppose une indépendance entre les alternatives ; tandis que le modèle *SI-NL* considère les transports publics (TP) comme un nid afin de tenir compte des corrélations entre les alternatives voiture personnelle (VP) + TP et les TP. Les modèles ont été estimés avec le logiciel statistique *PandasBiogeme* [21] en utilisant un tiers des données de l'Enquête Ménage Déplacement (EMD) 2016 de la MEL. Les valeurs par défaut de chaque paramètre ont été mises à zéro ; tandis qu'aucune valeur minimale ou maximale n'a été définie. Les codes (Python) des modèles sont présentés en Annexe C. Pour l'évaluation des modèles, nous avons utilisé les indicateurs comme le *Maximum log LikeHood* (log de vraisemblance maximisé) et le *Rho-square* (R^2). Le *Maximum log LikeHood* permet de déterminer les valeurs optimales des paramètres estimés (cf. section 2.2.3). Pour deux modèles donnés, celui avec la plus grande valeur du *Maximum log LikeHood* peut être considéré comme celui fournissant les meilleures approximations des valeurs (coefficients) des paramètres (β). Le R^2 (généralement compris entre 0 et 1) renseigne sur la qualité de prédiction du modèle de manière générale. Une valeur proche de 0 signifie que le modèle est mauvais ; tandis qu'une valeur proche de 1 traduit une très bonne qualité de prédiction. Nous avons également analysé les valeurs (coefficients) des paramètres obtenus de chaque modèle en s'intéressant notamment aux erreurs type. Cet indicateur permet aussi de mesurer le degré de précision de la valeur estimée du paramètre. Il est toujours positif et plus la valeur est petite, plus l'estimation est précise.

4.2.2 Evaluation des modèles estimés

La convergence est le premier indicateur d'évaluation des modèles de choix discret. Un modèle converge lorsque les valeurs des paramètres ne changent plus ou très légèrement avant la fin des itérations définies dans le logiciel d'estimation (*PandasBiogeme* dans notre cas). Tous les paramètres du modèle ont pu être estimés témoignant ainsi de la bonne définition des fonctions d'utilité. Les deux modèles estimés convergent ainsi « parfaitement » après 78 itérations.

Le Tableau 4.1 résume les principales statistiques des deux modèles estimés. Le *SI-NL* (modèle 2) compte un paramètre de plus à estimer que le premier (*SI-MNL*). Ce paramètre correspond au nid du modèle *nested logit* pour tenir compte des combinaisons voiture personnelle et transports publics. Le nombre total d'observations utilisées pour l'estimation est 4 771 (un tiers de l'EMD) en tenant compte de la représentativité pour chaque mode de transport. Le *Maximum log LikeHood* et le *Rho-square* des deux modèles sont identiques. La diminution de la valeur finale du *Maximum log LikeHood* par rapport à l'état initial témoigne de la qualité des valeurs obtenues des paramètres. En outre, la valeur du *Rho-square* (0,382) traduit également une qualité de prédiction acceptable des deux modèles. En effet, notre objectif est d'avoir des valeurs de paramètres significatives afin d'approcher au mieux le choix modal réel des individus en fonction de leurs caractéristiques et des attributs de l'offre de transport. Ainsi, la phase de calibration de la simulation sera plus rapide et plus efficace grâce à des valeurs des paramètres déjà bien estimés.

Le Tableau 4.2 présente les paramètres estimés des deux modèles. Pour évaluer les valeurs des paramètres, nous avons analysé leur signe (négatif ou positif) et l'erreur type. La première observation que nous pouvons relever porte sur les valeurs des paramètres presque identiques pour les deux modèles. Cependant, on note des écarts par rapport aux valeurs des erreurs pour certains paramètres en particulier les constantes d'alternatives ($\beta_{ASC,car}$, $\beta_{ASC,pt}$, $\beta_{ASC,bicycle}$, $\beta_{ASC,walk}$). Le *SI-NL* présente des erreurs type (*Rob. Std err*) plus élevées pour ces paramètres. Ces différences de valeurs s'expliquent principalement par la nature du modèle *SI-NL* (*nested logit*) qui essaie de tenir compte des relations entre les alternatives, tandis que le *SI-MNL* suppose qu'il n'y a aucune relation. Ainsi, le *SI-NL* serait

TABLEAU 4.1 – Statistiques générales des modèles *SI-MNL* et *SI-NL* (selon le logiciel *PandasBiogeme*).

| Statistiques | <i>SI-MNL</i> (modèle 1) | <i>SI-NL</i> (modèle 2) |
|--|---|----------------------------|
| Number of estimated parameters | 13 | 14 |
| Sample size | | 4771 |
| Excluded observations | | 343 |
| Init log likelihood | -6700.209 | -6700.209 |
| Final log likelihood | -4138.308 | -4138.307 |
| Likelihood ratio test for the init. model | 5123.803 | 5123.804 |
| Rho-square for the init. model | 0.382 | 0.382 |
| Rho-square-bar for the init. model | 0.38 | 0.38 |
| Akaike Information Criterion | 8302.615 | 8304.614 |
| Bayesian Information Criterion | 8386.729 | 8395.198 |
| Final gradient norm | $2.2345e-02$ | 6.7685 |
| Bootstrapping time | 0 :11 :01.052890 | 1 :07 :19.546332 |
| Nbr of threads | 4 | 4 |
| Algorithm | BFGS with trust region for simple bound constraints | |
| Proportion analytical hessian | 0.0% | 0.0% |
| Relative projected gradient | $2.247521e-6$ | $3.161913e-06$ |
| Number of iterations | 78 | 78 |
| Number of function evaluations | 221 | 223 |
| Number of gradient evaluations | 72 | 73 |
| Number of hessian evaluations | 0.0 | 0.0 |
| Cause of termination | $2.2e^{-6} \leq 6.1e^{-6}$ | $4.2e^{-6} \leq 6.1e^{-6}$ |
| Optimization time | 0 :00 :01.795740 | 0 :00 :03.016882 |

donc moins précis dans l'estimation des valeurs de ces paramètres comparativement au *SI-MNL*. Il faut noter à ce niveau le temps d'estimation (*Bootstrapping time*) des paramètres du *SI-NL* (plus d'une heure de calcul) qui reste important comparativement au *SI-MNL* (11 minutes). D'une manière générale, les « erreurs type » sont faibles traduisant ainsi également une bonne capacité d'estimation des valeurs des paramètres.

L'analyse des signes des valeurs des paramètres révèle une conformité des modèles à traduire le comportement des individus dans leur choix modal. Par

TABLEAU 4.2 – Valeurs des paramètres des modèles *SI-MNL* et *SI-NL* (selon le logiciel *PandasBiogeme*).

| | Parameters | <i>SI-MNL</i> (modèle 1) | | <i>SI-NL</i> (modèle 2) | |
|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------|--------------|
| | | Value | Rob. Std err | Value | Rob. Std err |
| <i>Car</i> | $\beta_{ASC,car}$ | -2.69 | 0.272 | -2.69 | 2.05 |
| | $\beta_{inVehicleTime,car}$ | 0.00133[min^{-1}] | 0.00918 | 0.00134[min^{-1}] | 0.0101 |
| <i>PT</i> | $\beta_{ASC,pt}$ | -3.83 | 0.272 | -3.84 | 2.1 |
| | $\beta_{inVehicleTime,pt}$ | -0.000842[min^{-1}] | 0.00158 | -0.000841[min^{-1}] | 0.00164 |
| | $\beta_{accessEgressTime,pt}$ | 0.0228[min^{-1}] | 0.0511 | 0.0227[min^{-1}] | 0.0511 |
| | $\beta_{numberTransfers}$ | -0.19 | 2.25 | -0.205 | 2.25 |
| | $\beta_{transferTime,pt}$ | -0.907[min^{-1}] | 0.412 | -0.936[min^{-1}] | 0.412 |
| <i>Bicycle</i> | $\beta_{ASC,bicycle}$ | -3.07 | 0.312 | -3.07 | 2.07 |
| | $\beta_{travelTime,bicycle}$ | -0.108[min^{-1}] | 0.0157 | -0.108[min^{-1}] | 0.0145 |
| | $\beta_{highAge,bicycle}$ | 0.00979 | 0.0049 | 0.00979 | 0.0049 |
| <i>Walking</i> | $\beta_{ASC,walk}$ | 0.218 | 0.274 | 0.217 | 2.05 |
| | $\beta_{travelTime,walk}$ | -0.131[min^{-1}] | 0.00639 | -0.131[min^{-1}] | 0.0068 |
| <i>Other</i> | β_{cost} | -0.0142[$euro^{-1}$] | 0.0459 | -0.0142[$euro^{-1}$] | 0.046 |
| | $\beta_{Nest,pt}$ | - | - | 1 | 1.61 |
| <i>Calibration</i> ^a | $\theta_{parkingSearchPenalty}$ | 4 | - | 4 | - |
| | $\theta_{accessEgressWalkTime}$ | 4 | - | 4 | - |
| | θ_{ASC,car_pt} | 1.25 | - | 1.25 | - |

a. Les paramètres de calibration ne font pas partie de ceux à estimer par le modèle.

exemple, le paramètre relatif au coût a un effet négatif dans le processus de choix, ce qui est assez intuitif. Plus le coût d'une alternative est élevé, moins l'individu aura un intérêt pour cette alternative. De plus, les paramètres liés au temps de parcours des alternatives, exceptés pour la voiture sont de signe négatif. Cette situation traduit également une part de réalité, car plus le déplacement avec un mode de transport prend du temps, moins il y a de chance d'être utilisé. La voiture personnelle reste une particularité au regard du confort qu'elle produirait vis-à-vis du temps à passer lors du déplacement. Le nombre de transferts entre les transports publics est également perçu comme un facteur limitant l'utilisation de ce mode. Tandis que les temps d'accès et de sortie ($\beta_{accessEgressTime,pt}$) sont perçus comme peu contraignants. Enfin, plus on est jeune, moins devient pénible l'utilisation du vélo contrairement aux personnes âgées (plus de 60 ans).

Il faut noter ici que les paramètres de calibration ($\theta_{parkingSearchPenalty}$ ¹¹,

11. $\theta_{parkingSearchPenalty}$ permet de prendre en compte l'impact de la recherche de parking pour

$\theta_{accessEgressWalkTime}$ ¹² et θ_{car_pt}) sont estimés manuellement afin d'ajuster la simulation. Les valeurs ainsi présentées (excepté les constantes d'alternative du mode *car_pt*) ont été adaptées des travaux de [73]. En effet, l'alternative *car_pt* n'est pas utilisée dans l'estimation du modèle de choix discret, mais uniquement dans l'étape de simulation du comportement de déplacement en respectant certaines contraintes.

La proposition du *SI-NL* (modèle 2) avec le nid des transports publics avait pour but d'étudier la corrélation entre les alternatives VP+TP et TP. Au regard de la valeur du coefficient du nid $\beta_{Nest,PT} = 1$, il s'avère que ces deux alternatives ne sont pas corrélées (cf. sous-section 3.2.1). Le *SI-MNL* (modèle 1) est donc tout à fait adapté pour estimer le choix du mode de transport en tenant compte de l'alternative intermodale VP+TP. Ce modèle (*SI-MNL*) présente également la particularité d'être simple et rapide à estimer. Nous avons donc choisi d'implémenter le *SI-MNL* dans *MATSim* pour simuler les comportements d'intermodalité combinant la voiture personnelle (VP) et les transports publics (TP).

4.3 Mise en place de la simulation

Cette section présente la génération de la demande initiale et du réseau routier multimodal. Elle renseigne également sur les paramètres de configuration de base pour réaliser la simulation et les premiers résultats de processus de calibration pour la reproduction de la situation de référence. Ces premiers résultats ont été présentés à la 12ème conférence internationale *ANT (International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies)* [44].

le stationnement de la voiture.

12. $\theta_{accessEgressWalkTime}$ capture l'influence du temps de marche pour accéder à la voiture et à la destination finale.

4.3.1 Génération de la demande de déplacements et de l'offre de transport

Comme évoqué dans la section 1.3.2, la réalisation d'une simulation de transport multi-agent nécessite la donnée de la demande de déplacements et l'offre de transport (réseau routier). La création du réseau multimodal est généralement simple et elle est obtenue à partir des données *OSM* et *GTFIS* de la zone d'étude en utilisant l'outil *pt2matsim* [124]. Le réseau obtenu est composé de nœuds (intersections) et de liens (routes) le long desquels les agents/véhicules peuvent se déplacer. Les principaux attributs des réseaux routiers sont :

- *length* : longueur de la route ;
- *max_speed* : vitesse limite autorisée ;
- *number_of_lanes* : nombre de voies ;
- *flow_capacity* : flux de trafic maximal de véhicules par heure (débit) ;
- *storage_capacity* : flux de trafic maximal de véhicules par km (densité) ;
- *mode_allowed* : type de mode de transport (p. ex., voiture, vélo) autorisé.

La création de la demande de déplacements est plus complexe. Elle est issue généralement d'une population synthétique. Cette population synthétique est une collection d'agents avec des attributs comme la localisation du domicile, l'âge, le genre, la catégorie socio-professionnelle, la possession d'équipements de transport (p., ex., permis de conduire, voiture et ticket ou carte d'abonnement de transports publics). La demande regroupe les chaînes d'activités et les déplacements correspondants. Elle comprend les éléments tels que les types d'activités et leur localisation, les heures de début et de fin de l'activité et le mode de transport. *MATSim* permet de regrouper la population synthétique et la demande résultante dans un seul fichier (*population.xml* ou *plans.xml*). Ainsi, il est possible de faire des analyses plus fines en prenant en compte les caractéristiques individuelles des agents.

Les principales caractéristiques des agents dans la population synthétique sont présentées dans le Tableau 4.3. Toutes les caractéristiques de l'agent (présentées dans le Tableau 4.3) reflètent les informations relatives aux attributs,

TABLEAU 4.3 – Caractéristiques (attributs, états et intentions) de l'agent dans la population synthétique.

| Caractéristiques | Description |
|---------------------------|---|
| size | taille de l'agent dans l'environnement |
| color | couleur de l'agent (peut être définie en fonction de l'état de l'agent) |
| position (x,y) | localisation de l'agent dans l'environnement |
| aspect | forme (cercle, triangle) de l'agent |
| age | âge de l'agent |
| gender | genre (homme, femme) de l'agent |
| occupation | type d'occupation professionnelle (p. ex., cadre, étudiant, retraité) de l'agent |
| driver_licence_possession | possession du permis de conduire |
| transit_ticket_possession | possession d'un titre de transport public |
| car_possession | possession de voiture |
| bike_possession | possession de vélo |
| mode_utility | l'utilité du mode de transport |
| starts_activity | début de la réalisation d'une activité (p. ex. travail, éducation) |
| ends_activity | fin de la réalisation d'une activité |
| starts_trip | début de la réalisation d'un déplacement |
| ends_trip | fin de la réalisation d'un déplacement |
| plan | l'intention d'un agent (pour une journée) en termes d'activités à réaliser (p. ex. "aller au travail à 8h00, faire les courses en rentrant à 18h00, rentrer à la maison à 19h00") |

états et intentions de l'individu qu'il modélise en termes d'activités et de déplacements. Les attributs des agents ont été sélectionnés de sorte à permettre un comportement réaliste sur le choix du mode transport à utiliser. Les agents sont principalement dans deux états : réalisation d'activités ou de déplacements. En général la réalisation d'un déplacement est enclenchée à la fin d'une activité : on quitte la maison pour se rendre au travail. Le plan d'un agent est composé des éléments suivants :

- type de l'activité,
- durée (ou l'heure de début/fin) de l'activité,
- localisation de l'activité,
- mode de transport utilisé.

Ce plan décrit les activités de déplacement à effectuer au cours de la journée.

La Figure 4.5 illustre le plan quotidien de trois profils agents. Le premier

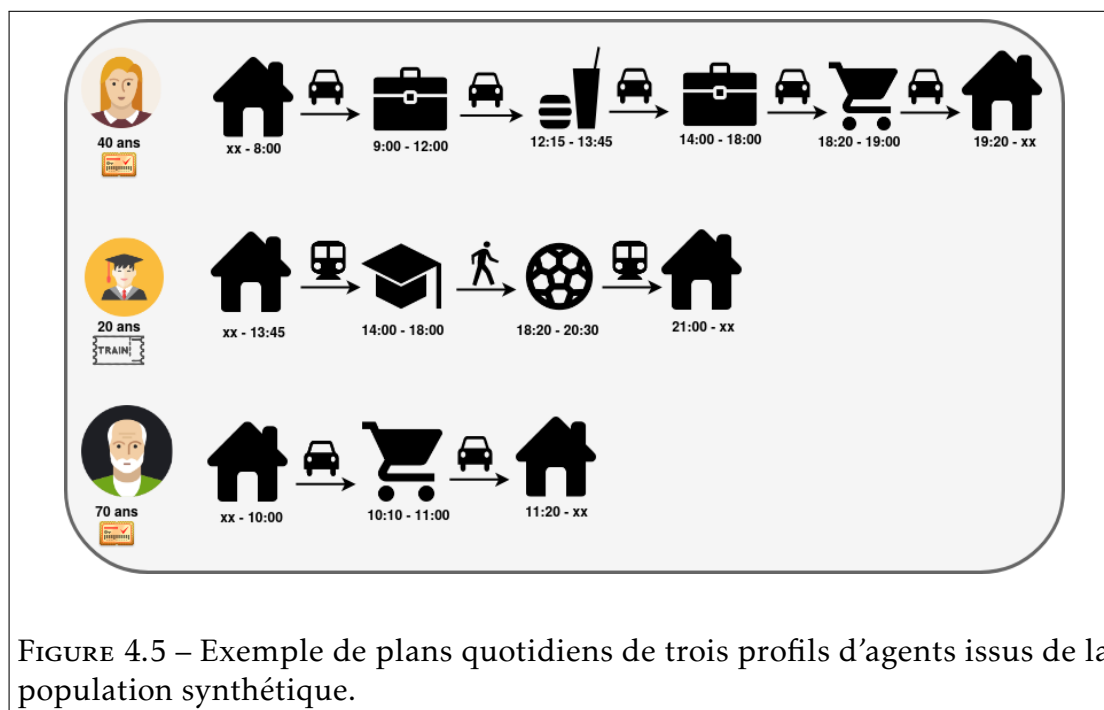


FIGURE 4.5 – Exemple de plans quotidiens de trois profils d’agents issus de la population synthétique.

agent est une dame de 40 ans, possédant un permis de conduire et qui utilise principalement la voiture pour ses déplacements. Elle quitte la maison à 8h00 pour son travail. Elle fait une pause déjeuner entre 12h15 et 13h45 puis reprend le travail. Elle quitte le service à 18h00 pour faire ses courses entre 18h20 et 19h00 avant de rentrer chez elle à 19h20. Le deuxième agent est étudiant de 20 ans, sans permis de conduire et qui possède un abonnement de transport public (TP). Il utilise principalement la marche et les transports publics comme mode de transport. Il va au cours en TP à 13h45, pratique une activité sportive entre 18h20 et 20h30 et rentre à la maison à 21h00. Le dernier profil d’agent est un retraité de 70 ans possédant un permis de conduire et utilise la voiture pour ses déplacements. Il passe une grande partie de la journée à la maison et fait ses courses entre 10h10 et 11h00.

A notre connaissance, il n’existe pas un algorithme standard pour traiter les données afin de créer une demande de déplacements au format *MATSim*. La génération de la demande doit être effectuée par le modélisateur ou le chercheur

en fonction des données disponibles sur la région d'étude. Il existe bien des synthétiseurs pour différents cas d'étude disponibles en *open source* [71, 156, 83]. Pour être réutilisables, ces algorithmes doivent être réadaptés ou réajustés pour correspondre à une nouvelle zone d'étude. Fort heureusement, il existe un synthétiseur *open source* qui a été développé initialement pour créer le scénario de transport pour la ville de Paris et l'île de France [71]. Ce pipeline présente l'avantage d'être bien documenté pour permettre son adaptation à d'autres régions de France. Nous présentons dans ce qui suit une description sommaire du synthétiseur.

4.3.2 Description du pipeline utilisé

Le pipeline de génération de population synthétique et de demande de transport proposé dans [71] repose sur l'utilisation de plusieurs bases de données (en libre accès de préférence) auxquelles est appliqué un processus d'appariement pour enrichir les attributs de cette population. Les principales sources de données utilisées sont le recensement, l'enquête globale de transport (EGT), l'ENTD, la base Filosi sur les revenus, la BD Topo et les données géographiques sur les communes, départements et régions. Il faut noter ici qu'exceptée l'EGT, les autres sources de données sont accessibles publiquement. L'utilisation de ces données pour générer une demande de transport est semblable à la description introduite dans les sous-sections 1.2.4 et 1.3.3.

Le pipeline utilise les données du recensement comme principale source de données pour la génération de la demande de transport. Ce choix se justifie principalement par la forte représentativité des données du recensement (environ 30% de la population réelle contre seulement 0,3 – 0,8% pour les enquêtes de déplacements). Ainsi, il y a moins de perte d'informations pour des échelles plus importantes. L'objectif est de commencer par une représentation individualisée plus détaillée de la population et d'ajouter des informations provenant d'autres sources de données. De plus, étant donnée la taille de la population réelle qui est souvent très importante (plus d'un million d'individus), le synthétiseur utilise un taux d'échantillonnage (s) en entrée pour générer la population synthétique à partir des données ajustées. C'est cet échantillon de population qui sera enrichi.

Cette opération est relativement simple pour les informations relatives aux revenus, flux O/D, et localisations (à l'échelle des communes) des O/D des déplacements. Par contre, il est nécessaire d'effectuer une *mise en correspondance statistique* entre le recensement et les données de l'enquête de déplacements pour obtenir des informations telles que les chaînes de déplacements, la possession d'un permis de conduire, la possession d'un titre de transports publics. Le processus de mise en correspondance repose sur l'hypothèse selon laquelle les individus ayant les mêmes caractéristiques socio-démographiques (p. ex., l'âge, le sexe, le revenu et la catégorie socioprofessionnelle) du recensement partagent les mêmes informations dans l'enquête de déplacements. L'algorithme recherche d'abord un minimum d'observations sources (p. ex., $M = 20$) dans l'enquête de déplacements qui correspondent aux caractéristiques socio-démographiques de la cible dans le recensement. Cette méthode évite de parcourir systématiquement l'ensemble de la base de l'enquête de déplacements. La définition du minimum M dépend de la taille de la population dans l'enquête. Plus la taille de la population est grande, plus on peut choisir une valeur minimale d'observation plus importante. Par la suite, l'algorithme sélectionne aléatoirement la référence d'une observation (parmi les M observations) qui sera utilisée ultérieurement pour extraire les informations supplémentaires dont on a besoin dans les données de l'enquête de déplacements.

Le pipeline fournit en sortie différents fichiers synthétiques à savoir les individus et les ménages auxquels ils appartiennent avec leurs attributs socio-démographiques respectifs. Il fournit également les chaînes d'activités et les déplacements correspondants pour chaque individu avec des informations détaillées telles que l'heure de départ, la durée, l'objet du trajet et le mode utilisé. La combinaison de ces données permet de générer une demande de transport à base d'agents et d'activités au format *MATSim*.

Le pipeline décrit ci-dessus présente la particularité d'être reproductible grâce notamment aux données d'entrée lesquelles sont disponibles en accès libre. Cependant, au regard de la spécificité des régions d'étude et des données disponibles certaines adaptations demeurent nécessaires. Ces adaptations portent principalement sur des traitements de données nécessaires en entrée. Des opérations de reconstructions d'informations des données disponibles sont

également nécessaires pour pouvoir utiliser le synthétiseur. Il s'agit notamment des communes origine/destination qui sont floutées dans les données de l'EMD.

4.3.3 Principales adaptations du pipeline

Comme présenté ci-dessus, le synthétiseur s'appuie principalement sur les données du recensement de la population. Cependant, dans cette base de données, les individus ne sont pas localisés au niveau municipal. Les seules localisations désagrégées possibles pour la région de la Métropole Européenne de Lille (MEL) sont le niveau *IRIS* et le niveau *Cantonville*. Finalement, nous avons décidé d'utiliser le *Cantonville* car plus de la moitié des communes de la MEL ont moins de 5 000 habitants (pas de zones *IRIS*). Nous avons ainsi utilisé dans un premier temps la table d'appartenance géographique des communes au 1er janvier 2017, afin d'extraire le *Cantonville* selon les communes de la MEL. Cette base de données est également fournie par l'INSEE et disponible en libre accès¹³. Par la suite, nous appliquons un filtre pour ne sélectionner que les communes de la MEL.

Le tableau 4.4 présente les principales adaptations du synthétiseur pour correspondre au périmètre de la MEL. Ces adaptations concernent l'ajustement de la zone d'étude au périmètre de la MEL, l'intégration des données de l'enquête ménages déplacements (EMD 2016) et le niveau de chargement des données du recensement¹⁴.

4.3.4 Résultats de l'offre et de la demande de transport générées

Après avoir adapté le synthétiseur open source initialement développé pour l'île de France, [71] nous avons créé plusieurs scénarios en utilisant différents taux d'échantillonnage (1%, 5%, 10%, 20%, 50% et 100%). Si le temps d'exécution pour les petits échantillons (moins de 20%) n'était pas trop élevé, il fallait compter en moyenne une à trois journées pour les échantillons importants

13. <https://www.insee.fr/fr/information/2028028>

14. Nos adaptations sont disponibles ici <https://github.com/diallitoz/eqasim-synthetic-population>

TABLEAU 4.4 – Principales adaptations du synthétiseur original pour le périmètre de la MEL.

| Adaptations | <i>Île-de-France</i> | MEL |
|---|----------------------------------|---------------------------|
| Niveau de traitement des données du recensement | Département | Cantonville |
| Niveau de zonage spatial | Département, région | Commune |
| Enquête de déplacement | <i>EGT*</i> , <i>ENTD</i> | EMD |
| Attributs de mise en correspondance | âge, genre, CSP, revenu, commune | âge, genre, CSP, commune |
| Minimum d'observations (<i>M</i>) | 20 | 20 |
| Pourcentage de sous-échantillonnage | 5% | 20% |
| OSM | <i>Île-de-France</i> | <i>Nord-pas-de-Calais</i> |

(50% et 100%) avec une machine *Intel CORE i7* avec 16 Go de RAM. Bien qu'une évaluation de la population synthétique soit possible pour chaque taux d'échantillonnage, nous nous limiterons à la présentation des résultats obtenus avec un taux de 20% qui produit les meilleurs résultats en termes de temps de calcul et précision de mise en correspondance. Ce taux de sous-échantillonnage a été également identifié comme offrant la meilleure représentation synthétique de la population pour une demande de transport dans [48].

Il est à noter que la qualité de la population synthétique dépend principalement des étapes d'échantillonnage de la population et d'appariement statistique dans le processus de synthèse. Une comparaison entre différentes strates d'individus entre la population synthétique et les données de référence au niveau de la personne et du ménage est présentée respectivement aux Figures 4.6 et 4.7. On constate que les caractéristiques socio-démographiques générées à partir des données du recensement correspondent bien. De plus, certains attributs résultant du processus de mise en correspondance statistique, comme la possession d'abonnement des transports publics (TP), correspondent bien aux données de ré-

férence (EMD). En revanche, la possession d'un permis de conduire et le nombre de vélos sont un peu moins évalués par l'algorithme de mise en correspondance.

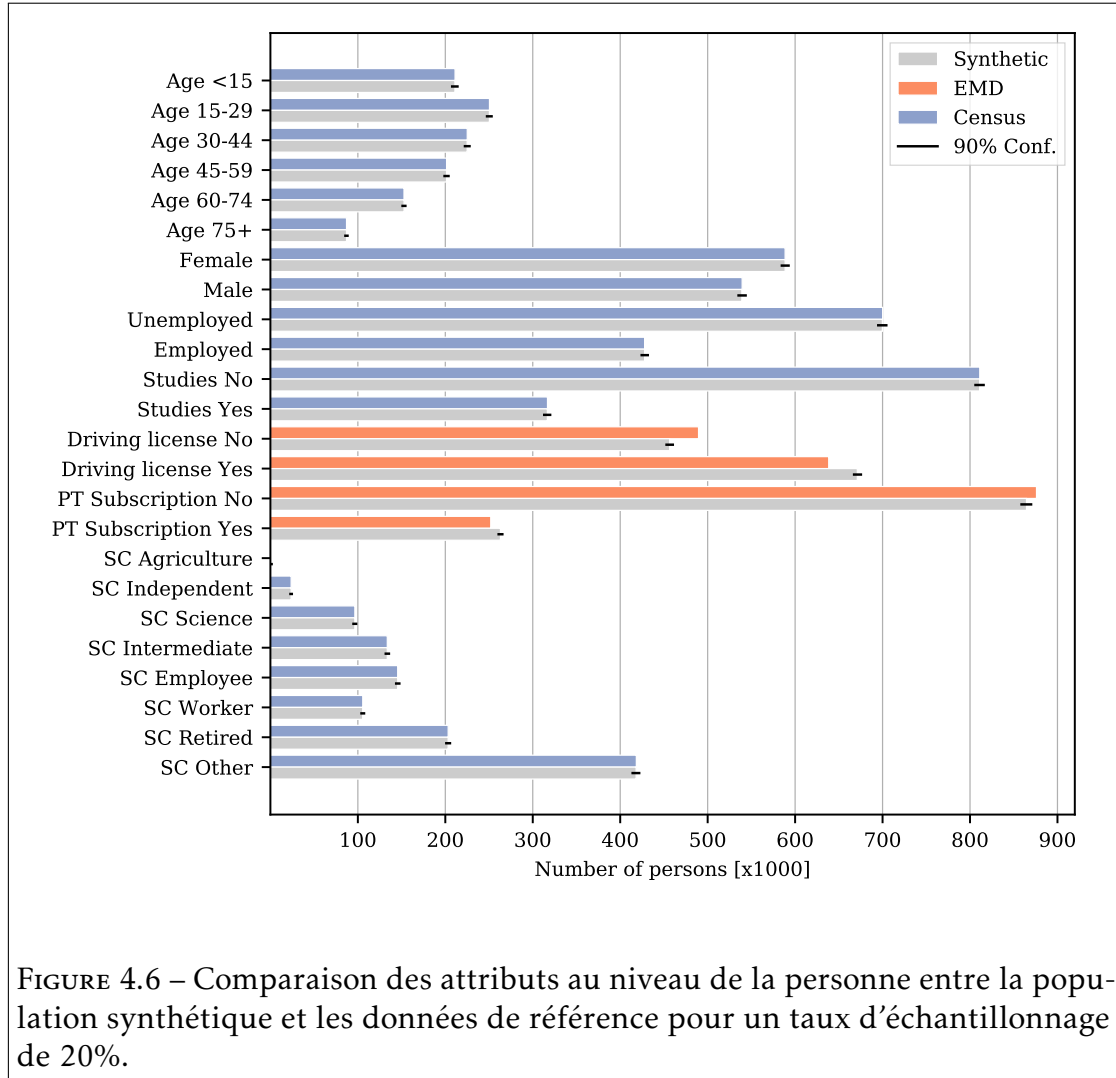


FIGURE 4.6 – Comparaison des attributs au niveau de la personne entre la population synthétique et les données de référence pour un taux d'échantillonnage de 20%.

Un autre point intéressant à évaluer est la capacité de l'algorithme d'appariement à déterminer les chaînes d'activités des personnes en fonction des caractéristiques socio-démographiques. La Figure 4.8 présente une répartition des chaînes d'activités dans l'EMD et la population synthétique pour les personnes actives (entre 15 et 64 ans)¹⁵. Les chaînes d'activités pour les hommes

15. La population d'âge actif concerne les personnes de 15 à 64 ans.
<https://data.oecd.org/fr/pop/population-d-age-actif.htm>

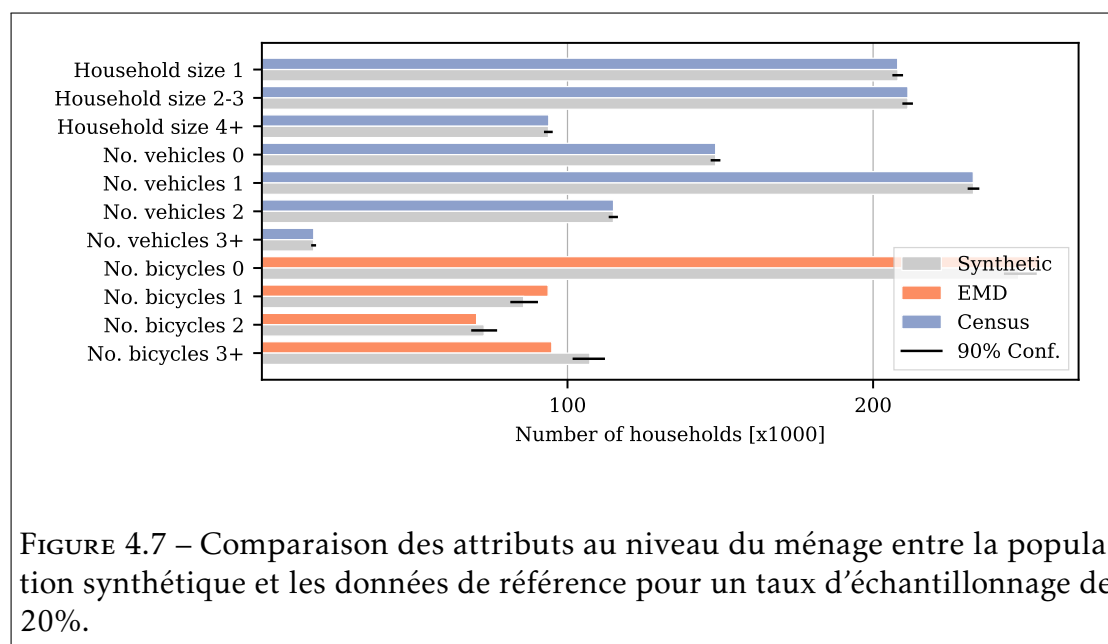
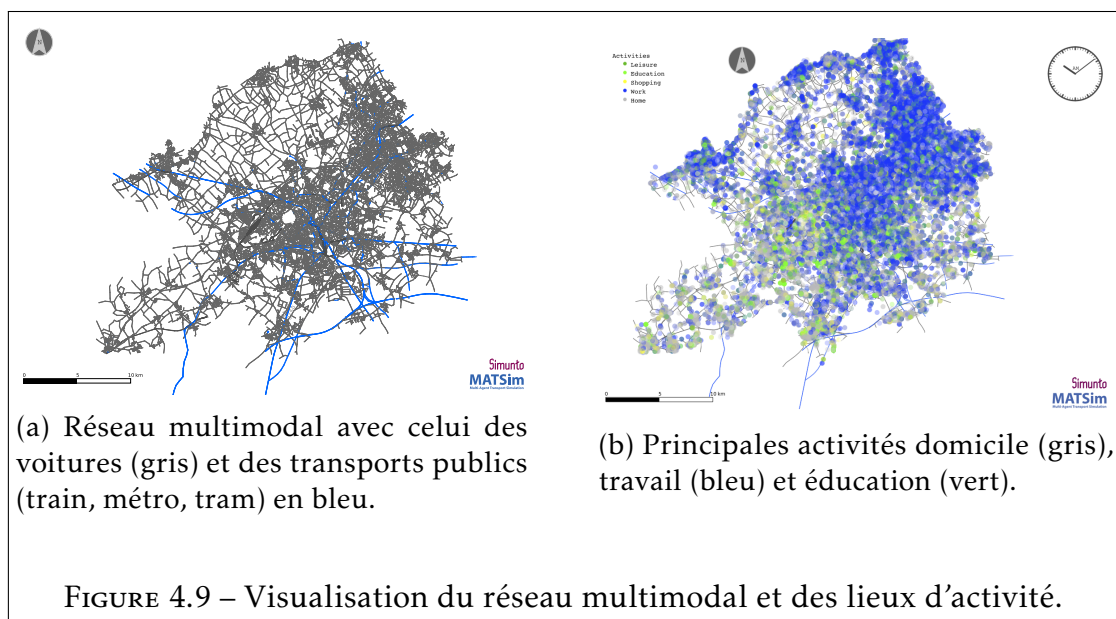
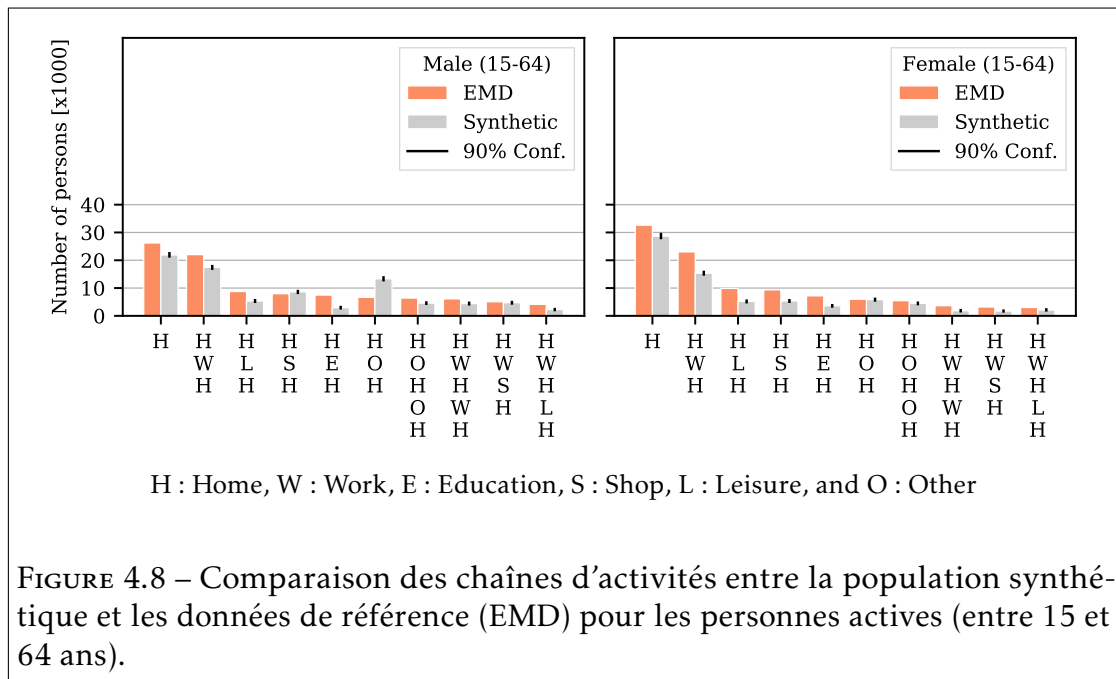


FIGURE 4.7 – Comparaison des attributs au niveau du ménage entre la population synthétique et les données de référence pour un taux d'échantillonnage de 20%.

et les femmes sont présentées côte à côte. On voit qu'avec seulement 20% du taux d'échantillonnage, l'appariement statistique produit des chaînes d'activités proches des données de référence. Cependant, on note une surévaluation des déplacements professionnels (HWH) et des déplacements à domicile (H) respectivement pour les hommes et les femmes pour la population synthétique. Le phénomène inverse est observé pour les déplacements scolaires dont l'algorithme sous-estime la répartition par rapport aux données de référence. Les chaînes impliquant des activités primaires (H, W et E) sont les plus importantes avec de faibles variations entre les sexes. Par exemple, les activités domestiques (H) et professionnelles (HWH) sont plus importantes pour les femmes que pour les hommes.

La Figure 4.9 donne un aperçu du réseau multimodal et de la localisation des activités des agents correspondant en cours de matinée (10h00). On peut voir que les principaux motifs de déplacements des agents sont le travail et l'éducation. Ces activités sont situées principalement dans les grandes villes de la MEL comme Lille, Tourcoing et Roubaix.



4.3.5 Paramètres de configuration de la simulation

Nous donnons quelques détails de la configuration de la simulation tels que la taille de la population simulée, le nombre d'itérations, la part d'agents autorisés

à changer de mode de transport et certains paramètres du réseau routier.

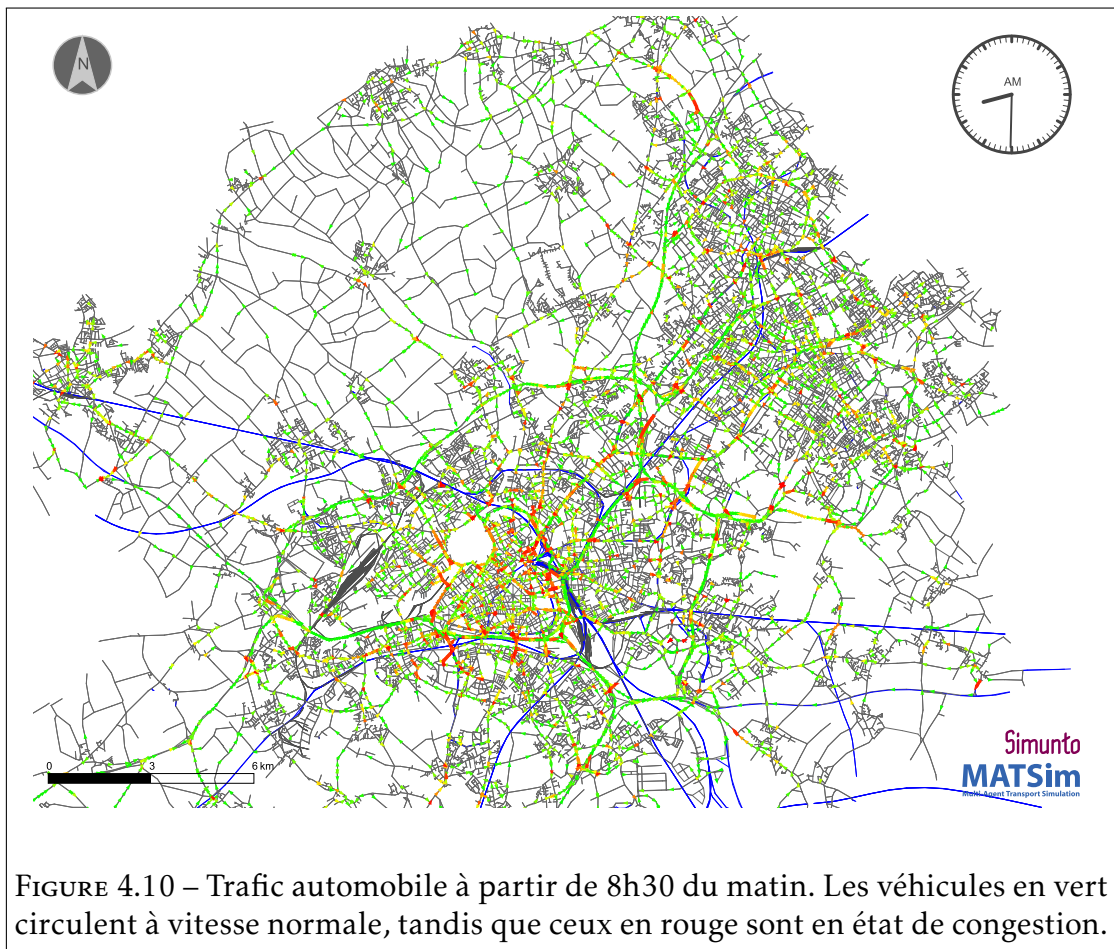
La population synthétique *MATSim* générée dans cette étude représente un échantillon de 20% de la population réelle ce qui correspond à 225 240 agents avec un total de 746 318 déplacements contre 24 629 déplacements dans l'Enquête Ménage Déplacement (EMD). Cet échantillon est basé sur les récents travaux sur la réduction d'échelle de la population dans les simulations de transport multi-agents [48]. Ce choix se justifie principalement pour des raisons de calcul afin d'avoir des temps de simulation exploitables et des fichiers de sortie peu volumineux. Pour prendre en compte cet échantillonnage sur les flux de trafic sur le réseau routier réel, le débit et les capacités de stockage de tous les tronçons du réseau automobile généré doivent également être réduits. Différentes valeurs ont été sélectionnées dans la phase de calibration. Le nombre d'itérations est fixé à 100 et la portion d'agents autorisée à la re-planification à chaque itération a été fixée à 20%.

4.3.6 Processus de calibration de la simulation

Le scénario utilisé a été calibré en ajustant les paramètres des fonctions d'utilité des alternatives du modèle de choix discret afin d'avoir une sortie de la simulation proche des données empiriques ou de référence (EMD) en matière de répartition modale et de distribution de distance et de durée des déplacements. Nous avons également tenu compte de la qualité de simulation (sur le plan visuel) des déplacements pour voir la manière dont les congestions se formaient sur le réseau en fonction de nos connaissances de la zone d'étude.

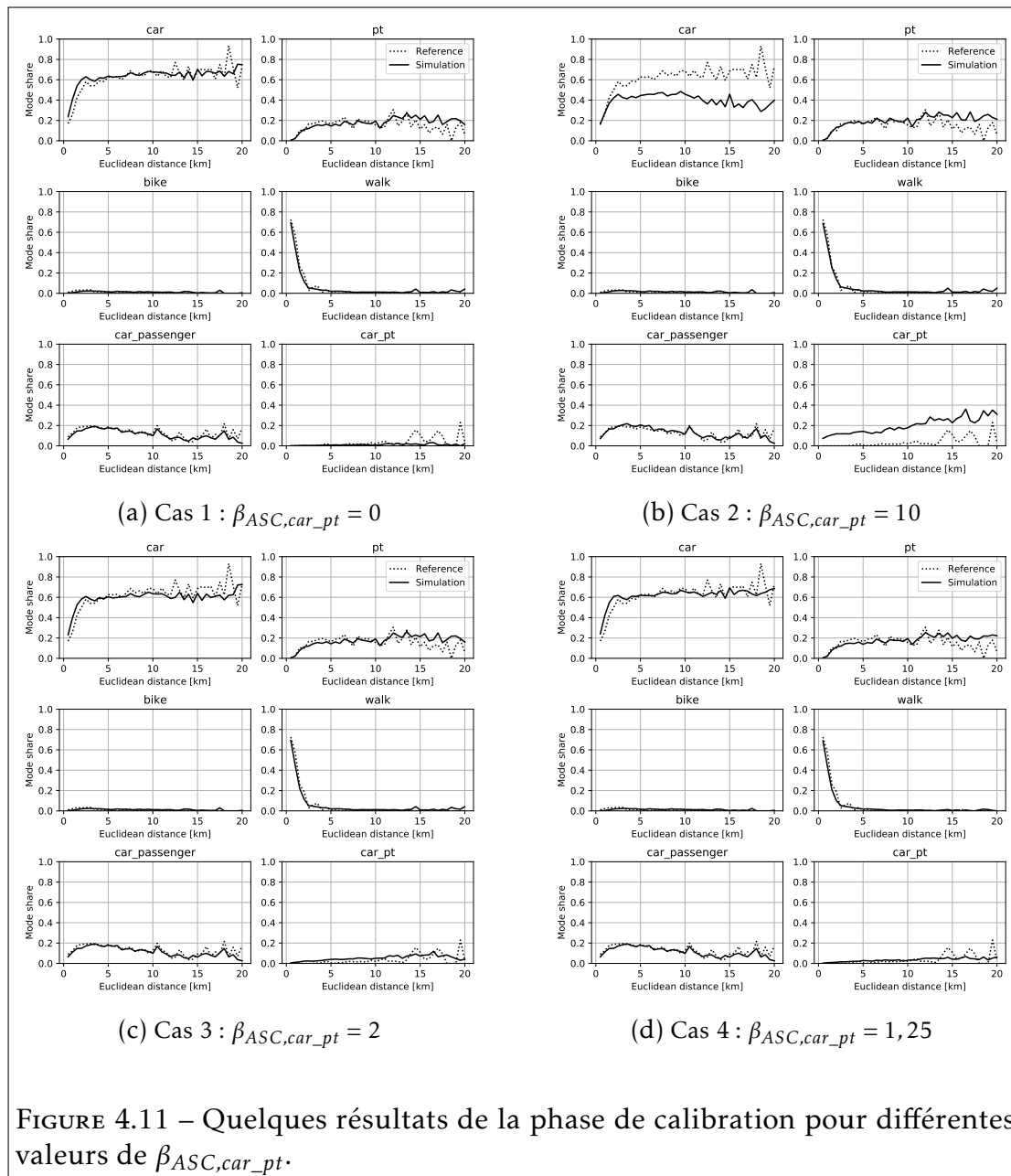
Le processus de calibration/validation à consister principalement à ajuster les paramètres de l'alternative VP+TP car ceux-ci n'ont pas été estimés dans le modèle de choix discret de mode. Cette phase de calibration a été faite de manière manuelle car nous ne disposons pas de données réelles sur la fréquentation des parkings relais. Enfin, nous avons ajusté la capacité du réseau automobile pour différentes valeurs afin d'améliorer la sortie de la simulation.

La Figure 4.10 donne un aperçu de la situation du trafic en début de matinée en réduisant la capacité de réseau à 18% pour correspondre à la taille de la population simulée (20%). Comme on pouvait donc si attendre, le flux du trafic



est important aux heures de pointe (08h30) avec pour conséquence l'apparition de micro congestions par endroit du réseau de transport (en rouge). On note également des vitesses de déplacement relativement faibles (en jaune) au sein du réseau. Les véhicules en vert correspondent à des flux de trafic fluide où les individus circulent en fonction de la vitesse limite de la route.

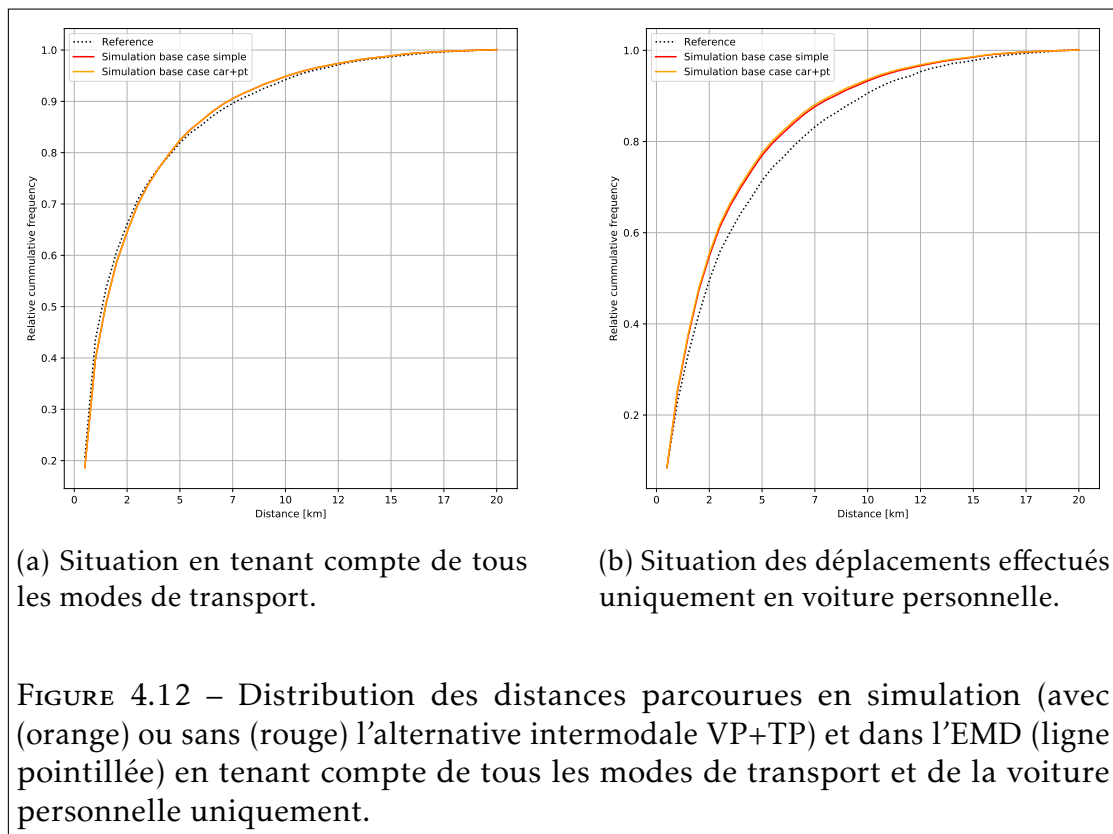
La Figure 4.11 présente quelques sorties de simulation correspondant aux parts modales des différentes alternatives pour respectivement différentes valeurs de l'ASC de VP+TP : $\beta_{ASC,car_pt} = 0$ (Figure 4.11a), $\beta_{ASC,car_pt} = 10$ (Figure 4.11b), $\beta_{ASC,car_pt} = 2$ (Figure 4.11c), et $\beta_{ASC,car_pt} = 1,25$ (Figure 4.11d). Ces simulations sont faites avec le débit et la capacité de stockage de tous les tronçons réduits de 18%. Les parts modales pour chaque mode (alternative) sont présentées en ordonnée, tandis que les distances euclidiennes des déplacements



sont en abscisse. Cette représentation permet une meilleure appréciation des distributions modales. Par exemple, nous pouvons voir que la part de la marche est très importante pour les petites distances et tend vers zéro pour les grandes distances, correspondant à notre intuition.

Le cas 4 avec $\beta_{ASC,car_pt} = 1,25$ (Figure 4.11d) produit une sortie de simu-

lation proche à la situation de référence. On note quelques écarts pour les déplacements de longues distances (plus de 12 km) effectués en VP, TP et VP+TP. Cette variation s'explique principalement au manque d'observations de référence sur ces types de déplacements, lesquels sont pour la plupart occasionnels (dans le périmètre restreint à la MEL). La Figure 4.12 donne un aperçu de la distribution des distances de déplacement issues de la simulation (avec ou sans l'alternative intermodale VP+TP) et de l'enquête ménage déplacement (EMD). La Figure 4.12a correspond aux distances de déplacement de l'ensemble des modes de transport, tandis que celle 4.12b donne celles effectuées uniquement en voiture personnelle. On peut voir que les distances de déplacement issues de

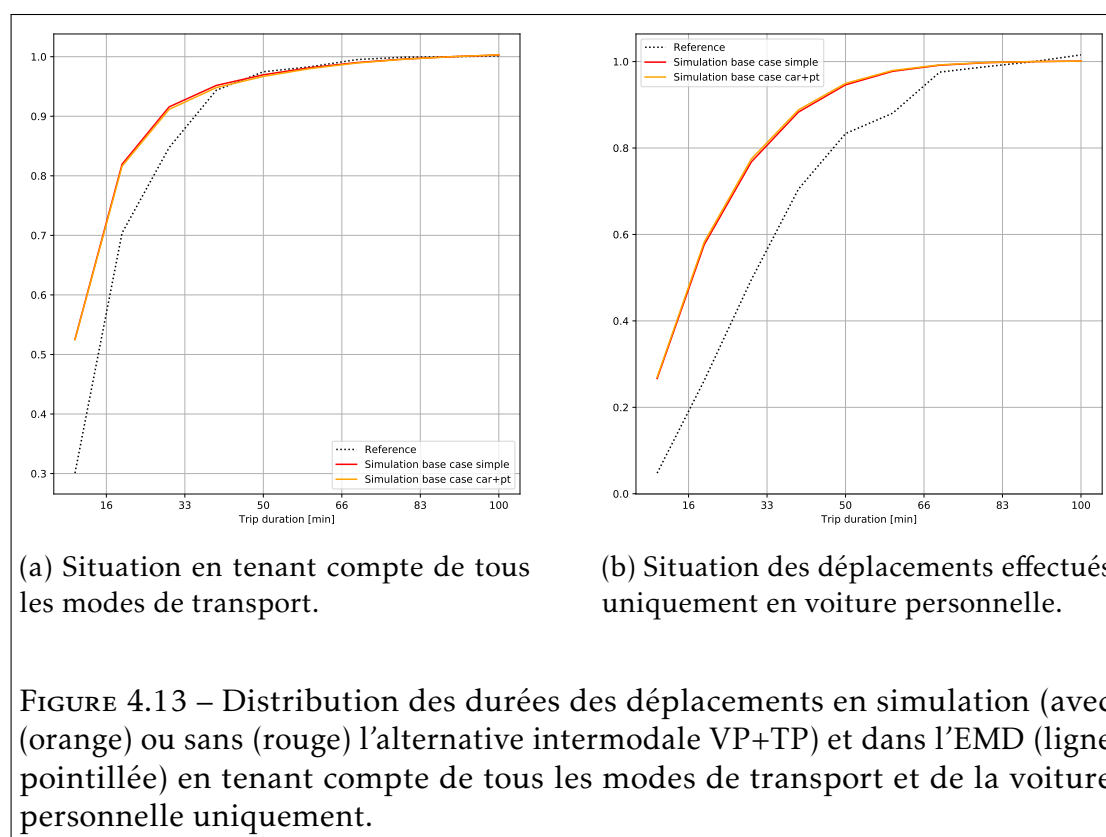


la simulation correspondent parfaitement aux données de référence de l'EMD. On note une légère variation pour les déplacements effectués en voiture uniquement (4.12b). La prise en compte de l'alternative intermodale VP+TP n'a pas un impact significatif à ce stade de l'étude consistant à reproduire la situation de

référence. En rappel, la part modale VP+TP ne constitue que 0,8% des déplacements, considérée comme très faible comparée à l'ensemble des déplacements. L'analyse du graphique fait ressortir les informations suivantes :

- 60% des déplacements (tous modes confondus) font moins de 2 km. Ce nombre est légèrement plus important dans le cas l'utilisation exclusive de la voiture personnelle. Cette variation s'explique par la forte représentativité de la marche à pied pour les petites distances (80%).
- Moins de 2% des déplacements (tous modes confondus et voiture personnelle uniquement) font plus de 12 km de distance.

La Figure 4.13 donne un aperçu de la distribution des temps de parcours des déplacements réalisés par la voiture personnelle et tous modes confondus selon les résultats de simulation avec ou sans l'alternative intermodale VP+TP. Les



temps de parcours issus de la simulation correspondent bien avec les données

de l'EMD. Une fois de plus, on note des variations dans le cas des déplacements effectués en voiture personnelle uniquement. Ces variations de manière générale, peuvent s'expliquer par les données de référence où les durées de déplacement sont rapportées par les personnes enquêtées de façon « arrondie » plutôt que des valeurs exactes. L'analyse de la Figure 4.13 met en évidence que :

- 60% des déplacements (tout mode confondu) font moins de 16 minutes. Ce nombre est plus important pour l'utilisation exclusive de la voiture personnelle où 60% des déplacements de l'EMD font plus de 30 minutes contre moins de 20 minutes pour la simulation.
- 60% des déplacements (tout mode confondu) font moins de 2 km;
- Moins de 1% des déplacements (tout mode confondu et voiture personnelle uniquement) font plus d'une heure.

Dans la suite, les valeurs du cas 4 ont été retenues pour la suite de l'étude notamment pour l'évaluation des parkings relais (P+R) et l'analyse de l'application du péage urbain.

4.4 Evaluation des parkings relais (P+R)

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'évaluation de l'utilisation des parkings relais (P+R) ainsi que les profils d'utilisateurs dans les déplacements combinant la voiture personnelle et les transports publics (TP). Cette évaluation a fait l'objet d'un article aux 29^{ème} Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents (JFSMA) [45] et une communication orale à la rencontre annuelle des utilisateurs de *MATSim* 2021 (*MATSim User Meeting 2021*¹⁶).

4.4.1 Configuration de la simulation

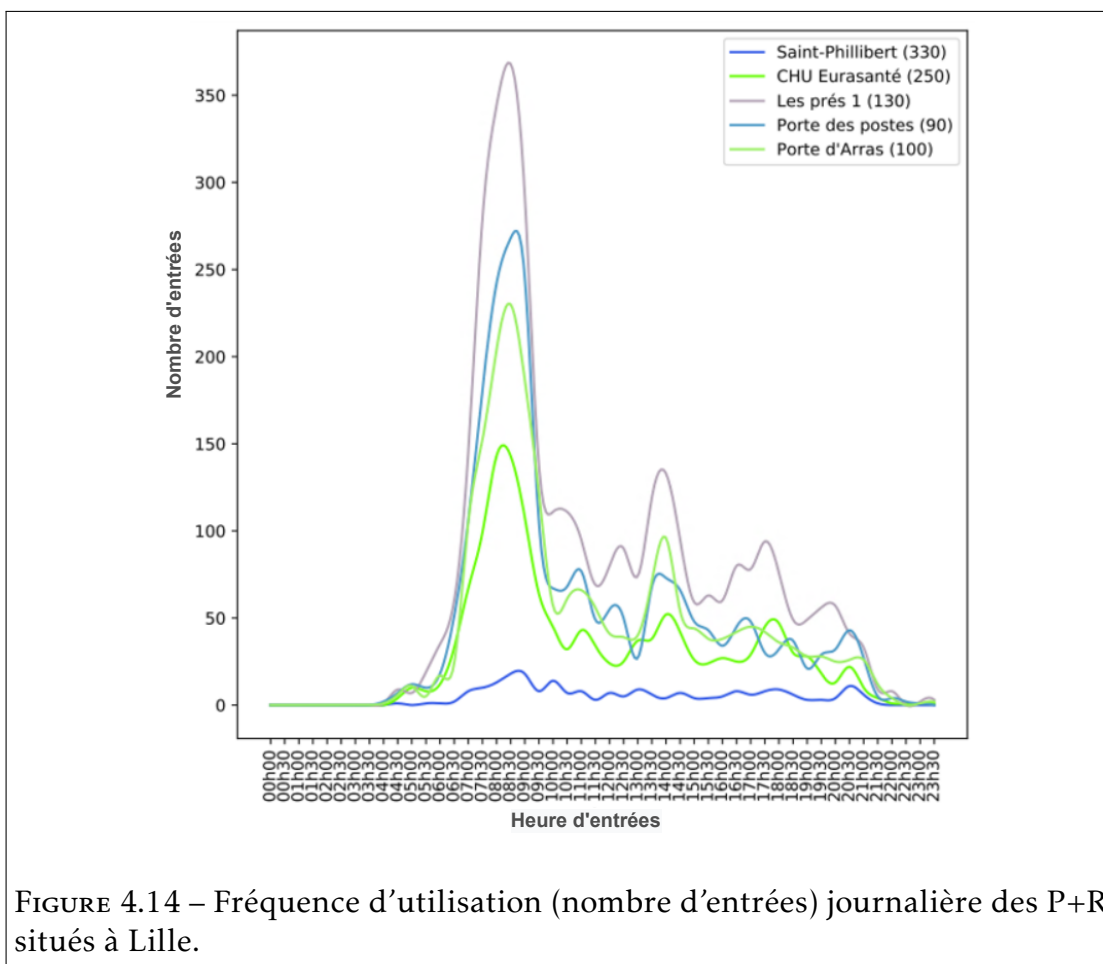
Comme spécifié ci-dessus, nous avons utilisé 20% de la population de la MEL pour la génération de la demande de transport. Les résultats présentés ici sont basés sur des données de sortie redressées à 100% pour correspondre à la

16. <https://www.ivt.ethz.ch/en/info/news/2021/03/22-matsim-user-meeting.html>

population réelle de la MEL. Pour rappel, la Figure 3.11 donne un aperçu de la localisation des 12 P+R dans la MEL.

4.4.2 Résultats

La Figure 4.14 présente la fréquence d'utilisation (nombre d'entrées) journalière des P+R dans la ville de Lille. Ces chiffres informent sur les départs (déplacements commençant par la voiture personnelle). La période d'utilisation est en abscisse et le nombre d'entrées des P+R est en ordonnée. La capacité de chaque P+R est fournie en parenthèses pour donner une idée du taux de remplissage.



On observe une forte affluence dans les P+R pendant les heures de pointe (p.

ex., entre 5h30 et 9h00), ce qui semble intuitivement cohérent. Les parkings relais situés dans la zone lilloise sont les plus fréquentés. Cette affluence s'explique principalement par le flux des déplacements à destination de Lille, lequel est le plus important dans la MEL (30% des déplacements).

Une question que nous nous sommes posée est de savoir si les P+R étaient bien dimensionnés pour absorber le flux de voitures. Nous avons donc autorisé le dépassement de capacité maximale des parkings relais pour étudier ce phénomène. Le Tableau 4.5 renseigne sur le nombre d'entrées des P+R entre 5h30 et 09h00 du matin dans le sens du départ. Les parkings relais (P+R) en gras dans le

TABLEAU 4.5 – Nombre d'entrées cumulées des 12 parkings relais (P+R) de la MEL entre 5h30 et 09h00 du matin.

| Parkings relais | Nombre d'entrées |
|--------------------------|------------------|
| Saint Philibert | 100 |
| CHU - Eurasanté | 690 |
| Les Près 1 | 1370 |
| Porte des Postes | 2050 |
| Porte d'Arras | 780 |
| Gare de Tourcoing | 1560 |
| Pont de Neuville | 1390 |
| Armentières | 730 |
| Don Sainghin | 170 |
| La Bassée | 90 |
| Seclin | 130 |
| Cantons | 910 |

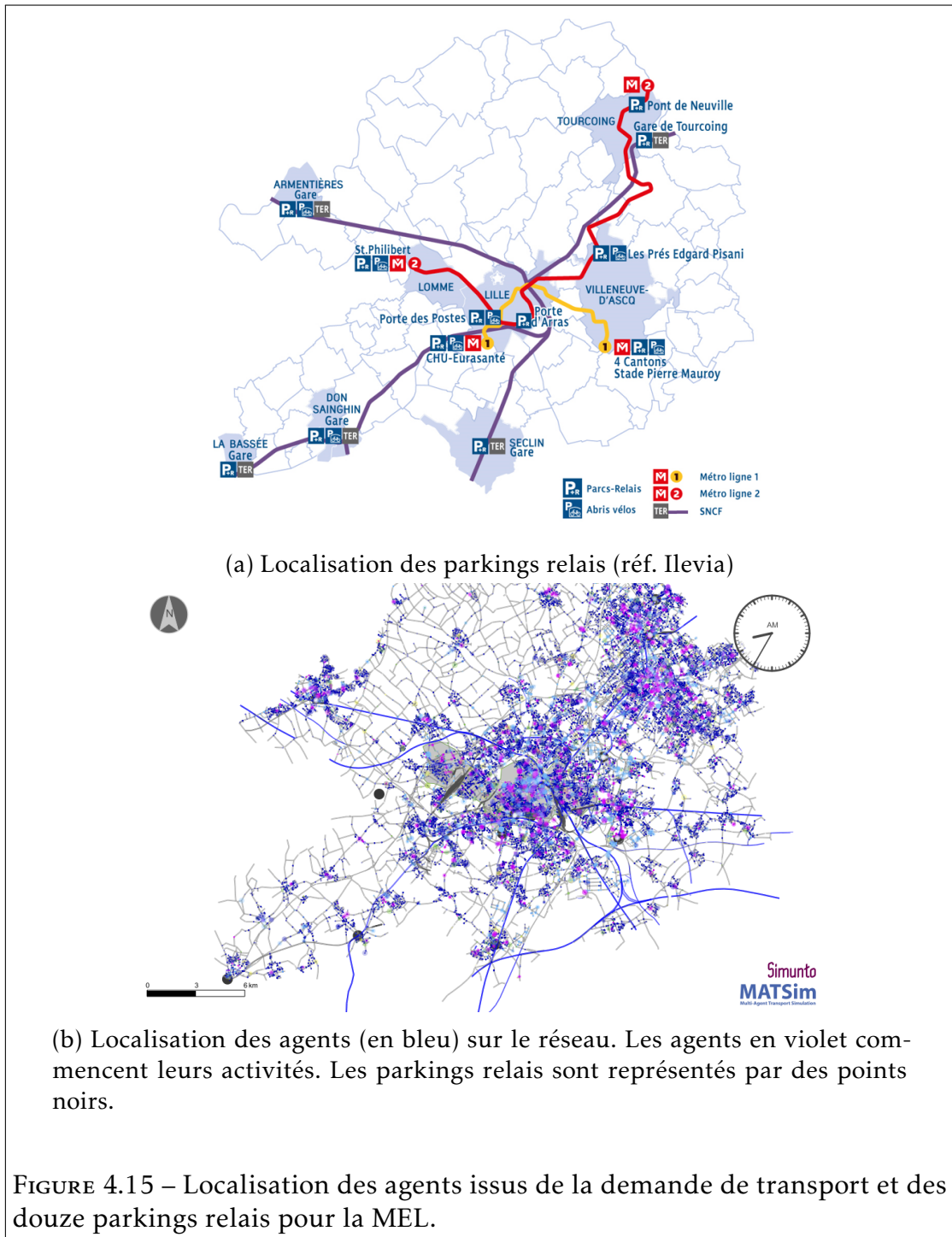
Tableau 4.5 présentent des dépassements de capacités durant la période indiquée. Par manque de données réelles sur la fréquentation des P+R, nous ne sommes pas en mesure, en l'état, de faire une comparaison entre les résultats de notre simulation et une situation réelle de cas d'utilisation journalier. Néanmoins, ces cas de dépassements peuvent s'expliquer par le nombre important d'agents à proximité de ces P+R. En effet, rappelons que le choix du P+R est fonction de celui qui est le plus proche du domicile de l'agent. Par exemple, on note une forte présence d'agents dans le voisinage des P+R **Gare de Tourcoing** et **Pont de**

Neuville sont situés respectivement dans les villes de Tourcoing, Roubaix et Lille qui concentrent la majeure grande partie des flux venant du Nord de la MEL. Les P+R **Porte des Postes**, **Porte d'Arras** et **Les Près 1** sont situés à la périphérie de Lille et seront donc utilisés par les usagers de ces zones périphériques.

La Figure 4.15a présente la localisation des douze parkings relais pour la MEL en détaillant leur nom et les villes dans lesquelles ils se trouvent. La Figure 4.15b donne un aperçu de la répartition des agents sur le réseau routier. On peut voir effectivement que les parkings relais les plus utilisés sont dans des zones denses (Lille, Villeneuve-d'Asq, Tourcoing). Les parkings relais comme Saint-Phillibert sont très peu utilisés au regard de la faible localisation des agents dans leur voisinage.

Nous nous sommes également intéressés aux profils des individus utilisant l'alternative VP+TP durant leurs déplacements. La Figure 4.16 présente quelques caractéristiques socio-démographiques des utilisateurs de l'intermodalité et du motif du déplacement. La grande majorité des utilisateurs du mode VP+TP ont un âge compris entre 18-54 ans. La simulation reproduit bien cette observation. Elle n'arrive pas cependant à bien reproduire la tranche d'âge des 18-24 ans. Contrairement à la situation de référence, la simulation indique que les hommes utilisent plus l'intermodalité que les femmes. Sur le plan d'occupation professionnelle, les résultats de la simulation correspondent bien avec les données de référence. On note également une cohérence entre les deux sorties sur le motif du déplacement en ce qui concerne le travail, le loisir et les autres motifs (p. ex., les visites). Le motif éducatif ne donne pas le résultat souhaité dans la simulation ; tandis que les achats comme motif de déplacement simulés dépassent ceux des données de référence.

Ces résultats de simulations de la situation actuelle correspondant en grande partie à celle des données réelles. Il peut être intéressant de voir maintenant comment les individus vont réagir face à la modification ou à l'ajout de nouvelles mesures de mobilité. Nous nous sommes intéressés dans la suite au cas d'application d'un péage urbain.



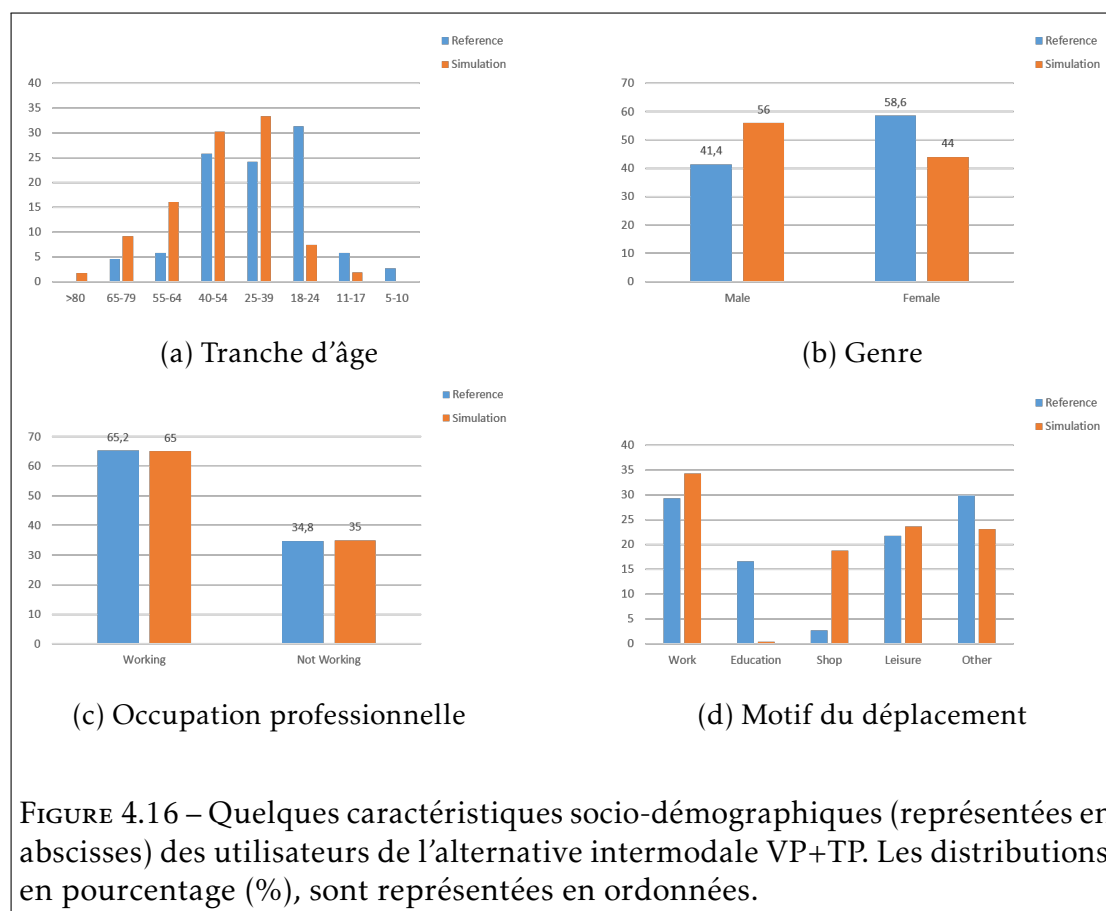


FIGURE 4.16 – Quelques caractéristiques socio-démographiques (représentées en abscisses) des utilisateurs de l’alternative intermodale VP+TP. Les distributions, en pourcentage (%), sont représentées en ordonnées.

4.5 Expérimentation du péage urbain

Le péage routier, en l’occurrence celui appliqué à l’échelle urbaine, fait partie des mesures politiques visant à réduire l’usage de la voiture personnelle dans ces zones [147, 26, 34]. Il existe différents systèmes de péage urbain en fonction de l’objectif recherché. On distingue principalement les cas suivants [107] :

- distance : ce type de péage consiste à appliquer une tarification par distance parcourue en voiture. Par exemple, pour un tarif de 1 euro/km, un conducteur qui fera 25 km, paiera 25 euros.
- tronçon de route : il s’agit dans ce cas d’appliquer un certain tarif à chaque fois qu’un tronçon (indépendamment de sa longueur) est traversé (p. ex., tunnel et pont)

- cordon : cela consiste à créer un cordon autour d'une zone donnée et d'appliquer le péage à chaque entrée et/ou sortie du périmètre délimité.
- aire : le péage est appliqué dès lors qu'une voiture circule dans la surface concernée. Il est différent du précédent (cordon) car le paiement est effectué une seule fois pour circuler dans l'aire; tandis qu'à chaque passage du cordon, un paiement peut être appliqué.

Cette section présente les premiers résultats de l'analyse de l'impact du péage urbain sur la combinaison voiture personnelle et transports publics (VP+TP).

4.5.1 Configuration de la simulation

Dans le cadre de cette étude, nous avons choisi le cas du péage zonal en considérant l'aire de la zone. La Figure 4.17 renseigne sur l'aire et la situation géographique de la zone où est appliquée le péage urbain. La zone d'application

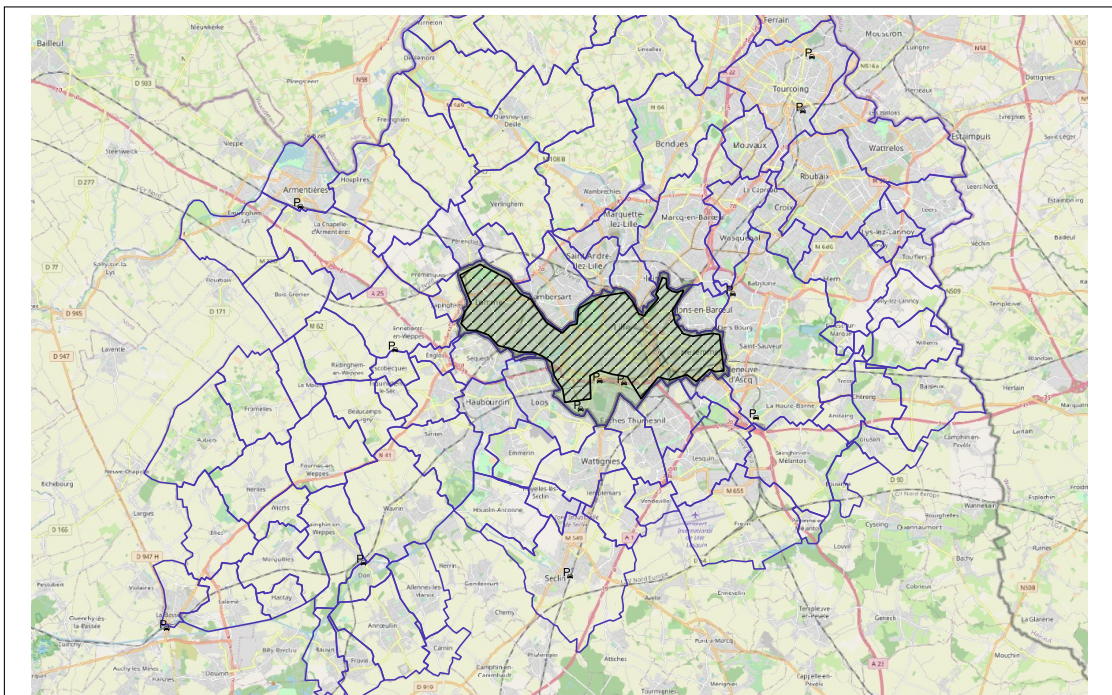


FIGURE 4.17 – Zone d'application (hachurée en trait noir) du péage urbain dans la ville de Lille de la MEL.

(hachurée en trait noir) a été définie sur le périmètre de la ville de Lille en évitant

de contenir les parkings relais aux alentours. La configuration d'application du péage urbain est définie comme suit :

- Heure d'application : toute la journée.
- Prix : variation de différents montants compris entre 2 et 25 euros pour avoir une réduction significative de la part de la voiture personnelle (10 – 20%).
- Qui : le péage s'applique à tous les déplacements en voiture dont l'origine et/ou la destination sont dans l'aire de péage.
- Intermodalité : deux cas avec ou sans l'alternative VP+TP pour analyser l'utilisation des P+R.

Pour tenir compte de l'impact du péage urbain sur le choix de la voiture personnelle, nous avons mis à jour son ancienne fonction d'utilité définie dans la section 3.2.2. La nouvelle fonction d'utilité résultante est définie par :

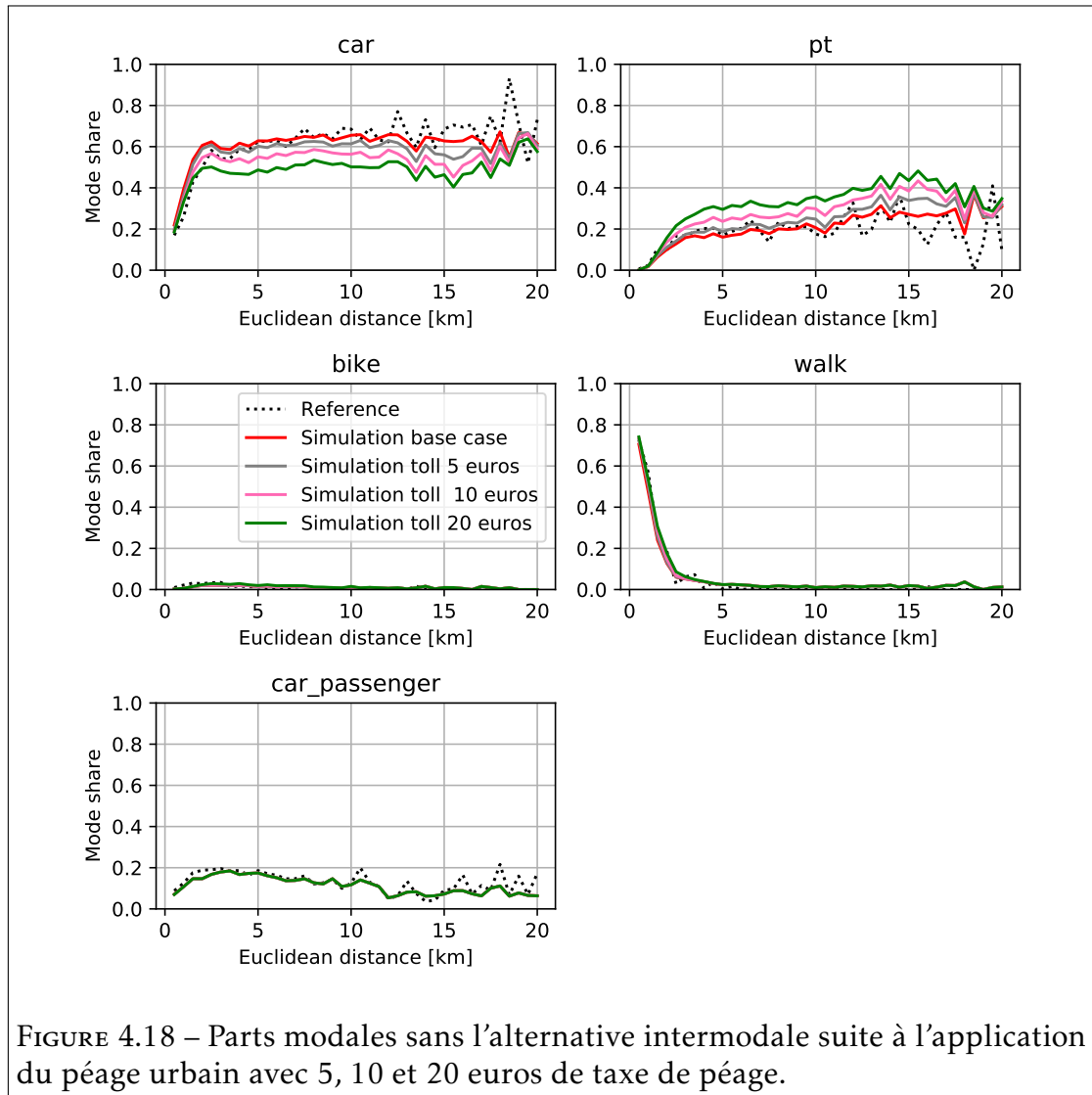
$$\begin{aligned}
 U_{i,car} = & \beta_{ASC,car} + \beta_{inVehicleTime,car} \times x_{inVehicleTime,car} \\
 & + \beta_{inVehicleTime,car} \times \theta_{parkingSearchPenalty} + \beta_{accessEgressWalkTime} \times \theta_{accessEgressWalkTime} \\
 & + \beta_{cost} \times x_{cost,car} \\
 & + \beta_{cost} \times toll_fee \times \begin{cases} 1 & \text{if si le déplacement est dans la zone de péage} \\ 0 & \text{else} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Où $toll_fee$ est la taxe de péage urbain.

4.5.2 Résultats

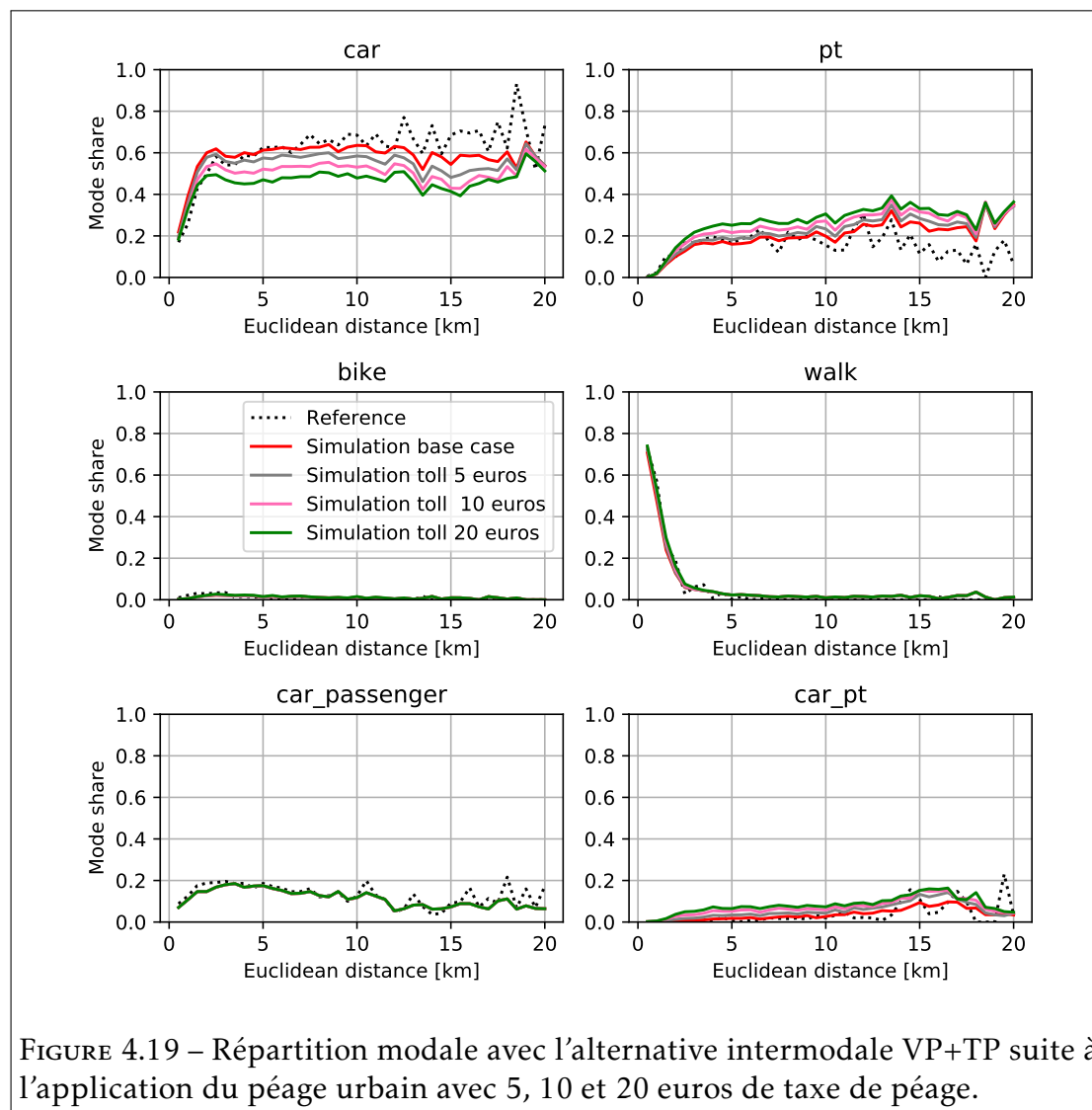
Deux expérimentations ont été réalisées pour étudier l'impact du péage urbain sur la réduction de l'usage de la voiture personnelle (VP) en tenant compte de l'alternative intermodale VP+TP et sans combinaison modale. Nous avons ainsi effectué plusieurs simulations en changeant à chaque fois la valeur de la taxe du péage urbain pour obtenir une réduction significative (20%) de l'utilisation de la voiture personnelle. Pour obtenir cet objectif, nous avons trouvé qu'il faut appliquer une taxe de 20 euros. La Figure 4.18 présente les résultats

(parts modales) de la simulation sans l'alternative VP+TP avec 5, 10 et 20 euros de taxe de péage : la situation de référence (EMD 2016) en pointillé, la simulation sans le péage urbain en rouge et avec l'application du péage : gris, rose et vert pour respectivement 5, 10 et 20 euros). On voit clairement l'effet du péage urbain



sur le changement de mode de transport en laissant la voiture personnelle au profit des TP (10% d'augmentation). Cette réduction atteint même presque les 20% pour les grandes distances. On note également une légère augmentation de la marche notamment pour les déplacements à partir de 2 km.

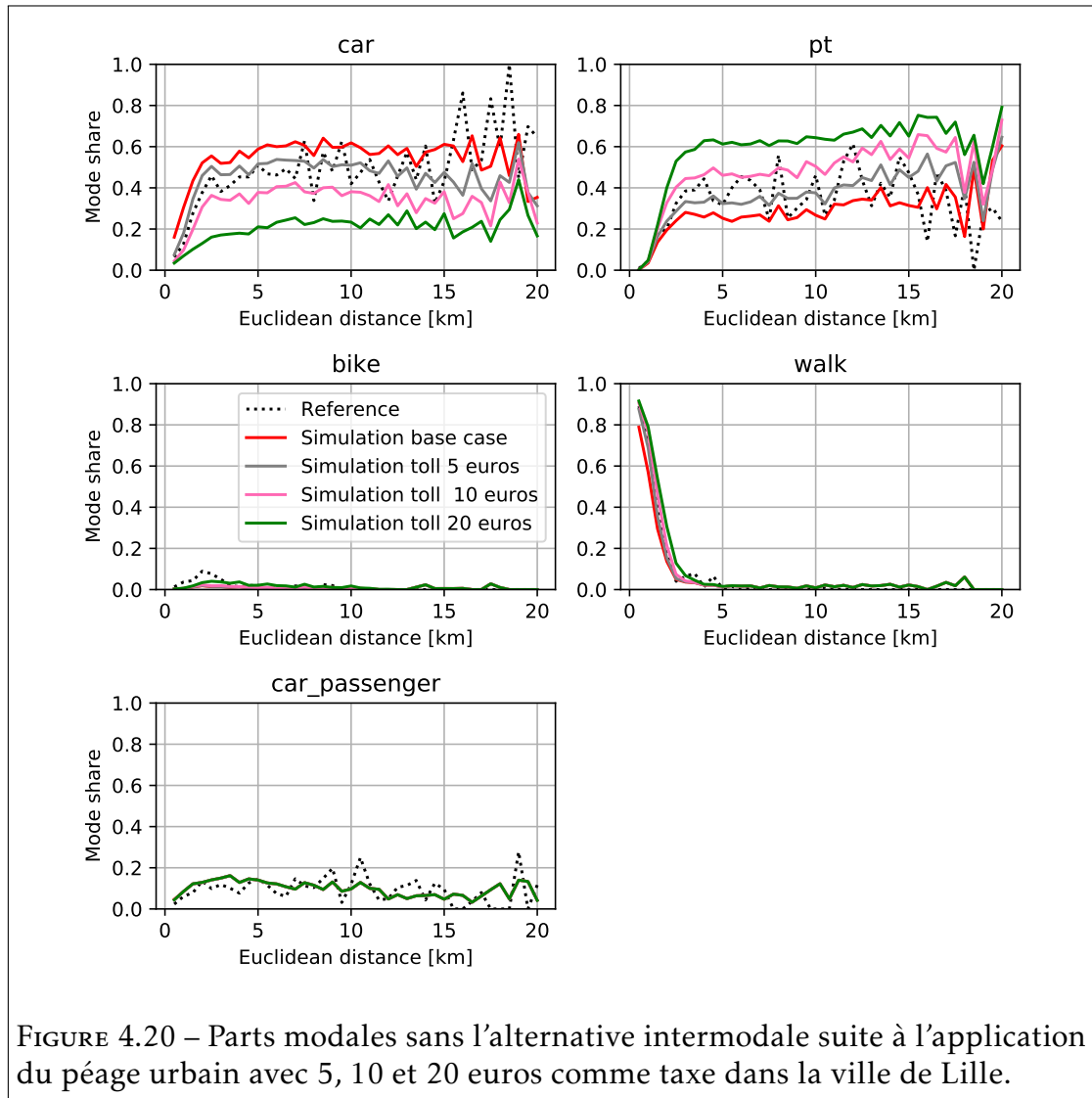
La répartition modale issue de la simulation avec l'alternative intermodale VP+TP est présentée à la Figure 4.19. Avec la possibilité de combiner la voiture



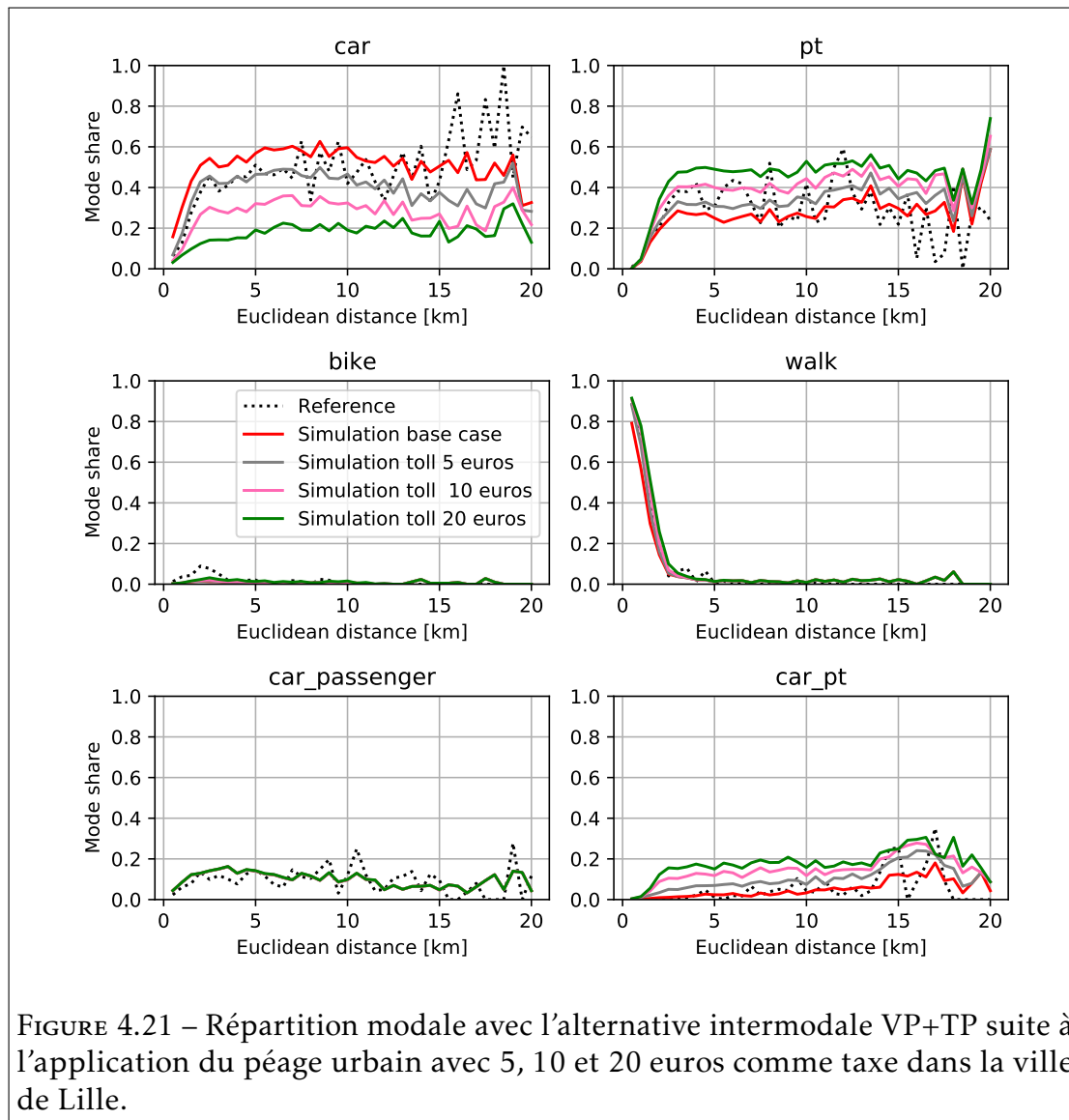
et les TP, la part d'augmentation des transports publics diminue de moitié au profit de l'alternative intermodale (5% d'augmentation). Cette possibilité de déplacement est donc plus « utile » pour les usagers que d'utiliser simplement les TP.

Vu de manière globale, le report modal sur les petites distances (moins de 3 km) n'est pas très visible. Une analyse plus fine à l'échelle de la ville de

Lille permet de mieux saisir ce comportement sur les déplacements effectués en voiture à l'intérieur de la ville. Les Figures 4.20 et 4.21 présentent respectivement les distributions modales sans l'alternative intermodale VP+TP et en tenant compte de cette combinaison. L'impact du péage urbain à l'échelle de la ville de



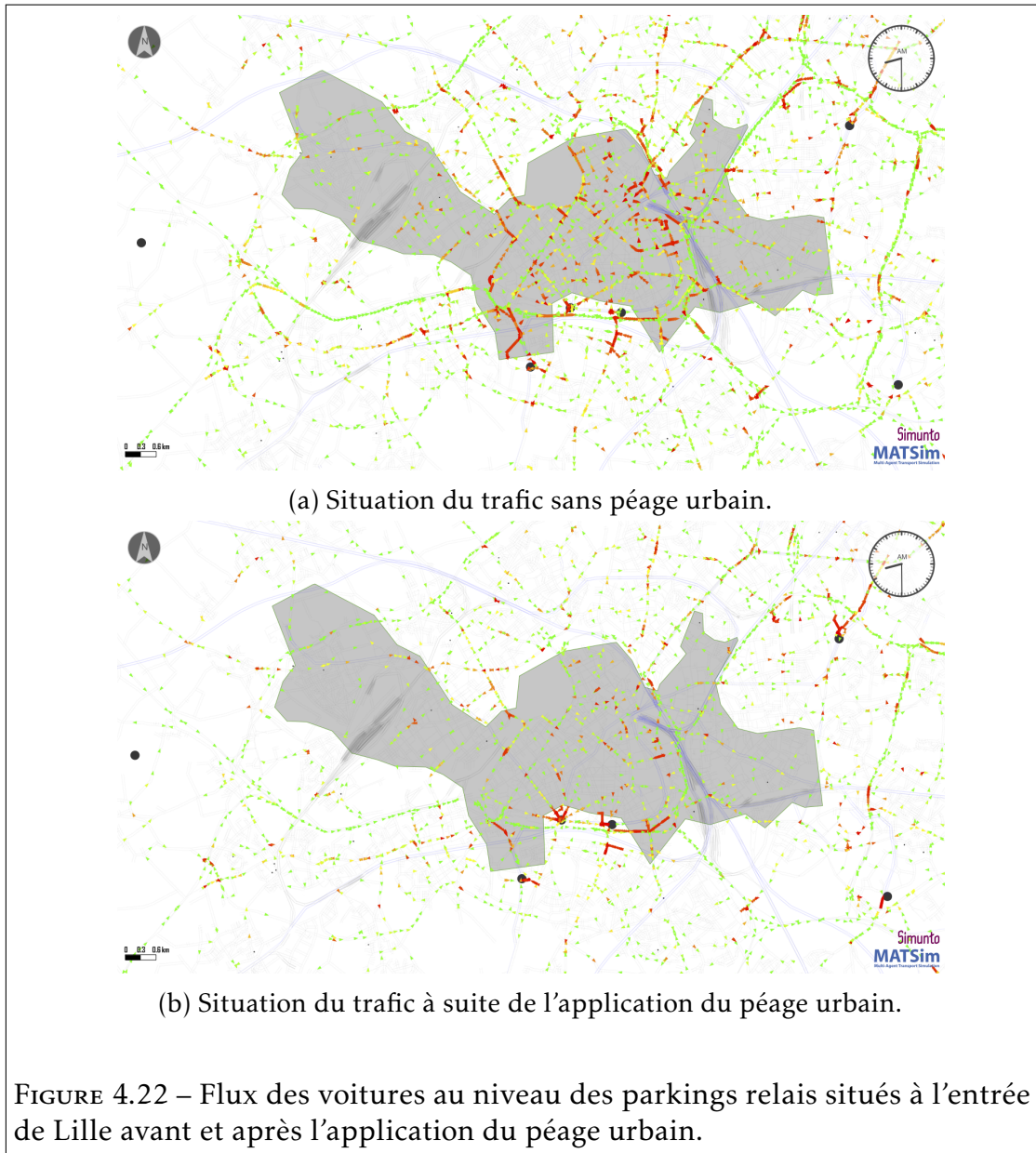
Lille est nettement plus saisisant. On note une baisse de 50% de l'utilisation de la voiture personnelle dans la ville au profit des modes plus doux (marche, vélo et transports publics) (Figure 4.20). La marche atteint même 50% d'augmentation pour les distances de moins de 3 km. Les déplacements à vélo augmentent entre



les distances comprises entre 2,5 et 4 km. La part modale des transports publics (TP) augmente près de 75% pour les déplacements de plus de 5 km dans la ville.

L'intégration de l'alternative intermodale VP+TP offre un moyen de déplacement plus attractif pour les agents (usagers) en cas d'application du péage urbain. En effet, cette combinaison permet aux usagers en destination de Lille de garer leur voiture dans les parkings relais (P+R) et de prendre ensuite les transports publics pour entrer dans la ville. De ce fait, ils évitent le paiement

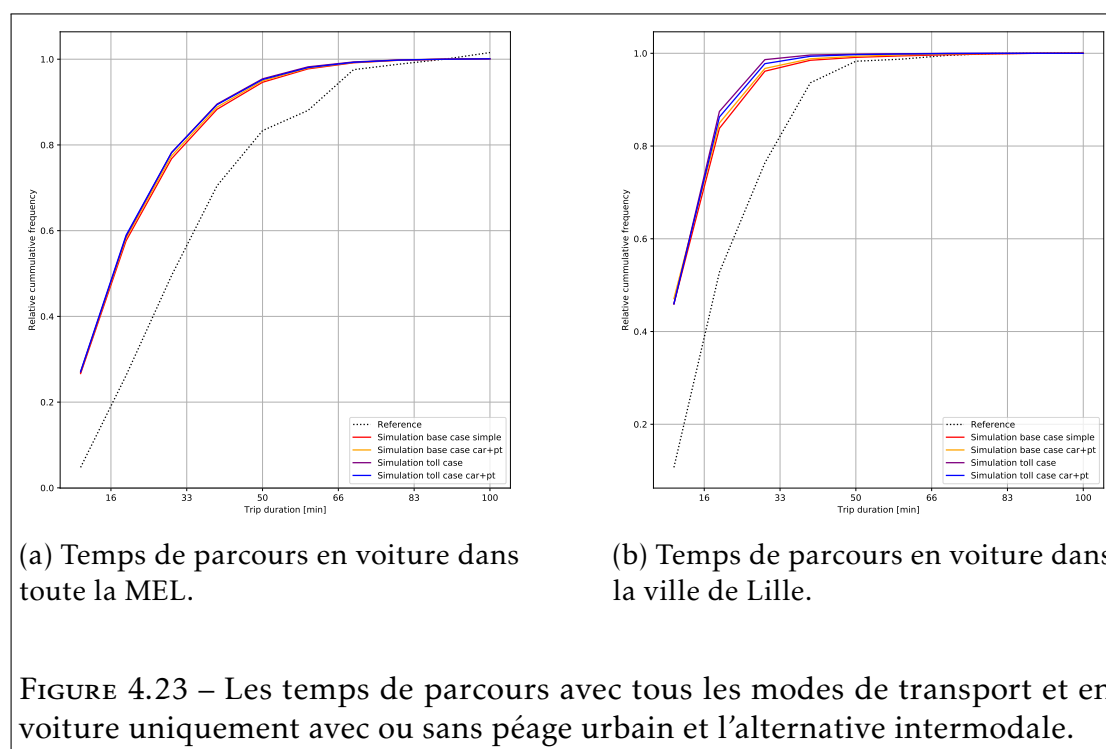
de la taxe de péage. Ce phénomène est visible à travers le flux de voitures au niveau des parkings relais situés à l'entrée de la ville notamment Porte d'Arras, Porte des postes, CHU - Eurasanté et Les Près 1. La Figure 4.22 donne un aperçu de cette affluence à partir de 08h30 du matin. Les voitures en rouge sont en



situation de congestion c'est-à-dire qu'elles progressent très lentement. Celles en jaune également circulent à des vitesses moins importantes comparativement

à une situation où le trafic est fluide (voitures en vert). On peut voir l'impact du péage urbain sur les flux de voitures à l'intérieur de la ville de Lille (Figure 4.22b). Le nombre de voitures a baissé considérablement comparativement à la situation sans péage urbain (Figure 4.22a).

Nous avons également analysé les durées de déplacement en voiture en cas d'application du péage urbain. La Figure 4.23 présente les temps de parcours en voiture respectivement dans toute la MEL (Figure 4.23a) et à Lille (Figure 4.23b). Il ressort que les temps de parcours issus de la simulation restent assez



proches indépendamment de l'application ou non du péage urbain que ce soit aussi avec ou sans l'alternative intermodale. On note cependant une légère augmentation pour les temps de parcours suite à l'application du péage urbain pour les déplacements de 20 min à 50 min. Cette augmentation peut s'expliquer par le fait que les usagers vont passer plus de temps en voiture pour rejoindre le parking relais le plus proche de leur domicile pour éviter le péage urbain. Ainsi, on peut dire que le temps du déplacement n'a pas eu autant d'effet sur le choix modal que le paramètre lié au coût (avec l'application de la taxe de

péage). Ce résultat peut traduire une certaine cohérence dans les comportements de déplacement où l'aspect financier est très décisif sur le choix modal. D'une manière générale, les temps de parcours simulés sont légèrement au-dessous de ceux de la situation de référence. Comme déjà évoqué, cet écart peut provenir des temps de déplacement fournis dans l'EMD qui sont des approximations faites par les personnes enquêtées.

4.5.3 Discussion

Le système de péage routier étudié dans le présent travail, porte sur une application zonale à l'échelle de la ville de Lille. Cette stratégie a permis de réduire le trafic routier dans la ville avec une taxe de péage de 20 euros. Une stratégie similaire a été appliquée à la ville de Zurich (Suisse) [54]. Contrairement à notre approche basée sur l'aire de péage, cette étude a porté sur l'application du péage urbain à travers un cordon autour de la ville. En outre, le péage est appliqué uniquement pendant les heures de pointe (5 :30–9 :00 et 15 :30–19 :00) pour entrer et sortir de la ville. Plusieurs simulations ont été effectuées avec des montants de taxes différents pour obtenir 20% de réduction du trafic automobile dans la ville. Le montant retenu est de 4,07 CHF (3,80 euros).

L'inconvénient du péage zonal comparativement au cas du cordon, est que les flux de voitures traversant l'aire ne sont pas pris en compte. Or, l'objectif principal du péage est de réduire ou de limiter ce type de déplacements dans la ville en faisant des routes de contournement. Un autre point non traité dans le cadre de notre thèse est l'acceptabilité de telles mesures par les individus en fonction notamment de leurs revenus [84, 123]. Nous avons vu par exemple la crise des gilets jaunes à la suite de l'augmentation des taxes sur le carburant. Il est donc important de trouver le juste milieu entre l'application de ces mesures et les catégories d'individus. La prise en compte des revenus ou des catégories socio-professionnelles des individus dans les fonctions d'utilité permettra de résoudre ce problème. Cette redéfinition des utilités des alternatives fait appel à des connaissances approfondies en Economie des transports, et pourrait être une perspective pour l'amélioration de notre proposition.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des différents scénarios de simulation. Nous avons présenté dans un premier temps une description de la zone d'étude qui a porté sur la Métropole Européenne de Lille (MEL). La MEL est composée de 95 communes dont les principales sont Lille, Roubaix et Tourcoing. Elle dispose également d'une offre de transport riche composée de métro, tram, bus, vélo en libre service et 12 parkings relais pour plus de 5 000 places de stationnement. La MEL a réalisé une enquête ménages déplacements (EMD) en 2016 qui a permis d'avoir des informations récentes sur la pratique de mobilité de sa population.

Le chapitre a ensuite présenté les valeurs des paramètres des modèles de choix discret. Deux modèles ont été estimés. Un modèle *multinomial logit* (MNL) simple (SI-MNL) et un modèle *nested logit* (NL) considérant les TP comme un nid (SI-NL). Les valeurs des paramètres des deux modèles sont identiques avec une légère augmentation des termes d'erreurs pour le deuxième modèle.

Pour effectuer les simulations, nous avons généré une demande de transport correspondant à 20% de la population réelle de la MEL. Nous avons ainsi ajusté le réseau routier pour tenir compte du sous échantillonnage. Pour chaque simulation, nous avons effectué 100 itérations. 20% des agents avaient la possibilité de changer de modes de transport durant les 90 premières itérations. Les 10 dernières étaient sans ré-planification pour permettre de stabiliser la simulation.

Pour calibrer la simulation, nous avons tenu compte des parts modales, des distances et durées des parcours des sorties de la simulation par rapport à la situation de référence (EMD). Les valeurs des paramètres du modèle de choix discret étaient ajustées manuellement pour correspondre à la situation réelle.

A la suite de cette phase de calibration, deux scénarios ont été analysés : l'évaluation des P+R et l'étude de l'impact des péages urbains sur le report modal des voitures personnelles. Les résultats obtenus des différents cas de simulations (reproduction de la situation de référence et application du péage urbain) sont assez cohérents traduisant aussi une part de réalisme dans le comportement des individus durant leurs déplacements. Ils montrent surtout que les usagers de la voiture personnelle ne sont pas totalement insensibles aux mesures visant à

réduire leur utilisation dans les centres urbains.

Conclusion générale et perspectives

Bilan

Dans cette thèse, nous proposons d'étudier sous l'angle de la simulation multi-agent les comportements de déplacements intermodaux de la population. Le but étant de fournir un cadre de simulation pour adresser les politiques d'intermodalité à différentes échelles (p. ex. communes, métropole ou région).

Nous avons effectué au chapitre 1 une première analyse générale sur l'intermodalité, ses bienfaits et les mesures d'accompagnement de cette pratique. Nous n'avons pas trouvé une définition consensuelle de l'intermodalité. Cependant, le point commun des définitions est la **combinaison de différents modes au cours d'un même déplacement (voyage)**. L'intermodalité permettrait de réduire les conséquences négatives des systèmes de transport à travers l'utilisation des transports publics (TP) qui sont au coeur des systèmes de transport intermodal. En effet, une bonne offre (p. ex., service régulier, réduction de temps d'attente, facilitation des échanges de modes) de TP permettrait de réduire considérablement l'utilisation des voitures individuelles notamment dans les grands centres urbains. Nous nous sommes intéressés aux méthodes d'évaluation des politiques de mobilité. Les études qualitatives et quantitatives, et la modélisation (simulation) sont généralement les pratiques les plus courantes. On retient principalement l'adaptation des outils de simulations microscopiques en particulier basés sur l'approche multi-agent pour étudier les nouvelles formes de mobilité.

Dans le chapitre 2, nous avons présenté les notions de base sur la modélisation et la simulation en général avec une application aux systèmes de transport en particulier. Après une présentation des différents modèles (macroscopique,

mésoscopique et microscopique) de simulation, nous nous sommes focalisés sur les différentes étapes de génération d'une demande de transport multi-agent. Cette demande repose généralement sur la génération d'une population synthétique, la modélisation du choix modal à travers des modèles de choix discret et le calcul d'itinéraires pour chaque déplacement individuel. Nous avons présenté également les différentes sources de données disponibles en France pour générer un scénario de transport à base d'agents. Par la suite, nous avons réalisé une étude comparative sur les différentes plateformes génériques de simulation à base d'agents et les simulateurs de trafic. Nous avons choisi *MATSim* plus précisément *eqasim* comme étant la base pour le développement de notre outil de simulation. *MATSim* est un simulateur fondé sur les approches à base d'agents et d'activités [75]. Quant à *eqasim*, il s'agit d'une contribution de *MATSim* qui intègre un modèle de choix discret à la place du module de *scoring* pour le choix modal [70].

Le chapitre 3 a présenté notre approche méthodologique pour construire notre cadre de simulation des comportements de déplacements intermodaux. Nous montrons tout d'abord notre technique de reconstruction des informations manquantes (p. ex., les coordonnées XY des origines/destinations des déplacements, les combinaisons intermodales utilisées lors des déplacements) des sources de données utilisées pour l'estimation du choix modal et la génération de scénarios de simulation multi-agent. Notre cadre de simulation étant fondé sur *eqasim*, nous montrons par la suite les différents modèles de choix discret identifiés pour tenir compte des alternatives intermodales. Quatre modèles de types *multinomial logit* avec des deux variantes emboîtées (*nested logit*) et une imbriquée (*cross nested logit*) ont été proposés : le *SI-MNL* (modèle 1), le *SI-NL* (modèle 2), le *I-2NL* (modèle 3) et le *(I-CNL* (modèle 4). Ce chapitre a présenté également les étapes nécessaires pour intégrer les comportements de déplacements intermodaux dans *MATSim* (*eqasim*). Il s'agit notamment de la création des alternatives intermodales (nouveaux modes) et la définition de leurs contraintes d'utilisations, le routage intermodal à travers les parkings relais.

Dans le chapitre 4, nous avons présenté les résultats de simulations. Les expérimentations ont été faites sur les données de la Métropole Européenne de Lille (MEL). La MEL est une communauté d'agglomération composée de 95

communes. Elle est située au Nord de la France et compte une population de 1,2 millions en 2020. La MEL dispose d'une offre de transport très riche avec deux lignes de métro, plusieurs lignes de bus et 12 parkings relais (P+R) pour plus de 5000 places de stationnement. Une enquête de déplacements de type EMD a été réalisée en 2016 permettant d'avoir une idée plus récente sur les pratiques de mobilité. En outre, une version disponible en accès public est disponible sur le site open data de la Métropole¹⁷. Nous avons réalisé au total trois scénarios de simulation qui peuvent être résumés comme suit :

- Reconstitution de la situation de référence de la mobilité sur le territoire de la MEL. Cette étape nous a permis d'ajuster les paramètres du modèle et de vérifier sa capacité à reproduire une situation connue. Nous avons utilisé les parts modales comme indicateurs afin d'évaluer la sortie de la simulation.
- Evaluation de l'usage des parkings relais (P+R) dans les comportements de déplacements intermodaux combinant les TP et la voiture personnelle. Ce scénario est une suite de la reproduction de la situation de référence. Nous nous sommes particulièrement intéressés dans ce cas à l'analyse de l'utilisation des P+R en termes de fréquence et de capacité d'absorption du flux de déplacements. On note une cohérence entre les sorties de la simulation et l'utilisation réelle des P+R notamment dans les heures de pointe. Les P+R situés à l'entrée de Lille connaissent une forte utilisation avec souvent des dépassements de capacité pour certains parkings. Contraints par l'absence de données réelles sur l'utilisation des P+R, nous ne sommes pas en mesure de comparer les résultats de la simulation à une situation de référence. Nous avons également étudié les profils des utilisateurs et les motifs de l'intermodalité. La simulation arrive à reproduire les parts d'individus pratiquant l'intermodalité comme les groupes de personnes âgées de 18 à 54 ans.
- Étude d'une nouvelle mesure (politique) de mobilité visant à réduire l'usage de la voiture personnelle à travers un péage routier pour circuler dans la ville de Lille. Notre objectif était d'étudier la sensibilité des usa-

17. <https://opendata.lillemetropole.fr/pages/home/?flg=fr>

gers face à la mise en place d'une telle mesure. Cette étude a permis par exemple de montrer qu'avec 20 euros de taxes de péage, il était possible de réduire l'usage de la voiture personnelle de 20% dans la MEL. On note également une augmentation de la pratique intermodale véhicule privé et transports publics. Grâce à cette alternative, les individus ont la possibilité d'utiliser leur voiture durant une partie du déplacement et utiliser ensuite les transports publics pour entrer dans la ville de Lille.

Perspectives

Dans cette partie, nous présentons quelques perspectives de recherche pour compléter ou améliorer le cadre de simulation proposé.

Les données sur la pratique intermodale

Comme évoqué dans le bilan, une des limites principales de notre étude est le manque de données (d'informations) sur la pratique de l'intermodalité en France. Pour pallier ce problème, nous pensons que la réalisation d'une étude quantitative à travers une enquête de type *SP* (préférences déclarées) permettrait de recueillir ces informations. On pourrait imaginer un petit questionnaire comme dans [79] à faire dérouler sur un échantillon plus réduit que celui des enquêtes standard comme l'EMD. La disponibilité des données sur l'utilisation au niveau des pôles d'échanges (p. ex., les parkings relais) permettrait également d'avoir des informations réelles sur les pratiques des usagers combinant les TP avec les autres modes individuels notamment la voiture et le vélo. Ainsi, nous pourrions mieux évaluer notre modèle et par conséquent procéder à d'éventuelles améliorations.

Routage intermodal

Pour l'instant, nous avons considéré uniquement que la localisation des parkings relais (P+R) dans le processus de routage intermodal. Or, ces pôles d'échange sont caractérisés par différents facteurs (p. ex., coût, disponibilité des places de stationnement, qualité de l'offre de transports publics) pouvant

influencer le choix de l'individu et par ricochet le calcul d'itinéraire. Par exemple, en cas d'indisponibilité de places de stationnement dans le P+R, l'utilisateur a la possibilité i) d'attendre qu'une place se libère, ii) de chercher un autre P+R ou iii) de continuer le déplacement avec le mode individuel (Figure 4.24). En outre, le

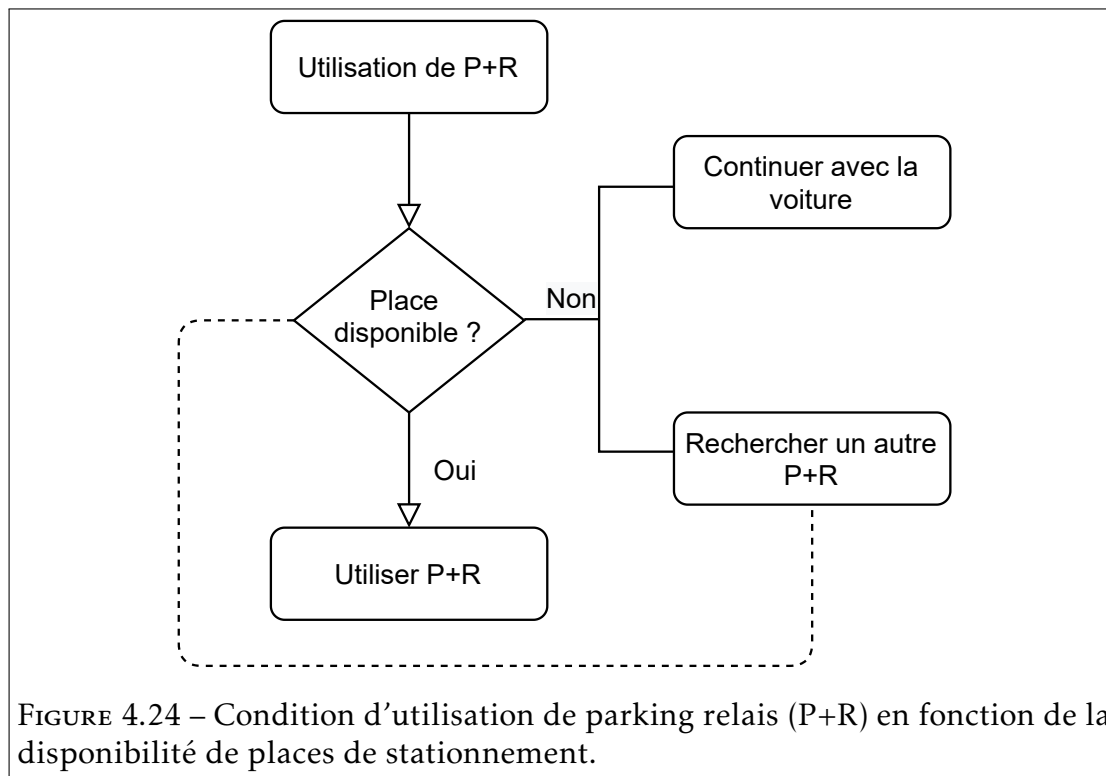


FIGURE 4.24 – Condition d'utilisation de parking relais (P+R) en fonction de la disponibilité de places de stationnement.

choix du P+R le plus proche du domicile n'est pas toujours vérifié. Un individu peut choisir le P+R le plus proche de la destination pour éviter justement de passer plus de temps dans les TP. Un autre peut choisir le P+R offrant le meilleur service en termes de transports publics (p. ex., temps d'attente très faible, plusieurs offres de TP comme le métro ou le bus). Ainsi pour tenir compte de ces facteurs, on peut construire un modèle de choix discret comme pour l'estimation du choix modal. Ce modèle permettra de saisir les comportements relatifs à l'utilisation des parkings relais. Si la construction d'un tel modèle est relativement simple, la disponibilité des données pour estimer les paramètres du modèle reste problématique.

Généralisation de la combinaison intermodale

Le présent travail s'est focalisé pour l'instant sur la combinaison des transports publics avec la voiture personnelle (VP+TP). Une perspective intéressante serait de généraliser la solution pour s'adapter à d'autres cas d'utilisation comme l'utilisation de taxis ou navettes autonomes pour les liaisons du dernier kilomètre. La combinaison du vélo et des TP est également une alternative intéressante surtout avec le développement des services de vélo ou trottinettes en libre-service. Fondamentalement, on garde la même approche de routage intermodal, juste la manière de simuler (utiliser) les modes individuels avant et après l'accès aux transports publics est différente. Pour ce faire, il faudrait :

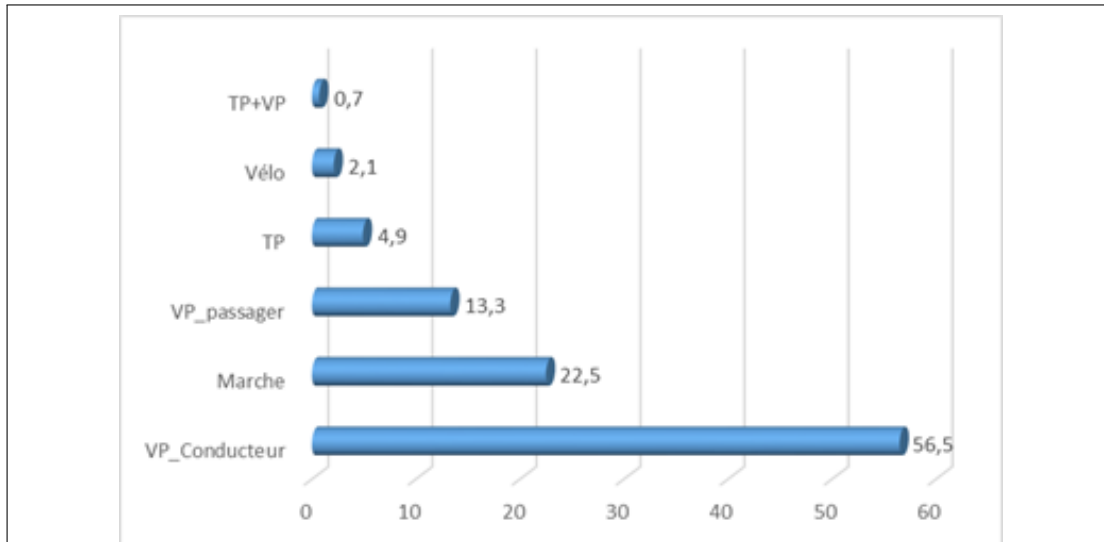
- fournir une infrastructure pour définir ces nouvelles combinaisons (modes intermodaux);
- fournir les outils pour définir les contraintes de continuité de manière judicieuse et des interfaces pour décider où les individus échangent entre un mode et un autre.

Mise à l'échelle

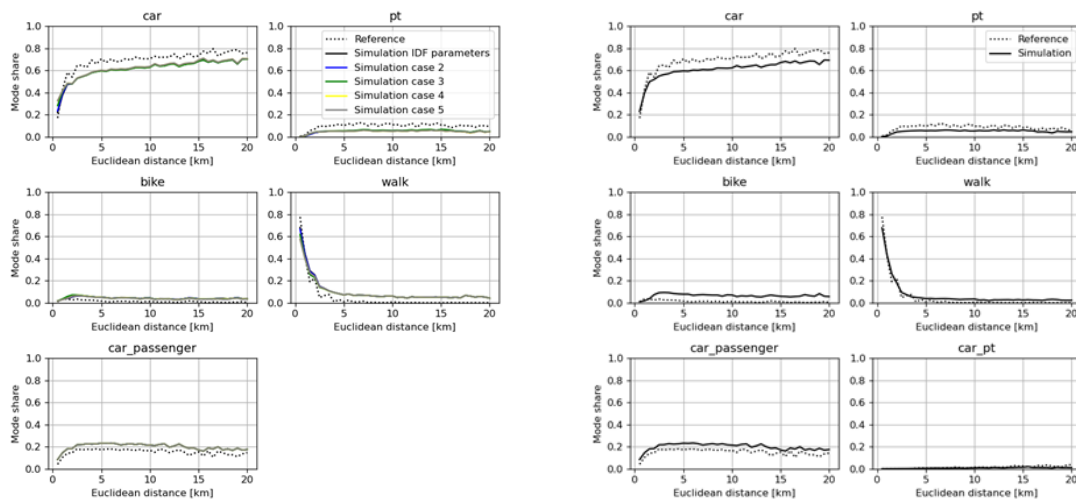
Une autre forme d'intermodalité qui peut être très intéressante à étudier est la combinaison des voitures personnelles avec les trains notamment ceux du Transport express régional (TER). Nous avons effectué une première analyse de cette combinaison à l'échelle de la Région Hauts-de-France. Ce travail a fait l'objet d'une communication orale aux 3èmes Rencontres Francophones Transports et Mobilités (RFTM) de 2021.

Nous avons considéré les gares de train comme les points d'échange entre la voiture et les TP. Nous avons répertorié dans la simulation plus de 300 gares et les 12 parkings relais de la MEL. La demande de transport *MATSim* générée dans cette étude représente un échantillon de 10% de la population réelle ce qui correspond à 1 829 978 déplacements. Cette demande est fondée sur la dernière enquête régionale mobilité et déplacements (ERMD) réalisée en 2016. 20% des agents sont autorisés à effectuer le changement modal. La Figure 4.25 présente quelques sorties de simulation correspondant aux parts modales des différentes

alternatives pour différentes valeurs des paramètres du choix modal issues de notre modèle *SI-MNL* appliqué à la MEL. Globalement, la simulation arrive à



(a) Parts modales dans les Hauts-de-France selon ERMD 2016.



(b) Situation sans prise en compte de l'alternative intermodale VP+TP.

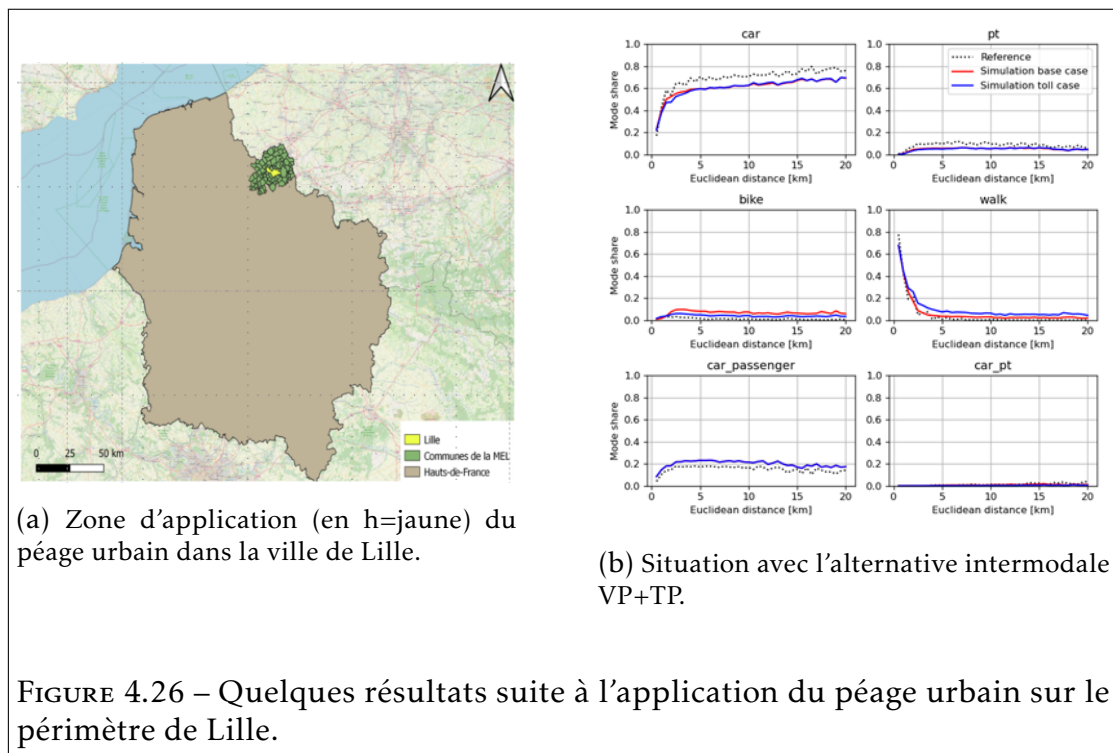
(c) Situation avec l'alternative intermodale VP+TP.

FIGURE 4.25 – Quelques résultats de la phase de calibration pour différentes valeurs des paramètres du choix modal.

reproduire les tendances dans les distributions des parts modales. L'utilisation

de la voiture et des TP dans la simulation reste inférieure à la situation de référence.

La Figure 4.26 présente les résultats suite à l'application du péage urbain sur le périmètre de Lille. La Figure 4.26a renseigne sur l'aire et la situation géographique de la zone où est appliqué le péage urbain. La répartition modale issue de la simulation avec l'alternative intermodale VP+TP est présentée dans la Figure 4.26b. L'application du péage routier dans la ville de Lille a un impact



à l'échelle de la région. On peut voir une augmentation des parts d'utilisation du vélo et la marche à pied. La voiture perd quelques points sur de petites distances.

D'une manière générale, ces premiers résultats montrent une bonne capacité de notre cadre de simulation sur des échelles plus importantes comme la Région. Ce premier travail peut être plus affiné pour étudier différents scénarios comme l'installation des bornes de recharge dans les parkings relais au niveau des gares pour encourager la combinaison voiture personnelle et train. L'étude du péage urbain peut être aussi développée en utilisant des systèmes de taxation fondés

sur les cordons en cas de leur traversées pour éviter la congestion d'une zone donnée.

Publications et communications

Publications

1. Diallo A. O., Lozenguez G., Doniec A., Mandiau R. (2021, June). Usage des parkings relais dans les comportements de déplacements intermodaux : Génération de demande de population d'agents à partir de données réelles. In JFSMA 2021 : 29ème Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents.
2. Diallo A. O., Doniec A., Lozenguez G., Mandiau R. (2021). Agent-based simulation from anonymized data :An application to Lille metropolis. In Proceedings of the 12th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT).
3. Diallo A. O., Lozenguez G., Doniec A., Mandiau R. (2021). Comparative evaluation of road traffic simulators based on modeler's specifications : An application to intermodal mobility behaviors, In Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2021) - Volume 1, pages 265-272, ISBN : 978-989-758-484-8 ISSN : 2184-433X

Communications orales

1. Diallo, A.O., G. Lozenguez, A. Doniec and R. Mandiau (2021) Agent-based assessment of the use of park and ride (PR) facilities in an urban inter-modal context : An application to the Lille Metropolis, video recorded presentation at the MATSim User Meeting, online, March 2021.
2. Diallo A. O., Diop D. N. (2021). Évaluation des politiques d'intermodalité basées sur les parkings relais dans un réseau multimodal à grande échelle : Une approche basée sur les modèles multi-agents, 3èmes Rencontres Francophones Transport Mobilité (RFTM) 2021 2-4 juin 2021, Marne-la-Vallée (France).

Bibliographie

- [1] Centre d'études sur les réseaux les transports l'urbanisme et les constructions publiques (FRANCE) et MO GASCON. *L'enquête ménages, déplacements "standard Certu"*. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire, CERTU., 2008.
- [2] AIMSUN. *Aimsun Next traffic modeling software*. <https://www.aimsun.com/aimsun-next/>. [Accessed October-25th-2018]. 2018. URL : <https://www.aimsun.com/aimsun-next/>.
- [3] Sabina ALAZZAWI, Mathias HUMMEL, Pascal KORDT, Thorsten SICKENBERGER, Christian WIESEOTTE et Oliver WOHAKE. « Simulating the impact of shared, autonomous vehicles on urban mobility-a case study of Milan ». In : *SUMO User Conference*. 2018.
- [4] Gianluca ANTONINI, Michel BIERLAIRE et Mats WEBER. « Discrete choice models of pedestrian walking behavior ». In : *Transportation Research Part B : Methodological* 40.8 (2006), p. 667-687.
- [5] ANYLOGIC. *AnyLogic _ Des solutions et outils logiciels de modélisation de simulation au service des entreprises*. <https://www.anylogic.fr/>. [Accessed October-25th-2018]. 2018. URL : <https://www.anylogic.fr/>.
- [6] Robert AXELROD. « Advancing the art of simulation in the social sciences ». In : *Simulating social phenomena*. Springer, 1997, p. 21-40.
- [7] Milos BALAC, Henrik BECKER, Francesco CIARI et Kay W AXHAUSEN. « Modeling competing free-floating carsharing operators—A case study for Zurich, Switzerland ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 98 (2019), p. 101-117.
- [8] Michael BALMER. « Travel demand modeling for multi-agent transport simulations : Algorithms and systems ». Thèse de doct. ETH Zurich, 2007.
- [9] Michael BALMER, Marcel RIESER, Konrad MEISTER, David CHARYPAR, Nicolas LEFEBVRE et Kai NAGEL. « MATSim-T : Architecture and simulation times ». In : *Multi-agent systems for traffic and transportation engineering*. IGI Global, 2009, p. 57-78.

- [10] Alain BARRÉ. « Transport et aménagement urbain : l'exemple du métro dans les grandes métropoles régionales françaises ». In : *Géocarrefour* 55.3 (1980), p. 209-230.
- [11] Gustavo EAPA BATISTA, Ronaldo C PRATI et Maria Carolina MONARD. « A study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data ». In : *ACM SIGKDD explorations newsletter* 6.1 (2004), p. 20-29.
- [12] Ana LC BAZZAN et Franziska KLÜGL. « A review on agent-based technology for traffic and transportation ». In : *The Knowledge Engineering Review* 29.3 (2014), p. 375-403.
- [13] Richard J BECKMAN, Keith A BAGGERLY et Michael D MCKAY. « Creating synthetic baseline populations ». In : *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 30.6 (1996), p. 415-429.
- [14] Michael BEHRISCH, Laura BIEKER, Jakob ERDMANN et Daniel KRAJZEWICZ. « Sumo—simulation of urban mobility ». In : *The Third International Conference on Advances in System Simulation (SIMUL 2011), Barcelona, Spain*. T. 42. 2011.
- [15] Assia BELBACHIR, Amal EL FALLAH-SEGHRUCHNI, Arthur CASALS et Marcia PASIN. « Smart mobility using multi-agent system ». In : *Procedia Computer Science* 151 (2019), p. 447-454.
- [16] Richard Ernest BELLMAN. *Dynamic Programming*. USA : Dover Publications, Inc., 2003. ISBN : 0486428095.
- [17] Moshe BEN-AKIVA et Steven R LERMAN. *Discrete choice analysis : theory and application to travel demand*. Transportation Studies, 2018.
- [18] Moshe E BEN-AKIVA, Steven R LERMAN et Steven R LERMAN. *Discrete choice analysis : theory and application to travel demand*. T. 9. MIT press, 1985.
- [19] Adi BEN-ISRAEL. « A Newton-Raphson method for the solution of systems of equations ». In : *Journal of Mathematical analysis and applications* 15.2 (1966), p. 243-252.
- [20] Ernst R BERNDT, Bronwyn H HALL, Robert E HALL et Jerry A HAUSMAN. « Estimation and inference in nonlinear structural models ». In : *Annals of Economic and Social Measurement, Volume 3, number 4*. NBER, 1974, p. 653-665.
- [21] Michel BIERLAIRE. « A short introduction to PandasBiogeme ». In : (2020).
- [22] Alexandre BONHOMME, Philippe MATHIEU et Sébastien PICAULT. « Simuler le trafic routier à partir de données réelles ». In : *Revue d'Intelligence Artificielle* 30.3 (2016), p. 329-352.

- [23] Michael BRATMAN. « Intention, plans, and practical reason ». In : (1987).
- [24] HENRI BRICHE. *DUNKERQUE, «LABORATOIRE» DE LA GRATUITE DES TRANSPORTS EN COMMUN*. Rapp. tech. 2017.
- [25] Charles George BROYDEN. « The convergence of a class of double-rank minimization algorithms 1. general considerations ». In : *IMA Journal of Applied Mathematics* 6.1 (1970), p. 76-90.
- [26] Inter-Environnement BRUXELLES. *Le péage urbain aux portes de Bruxelles : la clé d'une ville humaine*. 2007.
- [27] Benjamin CAMUS, Christine BOURJOT et Vincent CHEVRIER. « Considering a multi-level model as a society of interacting models : Application to a collective motion example ». In : *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 18.3 (2015), p. 7.
- [28] Xinyu Jason CAO, Patricia L MOKHTARIAN et Susan L HANDY. « The relationship between the built environment and nonwork travel : A case study of Northern California ». In : *Transportation Research Part A : Policy and Practice* 43.5 (2009), p. 548-559.
- [29] Arthur CASALS, Assia BELBACHIR et Amal FALLAH-SEGHROUCHNI. « Adaptive and collaborative agent-based traffic regulation using behavior trees ». In : *AAMAS'20 : Proceedings of the 19th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*. 2020.
- [30] Ennio CASCETTA. *Transportation systems engineering : theory and methods*. T. 49. Springer Science & Business Media, 2013.
- [31] Ennio CASCETTA, Armando CARTENÌ, Francesca PAGLIARA et Marcello MONTANINO. « A new look at planning and designing transportation systems : A decision-making model based on cognitive rationality, stakeholder engagement and quantitative methods ». In : *Transport policy* 38 (2015), p. 27-39.
- [32] Oded CATS, Triin REIMAL et Yusak SUSILO. « Public transport pricing policy : Empirical evidence from a fare-free scheme in Tallinn, Estonia ». In : *Transportation Research Record* 2415.1 (2014), p. 89-96.
- [33] CEREMA. *Modélisation multimodale des déplacements de voyageurs Concevoir un modèle de choix modal*. Rapp. tech. Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, 2015.
- [34] Robert CERVERO. « Traffic Impacts of Variable Pricing on the San Francisco-Oakland Bay Bridge, California ». In : *Transportation research record* 2278.1 (2012), p. 145-152.

- [35] Walid CHAKER et Bernard MOULIN. « Forecasting Travel Supply and Demand by Modeling Multiscale Urban Environments ». In : *Transportation Research Record* 2064.1 (2008), p. 65-72.
- [36] Kevin CHAPUIS et Patrick TAILLANDIER. « A brief review of synthetic population generation practices in agent-based social simulation ». In : *submitted to SSC2019, Social Simulation Conference*. 2019.
- [37] Nitesh V CHAWLA, Kevin W BOWYER, Lawrence O HALL et W Philip KEGELMEYER. « SMOTE : synthetic minority over-sampling technique ». In : *Journal of artificial intelligence research* 16 (2002), p. 321-357.
- [38] Daniel CHEMLA, Frédéric MEUNIER, Thomas PRADEAU, Roberto Wolfler CALVO et Houssame YAHIAOUI. « Self-service bike sharing systems : simulation, repositioning, pricing ». In : (2013).
- [39] Vincent CHEVRIER, Jean-Baptiste WIART et Thomas PARIS. « Agents et Simulation ». In : *JFMS 2020-Journée Française de la Modélisation et Simulation*. 2020.
- [40] Jean COLARD, Benoît de LAPASSE et Cécile CLÉMENT. *Mobilités dans les espaces périphériques et peu denses : pour un territoire plus accessible?* Rapp. tech. 2019.
- [41] S.G. DACKO et C. SPALTEHOLZ. « Upgrading the city : Enabling intermodal travel behaviour ». In : *Technological Forecasting and Social Change* 89 (2014), p. 222-235.
- [42] Daniel DELLING, Thomas PAJOR et Renato F WERNECK. « Round-based public transit routing ». In : *Transportation Science* 49.3 (2015), p. 591-604.
- [43] W Edwards DEMING et Frederick F STEPHAN. « On a least squares adjustment of a sampled frequency table when the expected marginal totals are known ». In : *The Annals of Mathematical Statistics* 11.4 (1940), p. 427-444.
- [44] Azise Oumar DIALLO, Arnaud DONIEC, Guillaume LOZENGUEZ et René MANDIAU. « Agent-based simulation from anonymized data : An application to Lille metropolis ». In : *Proceedings of the 12th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT)*. 2021.
- [45] Azise Oumar DIALLO, Lozenguez GUILLAUME, Arnaud DONIEC et René MANDIAU. « Usage des parkings relais dans les comportements de déplacements intermodaux : Génération de demande de population d'agents à partir de données réelles ». In : *JFSMA*. 2021.

- [46] Azise Oumar DIALLO, Guillaume LOZENGUEZ, Arnaud DONIEC et René MANDIAU. « Comparative evaluation of road traffic simulators based on modeler's specifications : An application to intermodal mobility behaviors ». In : *Proceedings of the 13th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART)*. T. 1. 2021, p. 265-272.
- [47] Arnaud DONIEC, René MANDIAU, Sylvain PIECHOWIAK et Stéphane ESPIÉ. « A behavioral multi-agent model for road traffic simulation ». In : *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 21.8 (2008), p. 1443-1454.
- [48] Golan Ben DOR, Eran BEN-ELIA et Itzhak BENENSON. « Population Downscaling in Multi-Agent Transportation Simulations : A Review and Case Study ». In : *Simulation Modelling Practice and Theory* (2020), p. 102233.
- [49] Alexis DROGOU. « De la simulation multi-agents à la résolution collective de problèmes ». Thèse de doct. Thesis at University of Paris IV, 1993.
- [50] Elenna R DUGUNDJI et Joan L WALKER. « Discrete choice with social and spatial network interdependencies : an empirical example using mixed generalized extreme value models with field and panel effects ». In : *Transportation Research Record* 1921.1 (2005), p. 70-78.
- [51] Paolo M EJERCITO, Kristine Gayle E NEBRIJA, Rommel P FERIA et Ligaya Leah LARA-FIGUEROA. « Traffic simulation software review ». In : *Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), 2017 8th International Conference on*. IEEE. 2017, p. 1-4.
- [52] Stéphane ESPIÉ et Jean Michel AUBERLET. « ARCHISIM : A behavioral multi-actors traffic simulation model for the study of a traffic system including ITS aspects ». In : *International Journal of ITS Research* n1 (2007), p7-16.
- [53] Commission des communautés EUROPÉENNES. *Intermodalité et transport intermodal de marchandises dans l'union européenne, Communication de la Commission, COM(97) 243 final, Bruxelles*. Rapp. tech. 1997.
- [54] Lucas Meyer de FREITAS, Oliver SCHUEMPERLIN et Milos BALAC. « Road pricing : An analysis of equity effects with MATSim ». In : *Proceedings of the 16th Swiss Transport Research Conference, Ascona, Switzerland*. 2016, p. 18-20.
- [55] Hideki FUJII, Hideaki UCHIDA et Shinobu YOSHIMURA. « Agent-based simulation framework for mixed traffic of cars, pedestrians and trams ». In : *Transportation research part C : emerging technologies* 85 (2017), p. 234-248.
- [56] Laura GEBHARDT, Daniel KRAJZEWICZ et Rebekka OOSTENDORP. « Intermodality—key to a more efficient urban transport system? » In : *Proceedings of the 2017 ecee summer study* (2017), p. 759-769.

- [57] Nesrine GHARIANI, Sabeur ELKOSANTINI, Saber DARMOUL et Lamjed Ben SAID. « A survey of simulation platforms for the assessment of public transport control systems ». In : *Advanced Logistics and Transport (ICALT), 2014 International Conference on*. IEEE. 2014, p. 85-90.
- [58] James J GIBSON. « The theory of affordances ». In : *Hilldale, USA 1.2* (1977).
- [59] Nigel GILBERT et Klaus TROITZSCH. *Simulation for the social scientist*. McGraw-Hill Education (UK), 2005.
- [60] Konstadinos G GOULIAS, Ram M PENDYALA et Ryuichi KITAMURA. « Practical method for the estimation of trip generation and trip chaining ». In : (1990).
- [61] Arnaud GRIGNARD, Luis ALONSO, Patrick TAILLANDIER, Benoit GAUDOU, Tri NGUYEN-HUU, Wolfgang GRUEL et Kent LARSON. « The Impact of New Mobility Modes on a City : A Generic Approach Using ABM ». In : *International Conference on Complex Systems*. Springer. 2018, p. 272-280.
- [62] Arnaud GRIGNARD, Patrick TAILLANDIER, Benoit GAUDOU, Duc An VO, Nghi Quang HUYNH et Alexis DROGOU. « GAMA 1.6 : Advancing the art of complex agent-based modeling and simulation ». In : *International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems*. Springer. 2013, p. 117-131.
- [63] PTV GROUP. *Planification du trafic et de la simulation du trafic sur*. <http://vision-traffic.ptvgroup.com/fr/accueil/>. [Accessed October-25th-2018]. 2018. URL : <http://vision-traffic.ptvgroup.com/fr/accueil/>.
- [64] Davide Andrea GUASTELLA, Valérie CAMPSS et Marie-Pierre GLEIZES. « A Cooperative Multi-Agent System for Crowd Sensing Based Estimation in Smart Cities ». In : *IEEE Access* 8 (2020), p. 183051-183070.
- [65] Tristan GUILLOUX, Mathieu RABAUD et Cyprien RICHER. *De l'enquête-ménage aux enquêtes-déplacements : comment l'action publique a fait évoluer ses instruments d'évaluation*. 2015.
- [66] Stephan HARTMANN et Roman FRIGG. « Scientific Models ». In : *The Philosophy of Science : An Encyclopedia, Vol. 2*. Sous la dir. de Sarkar SAHOTRA. Routledge, 2005.
- [67] Raphael HASLEBACHER. « Intermodal Routing in MATSim Applied to SBB Green Class ». Mém. de mast. IVT, ETH Zurich, 2018.
- [68] Dirk HELBING et Benno TILCH. « Generalized force model of traffic dynamics ». In : *Physical review E* 58.1 (1998), p. 133.

- [69] Stephane HESS et John W POLAK. « An analysis of parking behaviour using discrete choice models calibrated on SP datasets ». In : *44th Congress of the European Regional Science Association : "Regions and Fiscal Federalism", 25th - 29th August 2004, Porto, Portugal*. Louvain-la-Neuve : European Regional Science Association (ERSA), 2004.
- [70] Sebastian HÖRL et Milos BALAC. « Introducing the eqasim pipeline : From raw data to agent-based transport simulation ». In : *Procedia Computer Science* 184 (2021), p. 712-719.
- [71] Sebastian HÖRL et Milos BALAC. « Synthetic population and travel demand for Paris and Île-de-France based on open and publicly available data ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 130 (2021), p. 103291.
- [72] Sebastian HÖRL, Milos BALAC et Kay W AXHAUSEN. « Dynamic demand estimation for an AMoD system in Paris ». In : *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. IEEE. 2019, p. 260-266.
- [73] Sebastian HÖRL, Milos BALAC et Kay W AXHAUSEN. « Pairing discrete mode choice models and agent-based transport simulation with MATSim ». In : *TRB Annual Meeting*. Transportation Research Board. 2019.
- [74] Sebastian HÖRL, Claudio RUCH, Felix BECKER, Emilio FRAZZOLI et Kay W AXHAUSEN. « Fleet operational policies for automated mobility : A simulation assessment for Zurich ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 102 (2019), p. 20-31.
- [75] Andreas HORNI, Kai NAGEL et Kay AXHAUSEN, éd. *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. London : Ubiquity Press, août 2016, p. 618. ISBN : 978-1-909188-75-4. DOI : 10.5334/baw.
- [76] Jingchen HU, Jerome P REITER et Quanli WANG. « Dirichlet process mixture models for modeling and generating synthetic versions of nested categorical data ». In : *Bayesian Analysis* 13.1 (2018), p. 183-200.
- [77] Michael HUSTON, Donald DEANGELIS et Wilfred POST. « New computer models unify ecological theory : computer simulations show that many ecological patterns can be explained by interactions among individual organisms ». In : *BioScience* 38.10 (1988), p. 682-691.
- [78] FERBER JACQUES. « Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective ». In : *InterEditions, Paris* 322 (1995).
- [79] Julia JARASS et Rebekka OOSTENDORP. « Intermodal, urban, mobil-Charakterisierung intermodaler Wege und Nutzer am Beispiel Berlin ». In : *Raumforschung und Raumordnung-Spatial Research and Planning* 75.4 (2017), p. 355-369.

- [80] Nicholas R JENNINGS et Michael WOOLDRIDGE. « Applications of intelligent agents ». In : *Agent technology*. Springer, 1998, p. 3-28.
- [81] W Brad JONES, C Richard CASSADY et Royce O BOWDEN JR. « Developing a standard definition of intermodal transportation ». In : *Transp. LJ* 27 (2000), p. 345.
- [82] Joseph KAMEL, Reza VOSOOGHI, Jakob PUCHINGER, Feirouz KSONTINI et Göknur SIRIN. « Exploring the impact of user preferences on shared autonomous vehicle modal split : A multi-agent simulation approach ». In : *Transportation Research Procedia* 37 (2019), p. 115-122.
- [83] Benjamin KICKHOFER, Daniel HOSSE, Kai TURNER et Alejandro TIRACHINIC. « Creating an open MATSim scenario from open data : The case of Santiago de Chile ». In : <http://www.vsp.tuberline.de/publication> : TU Berlin, *Transport System Planning and Transport Telematics* (2016).
- [84] Moez KILANI, Stef PROOST et Saskia VAN DER LOO. « Road pricing and public transport pricing reform in Paris : complements or substitutes? » In : *Economics of Transportation* 3.2 (2014), p. 175-187.
- [85] G. KOTUSHEVSKI et K. A. HAWICK. *A Review of Traffic Simulation Software*. Rapp. tech. CSTN-095. Albany, North Shore 102-904, Auckland, New Zealand : Computer Science, Massey University, 2009. URL : <http://www.massey.ac.nz/~kahawick/cstn/095/cstn-095.pdf>.
- [86] Daniel KRAJZEWICZ, Jakob ERDMANN, Michael BEHRISCH et Laura BIEKER. « Recent development and applications of SUMO-Simulation of Urban MObility ». In : *International Journal On Advances in Systems and Measurements* 5.3&4 (2012).
- [87] Daniel KRAJZEWICZ, Matthias HEINRICHS et Sigrun BEIGE. « Embedding intermodal mobility behavior in an agent-based demand model ». In : *Procedia computer science* 130 (2018), p. 865-871.
- [88] Feirouz KSONTINI, René MANDIAU, Zahia GUESSOUM et Stéphane ESPIÉ. « Affordance-based agent model for road traffic simulation ». In : *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems* 29.5 (2015), p. 821-849.
- [89] Alain L'HOSTIS et Thomas LEYSSENS. *Les méthodes de mesure et de représentation de l'accessibilité dans les méthodes d'évaluation des projets de transport interurbains et périurbains de voyageurs : méthode, indicateurs, applications et limites de la contactabilité*. Rapp. tech. 2012.
- [90] Emily LANCSAR, Denzil G FIEBIG et Arne RISA HOLE. « Discrete choice experiments : a guide to model specification, estimation and software ». In : *Pharmacoeconomics* 35.7 (2017), p. 697-716.

- [91] Ludovic LECLERCQ et Cécile BECARIE. *Meso lighthill-whitham and richards model designed for network applications*. Rapp. tech. 2012.
- [92] Guillaume LEMAÎTRE, Fernando NOGUEIRA et Christos K. ARIDAS. « Imbalanced-learn : A Python Toolbox to Tackle the Curse of Imbalanced Datasets in Machine Learning ». In : *Journal of Machine Learning Research* 18.17 (2017), p. 1-5. URL : <http://jmlr.org/papers/v18/16-365.html>.
- [93] Jinjian LI, Arnaud DONIEC, Jacques BOONAERT et Guillaume LOZENGUEZ. « Which traffic simulator is suitable for customized behaviors in multi-modal scenarios ». In : *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE. 2018, p. 3791-3796.
- [94] Michael James LIGHTHILL et Gerald Beresford WHITHAM. « On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads ». In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 229.1178 (1955), p. 317-345.
- [95] Pablo Alvarez LOPEZ, Michael BEHRISCH, Laura BIEKER-WALZ, Jakob ERDMANN, Yun-Pang FLÖTTERÖD, Robert HILBRICH, Leonhard LÜCKEN, Johannes RUMMEL, Peter WAGNER et Evamarie WIESSNER. « Microscopic Traffic Simulation using SUMO ». In : *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, 2018. URL : <https://elib.dlr.de/124092/>.
- [96] Jordan J LOUVIERE et David A HENSHER. « On the design and analysis of simulated choice or allocation experiments in travel choice modelling ». In : *Transportation research record* 890.1 (1982), p. 11-17.
- [97] René MANDIAU, Alexis CHAMPION, Jean-Michel AUBERLET, Stéphane ESPIÉ et Christophe KOLSKI. « Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation ». In : *Appl. Intell.* 28.2 (2008), p. 121-138.
- [98] René MANDIAU, Alexis CHAMPION, Jean-Michel AUBERLET, Stéphane ESPIÉ et Christophe KOLSKI. « Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation ». In : *Applied Intelligence* 28.2 (2008), p. 121-138.
- [99] Philippe MATHIEU, Gildas MORVAN et Sébastien PICAULT. « Multi-level agent-based simulations : Four design patterns ». In : *Simul. Model. Pract. Theory* 83 (2018), p. 51-64.
- [100] Michael G McNALLY. « The four step model ». In : *Handbook of transport modelling* 1 (2000), p. 35-41.
- [101] Michael G McNALLY et Craig R RINDT. *The activity-based approach*. Emerald Group Publishing Limited, 2007.

- [102] David MEUNIER et Emile QUINET. « Value of time estimations in cost benefit analysis : the French experience ». In : *Transportation Research Procedia* 8 (2015), p. 62-71.
- [103] Daniele Firme MIRANDA. « REVIEWING SYNTHETIC POPULATION GENERATION FOR TRANSPORTATION MODELS OVER THE DECADES ». In : ().
- [104] Kyriacos C MOUSKOS, Maria BOILE, Neville PARKER et al. *Technical solutions to overcrowded park and ride facilities*. Rapp. tech. New Jersey. Dept. of Transportation, 2007.
- [105] Kirill MÜLLER et Kay W AXHAUSEN. « Hierarchical IPF : Generating a synthetic population for Switzerland ». In : *Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung* 718 (2011).
- [106] Kirill MÜLLER et Kay W AXHAUSEN. « Population synthesis for microsimulation : State of the art ». In : *Arbeitsberichte Verkehrs-und Raumplanung* 638 (2010).
- [107] Kai NAGEL. *Road Pricing*. 2016.
- [108] Andreas NEUMANN et Michael ZILSKE. *MATSim JOSMNetwork Editor*. Technische Universität Berlin, 2018.
- [109] Claudia NOBIS. « Multimodality : facets and causes of sustainable mobility behavior ». In : *Transportation Research Record* 2010.1 (2007), p. 35-44.
- [110] Michael J NORTH, Nicholson T COLLIER, Jonathan OZIK, Eric R TATARA, Charles M MACAL, Mark BRAGEN et Pam SYDELKO. « Complex adaptive systems modeling with Repast Symphony ». In : *Complex adaptive systems modeling* 1.1 (2013), p. 1-26.
- [111] Yasushi OHKUSA et Tamie SUGAWARA. « Application of an individual-based model with real data for transportation mode and location to pandemic influenza ». In : *Journal of infection and chemotherapy* 13.6 (2007), p. 380-389.
- [112] Lourdes Diaz OLVERA, Assogba GUÉZÉRÉ, Didier PLAT et Pascal POCHE. « Intermodality in a context of poor transport integration : the case of Sub-Saharan African cities ». In : *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference*. 2014.
- [113] Rebekka OOSTENDORP et Laura GEBHARDT. « Combining means of transport as a users' strategy to optimize traveling in an urban context : empirical results on intermodal travel behavior from a survey in Berlin ». In : *Journal of Transport Geography* 71 (2018), p. 72-83.

- [114] Rebekka OOSTENDORP, Daniel KRAJZEWICZ, Laura GEBHARDT et Dirk HEINRICHS. « Intermodal mobility in cities and its contribution to accessibility ». In : *Applied Mobilities* 4.2 (2019), p. 183-199.
- [115] Jairo ORTEGA, János TÓTH, Tamás PÉTER et Sarbast MOSLEM. « An Integrated Model of Park-And-Ride Facilities for Sustainable Urban Mobility ». In : *Sustainability* 12.11 (2020), p. 4631.
- [116] Amine OTHMAN. « Simulation multi-agent de l'information des voyageurs dans les transports en commun ». Thèse de doct. Université Paris-Est, 2016.
- [117] Simon PAGEAUD. « SmartGov : architecture générique pour la co-construction de politiques urbaines basée sur l'apprentissage par renforcement multi-agent ». Thèse de doct. Université de Lyon, 2019.
- [118] Simon PAGEAUD, Véronique DESLANDRES, Salima HASSAS et Vassilissa LEHOX. « Couplage de simulations multi-agents pour la conception de politiques urbaines (présentation courte). » In : *JFSMA*. 2018, p. 211-220.
- [119] Simon PAGEAUD, Véronique DESLANDRES, Vassilissa LEHOX et Salima HASSAS. « Co-construction of adaptive public policies using SmartGov ». In : *2017 IEEE 29th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)*. IEEE. 2017, p. 1328-1335.
- [120] Xiaoshan PAN, Charles S HAN, Ken DAUBER et Kincho H LAW. « A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations ». In : *Ai & Society* 22.2 (2007), p. 113-132.
- [121] Graham PARKHURST. « Influence of bus-based park and ride facilities on users' car traffic ». In : *Transport policy* 7.2 (2000), p. 159-172.
- [122] Fabian PEDREGOSA, Gaël VAROQUAUX, Alexandre GRAMFORT, Vincent MICHEL, Bertrand THIRION, Olivier GRISEL, Mathieu BLONDEL, Peter PRETTENHOFER, Ron WEISS, Vincent DUBOURG et al. « Scikit-learn : Machine learning in Python ». In : *the Journal of machine Learning research* 12 (2011), p. 2825-2830.
- [123] Wilna du PLESSIS et Johan W JOUBERT. « Evaluating the effect of road pricing strategies in matsim, using agent-specific and income-dependent values ». In : *Proceedings of the International Conference on Computers and Industrial Engineering, CIE*. 2012, p. 525-532.
- [124] Flavio POLETTI, Patrick M BÖSCH, Francesco CIARI et Kay W AXHAUSEN. « Public transit route mapping for large-scale multimodal networks ». In : *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6.9 (2017), p. 268.

- [125] Matti PURSULA. « Simulation of traffic systems-an overview ». In : *Journal of geographic information and decision analysis* 3.1 (1999), p. 1-8.
- [126] Emile QUINET et al. *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*. Rapp. tech. HAL, 2014.
- [127] Mathieu RABAUD. « EMC² : vers une nouvelle génération d'EMD en France ». In : *MSFS 2018*. 2018.
- [128] Mathieu RABAUD et Cyprien RICHER. « (Micro)mobilités émergentes et intermodalités. L'irruption des " Engins de Déplacements Personnalisés " dans les chaînes de mobilité. » In : *Colloque de la commission de géographie des transports du CNFG : "Les mobilités émergentes. Fondements et conséquences des nouvelles pratiques de déplacement des personnes et d'acheminement des marchandises"*. Université Paul-Valéry Montpellier 3. Montpellier, France, oct. 2019. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-02318268>.
- [129] Soora RASOULI et Harry TIMMERMANS. « Activity-based models of travel demand : promises, progress and prospects ». In : *International Journal of Urban Sciences* 18.1 (2014), p. 31-60.
- [130] Paul I RICHARDS. « Shock waves on the highway ». In : *Operations research* 4.1 (1956), p. 42-51.
- [131] M RIESER, D MÉTRAILLER et J LIEBERHERR. « Adding realism and efficiency to public transportation in MATSim ». In : *Proceedings of the 18th Swiss Transport Research Conference, Ascona, Switzerland*. 2018, p. 16-18.
- [132] S RUSSELL et P NORVIG. *Artificial Intelligence-A Modern Approach 2 Edition*. Pearson Education,[rc, New Jersey, United States of America, 2003.
- [133] Mustapha SAIDALLAH, Abdeslam EL FERGOUGUI et Abdelbaki Elbelrhiti ELALAOUI. « A comparative study of urban road traffic simulators ». In : *MATEC Web of Conferences*. T. 81. EDP Sciences. 2016, p. 05002.
- [134] Julien SAVAUX. « Privacité dans les problèmes distribués contraints pour agents basés utilité ». Thèse de doct. Valenciennes, 2017.
- [135] Robert E SHANNON. « Introduction to the art and science of simulation ». In : *1998 Winter Simulation Conference. Proceedings (Cat. No. 98CH36274)*. T. 1. IEEE. 1998, p. 7-14.
- [136] Cohen SIMON. « Ingénierie du trafic routier, éléments de théorie du trafic et applications ». In : *Presses de l'école nationale des ponts et chaussées* (1990).
- [137] Kenneth A SMALL. « Valuation of travel time ». In : *Economics of transportation* 1.1-2 (2012), p. 2-14.

- [138] Ziqi SONG, Yi HE et Lihui ZHANG. « Integrated planning of park-and-ride facilities and transit service ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 74 (2017), p. 182-195.
- [139] Lijun SUN, Alexander ERATH et Ming CAI. « A hierarchical mixture modeling framework for population synthesis ». In : *Transportation Research Part B : Methodological* 114 (2018), p. 199-212.
- [140] Aud TENNØY, Jan Usterud HANSEN et Kjersti Visnes ØKSENHOLT. « Developing a tool for assessing park-and-ride facilities in a sustainable mobility perspective ». In : *Urban, Planning and Transport Research* 8.1 (2020), p. 1-23.
- [141] WT THOMPSON. *Notes of Lectures on molecular dynamics and the wave theory of light. Lecture XX.* 1884.
- [142] Alejandro TIRACHINI et David A HENSHER. « Multimodal transport pricing : first best, second best and extensions to non-motorized transport ». In : *Transport Reviews* 32.2 (2012), p. 181-202.
- [143] Kenneth TRAIN. « A validation test of a disaggregate mode choice model ». In : *Transportation Research* 12.3 (1978), p. 167-174.
- [144] Kenneth E TRAIN. *Discrete choice methods with simulation.* Cambridge university press, 2009.
- [145] Jean-Pierre TREUIL, Alexis DROGOUL et Jean-Daniel ZUCKER. *Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques.* Dunod, 2008.
- [146] MA TRICK. *An introduction to simulation.* 1996.
- [147] Ralph TURVEY. « Road and bridge tolls in nineteenth-century London ». In : *The Journal of Transport History* 17.2 (1996), p. 150-164.
- [148] François VALIQUETTE et C MORENCY. « Trip chaining and its impact on travel behaviour ». In : *12th World Congress on Transportation Research.* Lisbon Portugal. 2010, p. 11-15.
- [149] Reza VOSOOGHI, Joseph KAMEL, Jakob PUCHINGER, Vincent LEBLOND et Marija JANKOVIC. « Robo-Taxi service fleet sizing : assessing the impact of user trust and willingness-to-use ». In : *Transportation* 46.6 (2019), p. 1997-2015.
- [150] Shenhao WANG, Qingyi WANG et Jinhua ZHAO. « Deep neural networks for choice analysis : Extracting complete economic information for interpretation ». In : *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 118 (2020), p. 102701.

- [151] Mark WARDMAN. « A comparison of revealed preference and stated preference models of travel behaviour ». In : *Journal of transport economics and policy* (1988), p. 71-91.
- [152] Paul WILLIAMSON, Mark BIRKIN et Phil H REES. « The estimation of population microdata by using data from small area statistics and samples of anonymised records ». In : *Environment and Planning A* 30.5 (1998), p. 785-816.
- [153] Michael WOOLDRIDGE. *An introduction to multiagent systems*. John Wiley & Sons, 2009.
- [154] Haifeng XIAO, Ravi AMBADIPUDI, John HOURDAKIS et Panos MICHALOPOULOS. *Methodology for selecting microscopic simulators : Comparative evaluation of AIMSUN and VISSIM*. Rapp. tech. Intelligent Transportation Systems Institute, University of Minnesota, 2005.
- [155] S YOSHIMURA. « MATES : Multi-agent based traffic and environment simulator-theory, implementation and practical application ». In : *Computer Modeling in Engineering and Sciences* 11.1 (2006), p. 17.
- [156] Dominik ZIEMKE, Ihab KADDOURA et Kai NAGEL. « The MATSim Open Berlin Scenario : A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data ». In : *Procedia computer science* 151 (2019), p. 870-877.

Plan de recherche

Cette partie regroupe les différents éléments du plan de recherche à savoir les matrices des mots-clés et les tableaux "Le qui?" et "Le comment?".

A.1 Matrices des mots-clés

La matrice des mots-clés est un outil important qui permet de révéler la pertinence des binômes de ces mots. Elle permet également de circonscrire le périmètre informationnel global. Nous recueillons dans un tableau à double entrée, une dizaine de mots-clés en rapport au sujet d'étude. A partir de là, on cherche les binômes qui sont pertinents, non prioritaires non retenus et trop larges pour le sujet d'étude. Le Tableau A.1 donne un aperçu des résultats de la première analyse des binômes de mots-clés. Les binômes dans les cellules en vert, sont ceux qui sont pertinents et qui ont été retenus pour la suite de l'étude.

La deuxième phase de l'analyse se focalise sur les binômes de mots retenus. Nous cherchons à ce niveau à exprimer de façon plus explicite (termes claires) les deux mots combinés. Le Tableau A.2 présente le résultat du deuxième niveau de la matrice des mots-clés. Cette analyse permet de mieux comprendre (saisir) le sens des binômes de mots-clés et de les catégoriser en fonction des thèmes d'études regroupés dans le Tableau A.3.

A partir des thèmes obtenus, il est possible d'avoir une vision plus claire des objectifs de recherche et de définir un ordre de travail.

A.2 Le Qui et le Comment ?

Le Qui et le Comment est une méthode qui permet de récolter les informations nécessaires à la réalisation de l'étude.

TABLEAU A.1 – Matrice des mots-clés (niveau 1).

| | Politique | Environnement | Economie | Choix modal | Affectation | Intermodalité | Modélisation | Simulation | Optimisation | Multi-agent |
|---------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Politique | | Politique-Environnement | Politique-Economie | Politique-Choix modal | Politique-Affectation | Politique-Intermodalité | Politique-Modélisation | Politique-Simulation | Politique-Optimisation | Politique-Multi-agent |
| Environnement | Environnement-Politique | | Environnement-Economie | Environnement-Choix modal | Environnement-Affectation | Environnement-Intermodalité | Environnement-Modélisation | Environnement-Simulation | Environnement-Optimisation | Environnement-Multi-agent |
| Economie | Economie-Politique | Economie-Environnement | | Economie-Choix modal | Economie-Affectation | Economie-Intermodalité | Economie-Modélisation | Economie-Simulation | Economie-Optimisation | Economie-Multi-agent |
| Choix modal | Choix modal-Politique | Choix modal-Environnement | Choix modal-Economie | | Choix modal-Affectation | Choix modal-Intermodalité | Choix modal-Modélisation | Choix modal-Simulation | Choix modal-Optimisation | Choix modal-Multi-agent |
| Affectation | Affectation-Politique | Affectation-Environnement | Affectation-Economie | Affectation-Choix modal | | Affectation-Intermodalité | Affectation-Modélisation | Affectation-Simulation | Affectation-Optimisation | Affectation-Multi-agent |
| Intermodalité | Intermodalité-Politique | Intermodalité-Environnement | Intermodalité-Economie | Intermodalité-Choix modal | Intermodalité-Affectation | | Intermodalité-Modélisation | Intermodalité-Simulation | Intermodalité-Optimisation | Intermodalité-Multi-agent |
| Modélisation | Modélisation-Politique | Modélisation-Environnement | Modélisation-Economie | Modélisation-Choix modal | Modélisation-Affectation | Modélisation-Intermodalité | | Modélisation-Simulation | Modélisation-Optimisation | Modélisation-Multi-agent |
| Simulation | Simulation-Politique | Simulation-Environnement | Simulation-Economie | Simulation-Choix modal | Simulation-Affectation | Simulation-Intermodalité | Simulation-Modélisation | | Simulation-Optimisation | Simulation-Multi-agent |
| Optimisation | Optimisation-Politique | Optimisation-Environnement | Optimisation-Economie | Optimisation-Choix modal | Optimisation-Affectation | Optimisation-Intermodalité | Optimisation-Modélisation | Optimisation-Simulation | | Optimisation-Multi-agent |
| Multi-agent | Multi-agent-Politique | Multi-agent-Environnement | Multi-agent-Economie | Multi-agent-Choix modal | Multi-agent-Affectation | Multi-agent-Intermodalité | Multi-agent-Modélisation | Multi-agent-Simulation | Multi-agent-Optimisation | |

| | | | |
|----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mots clés pertinents | Mots clés non prioritaires | Mots clés non retenus | Mots clés trop larges |
|----------------------|----------------------------|-----------------------|-----------------------|

TABLEAU A.2 – Matrice des mots-clés (focus sur mots-clés pertinents).

| | Politique | Environnement | Choix modal | Affectation | Intermodalité | Modélisation | Simulation | Multi-agent |
|---------------|---------------------------------------|---|--|--|---|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Politique | | | Politique- Choix modal | | Politique d'intermodalité | | | |
| Environnement | | | | | Environnement et Intermodalité (réduction de la pollution automobile) | | | |
| Choix modal | | Les choix modaux sur l'Environnement (pollution) | | Choix modal et Affectation (affectation dépend des choix modaux) | Choix modal et Intermodalité (offre) | | | |
| Affectation | | | Affectation et Choix modal (influence) | | | | | |
| Intermodalité | | Environnement et Intermodalité (réduction de la pollution automobile) | Intermodalité et Choix modal (impact) | | | | | |
| Modélisation | Modélisation des Politiques | | Modélisation du Choix modal | Modélisation de l'Affectation | Modélisation de l'intermodalité | | | Modélisation Multi-agent (approche) |
| Simulation | Simulation des Politiques (scénarios) | | Simulation des choix modaux (reproduction et prédiction) | Simulation de l'affectation (réseau) | Simulation de l'intermodalité (flux) | Simulation de Modélisation (scénario) | | Simulation Multi-agent (approche) |
| Optimisation | Optimisation-Politique | | Optimisation du choix modal | Optimisation de l'affectation | | Optimisation de la Modélisation | Optimisation de la Simulation | |

TABLEAU A.3 – Matrice des mots-clés (niveau 2 mots-clés pertinents).

| | Politique | Environnement | Choix modal | Affectation | Intermodalité | Modélisation | Simulation | Multi-agent |
|---------------|---|--|--|---|---|--|-------------------------------|-------------------------------------|
| Politique | | | Politique- Choix modal (influencer sur le choix modal des usagers) | | Politique d'intermodalité (planification, gestion, développement, amélioration, innovation) | | | |
| Environnement | | | | | Environnement et Intermodalité (externalités négatives) | | | |
| Choix modal | | Les choix modaux sur l'Environnement (impact de l'intermodalité sur l'environnement : diminution de la pollution automobile) | | Choix modal et Affectation (affectation dépend des choix modaux) | Choix modal et Intermodalité (prise en compte des habitudes de mobilité dans la définition de l'offre d'intermodalité) | | | |
| Affectation | | | Affectation et Choix modal (influence) | | | | | |
| Intermodalité | | Intermodalité sur l'Environnement (impact de l'intermodalité sur l'environnement) | Intermodalité sur le choix modal (impact de l'offre d'intermodalité sur les choix modaux des usagers) | | | | | |
| Modélisation | Modélisation des Politiques (économiques (tarification, péage), des transports (innovations de déplacement : changement modal, changement d'itinéraire, changement d'heure de départ) | | Modélisation multi-agent du Choix modal (variables explicatives du choix modal liées aux modes de transport et à l'individu) | Modélisation multi-agent de l'Affectation (Méthode d'affectation (aléatoire ou déterministe sur le réseau)) | Modélisation multi-agent de l'intermodalité (modélisation des usagers, mode de transport, réseau routier de manière individuelle) | | | Modélisation Multi-agent (approche) |
| Simulation | Simulation des Politiques (modélisées) | | Simulation des choix modaux (modélisés) | Simulation de l'affectation (modélisée) | Simulation de l'intermodalité (flux) | Simulation de Modélisation (scénario) | | Simulation Multi-agent (approche) |
| Optimisation | Optimisation- Politique (évaluation et proposition de réformes des politiques) | | Optimisation du choix modal (usagers) | Optimisation de l'affectation (réseau : équilibre système) | | Optimisation de la Modélisation (amélioration du modèle) | Optimisation de la Simulation | |

Le Qui permet de fournir les éléments nécessaires à la réalisation et la validation des différents thème de recherche. Le Tableau A.4 renseigne sur les mécanismes et les indicateurs nécessaires pour réaliser et évaluer nos thèmes de recherches retenus.

TABLEAU A.4 – Le Qui ?

| Thèmes | Qui: Définir les thèmes et les caractéristiques d'évaluation | Mécanisme d'obtention | Validation | Résultat | indicateurs |
|--|--|--|---------------------------------------|---|--|
| Mise en place de modèles intermodaux de transport dans la MEL/Douaisis. | | Script Java/Python, MATSIM/SUMO EMD Lille 2016 EMD Douai 2012 SMT | EMD MEL 2016 EMD Douai 2012 SMT | Modèles | Vitesse de parcours, temps de parcours total, congestion, part modal |
| Evaluation des politiques de mobilité à l'échelle urbaine et périurbaine sur la base d'un modèle intermodal permettant les combinaisons de plusieurs modes de transport. | | Simulation Apprentissage | Revue littéraire | Analyses de l'impact des décisions Proposition de réformes | Part/report modal Recettes péage Temps/distance de parcours Niveau de congestion Niveau de pollution |

Le comment renseigne sur les sources à exploiter afin de se positionner par rapport aux travaux connexes. Il permet de recouper l'information afin de juger de sa pertinence. Les différents types de sources utilisées pour notre étude sont regroupées dans le Tableau A.5.

TABLEAU A.5 – Le Comment ?

| Le Comment ? : Recouper l'info pour juger de la pertinence | | | | | | | | | |
|--|---------|---|--|-----------|--------|------------|-----------|----------|------------|
| Thèmes | Sources | Sites gén | Sites spé. | News let. | Presse | Autre sup. | Entretien | Présent. | Pertinence |
| Mise en place de modèles intermodaux de transport dans la MEL/Douaisis | | TRB ETC ANT/ABMSTRANS IVT (Matsim) DLR (SUMO) | | | | | | | |
| Evaluation des politiques de mobilité à l'échelle urbaine et périurbaine sur la base d'un modèle intermodal permettant les combinaisons de plusieurs modes de transport. | | | CEREMA ADEME IFSTTAR IVT (ETH) DLR | | | | | | |

Détails des résultats sur la comparaison de simulateurs

Cette partie regroupe les détails de l'étude comparative des simulateurs. Elle présente les tableaux d'évaluation pour chaque catégorie et les captures d'écran des visualisations des simulateurs.

B.1 Résultats comparatifs par catégorie de critères d'évaluation

Les résultats de l'étude comparative des logiciels de simulation sont présentés dans les tableaux B.1 à B.5 correspondant à chaque catégorie de critères.

B.2 Qualité de visualisation des simulateurs

Dans le cas de notre étude, nous avons considéré une vue de qualité à vol d'oiseau qui permet de distinguer les différents types de véhicules (p. ex., voiture, bus et tram), les piétons et l'infrastructure routière (p. ex., arrêt/station de bus, feux tricolores). Nous ne considérons pas les détails de représentation comme les détails du véhicule (p. ex., nombre de portières, couleur, grand tourisme) et la manière dont les usagers montent/descendent du bus.

Les outils de simulation commerciaux (*PTV VIssim*, *Aimsun* et *AnyLogic*) offrent des rendus visuels nettement supérieurs à ceux qui sont gratuits (*SUMO* et *GAMA*). *PTV Vissim* dépasse de loin tous autres simulateurs sur la qualité d'affichage de la simulation (cf. Figure B.1a). En effet, la représentation des piétons et des véhicules (voiture, bus) est plus réaliste avec la prise en compte

TABLEAU B.1 – Evaluation des simulateurs en fonction de la nature du logiciel (Cat. 1).

| Simulateur | Critère | | | | | | | Note |
|--------------------|--------------------------|---------|-------------|--------------------|---------|-------|--------|------|
| | Open source ^a | Gratuit | Equipe dev. | Acquisition unique | Windows | Linux | Mac OS | |
| <i>MATSim</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>SUMO</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>Aimsun Next</i> | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 7 |
| <i>PTV Vissim</i> | | | ✓ | ✓ | ✓ | | | 4 |
| <i>GAMA</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>NetLogo</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>AnyLogic</i> | | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 7 |

a. Le critère « Open source » est réhibitoire pour notre cadre d'étude. En effet, notre objectif est de pouvoir étudier le fonctionnement du logiciel, pourvoir le personnaliser (modifier) et de mettre à disposition d'autres utilisateurs le nouvel logiciel obtenu. Ainsi, tout logiciel qui ne permet pas l'accès au code source sera éliminé pour la suite de l'étude. Donc, nous allons écarter ces logiciels dans la deuxième phase de sélection. Il s'agit notamment de *Aimsun Next*, *PTV Vissim* et *AnyLogic*. Cependant, nous décidons de continuer leurs études pour la première phase de sélection afin de permettre à d'autres utilisateurs d'en bénéficier.

TABLEAU B.2 – Evaluation des simulateurs en fonction des possibilités de création du réseau et de la demande de transport (Cat. 2).

| Simulateur ^a | Outil visuel intégré ^b | Critère | | | Note |
|-------------------------|-----------------------------------|-------------|----------------------|----------------|------|
| | | Données OSM | Demande de transport | Données des TP | |
| <i>MATSim</i> | | ✓ | ✓ | ✓ | 8 |
| <i>SUMO</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>Aimsun Next</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ? ^c | 8 |
| <i>PTV Vissim</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ? | 8 |
| <i>GAMA</i> | | ✓ | ✓ | | 5 |
| <i>NetLogo</i> | | ✓ | ✓ | | 5 |
| <i>AnyLogic</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ? | 8 |

^a. On peut voir que les simulateurs de trafic routier propriétaires offrent plus de faciliter de création de l'offre et de demande de trafic notamment avec une possibilité de création en interne et de manière graphique (automatique). Néanmoins, les plateformes comme *SUMO* et *MATSim* dispose de générateurs externes de réseaux et de demande de trafic. Pour *SUMO*, il y a les outils tels que *netedit* et *randomTrip*. *MATSim* utilise *JOSM* (Java OSM) qui est éditeur extensible de *OSM* qui permet d'éditer les données *OSM* (nœuds, chemins et relations). Il intègre un plugin *MATSim* pour convertir les données *OSM* en format xml pour *MATSim*.

^b. Certains simulateurs ne permettent pas de créer directement le réseau routier. Dans ce cas, il faut utiliser d'autres logiciels pour créer le trafic routier.

^c. Les versions d'évaluation des logiciels commerciaux ne nous ont pas permis de tester cette fonctionnalité.

TABLEAU B.3 – Évaluation des simulateurs selon la qualité de visualisation de la simulation (Cat. 3).

| Simulateur | Critère | | | | Mark |
|--------------------|----------------|----|-----------------------|-----------------------------|------|
| | 2D | 3D | Réalisme ^a | Peu de mémoire ^b | |
| <i>MATSim</i> | ! ^c | | | ✓ | 3 |
| <i>SUMO</i> | ✓ | | | ✓ | 5 |
| <i>Aimsun Next</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>PTV Vissim</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>GAMA</i> | ✓ | ✓ | | ✓ | 8 |
| <i>NetLogo</i> | ✓ | | | ✓ | 5 |
| <i>AnyLogic</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |

a. Le critère de réalisme dépend fortement des attentes du modélisateur. Il peut être décomposé aux niveaux macroscopique et microscopique. Au niveau macroscopique, le réalisme porte sur les grandeurs physiques observées : densité, débit, vitesse moyenne, etc. Au niveau microscopique, le réalisme concerne le comportement observable des usagers (automobiliste, piéton) et leur façon de se déplacer (marche, conduite automobile).

b. On suppose qu'un besoin de moins de 16 Go de RAM est suffisant pour un affichage 3D et des effets réalistes.

c. *MATSim* ne permet pas de visualiser les résultats de la simulation directement. Un autre outil tel *Simunto VIA* (voir <https://www.simunto.com/via/>) est utilisé pour cela.

TABLEAU B.4 – Evaluation des simulateurs selon la qualité de la documentation et de l’IHM (Cat. 4).

| Simulateur | Critère | | | | | | | Mark |
|--------------------|----------|-----|-------|------------|-------------------------|------------------------|-----|------|
| | En ligne | PDF | Forum | Conférence | Communauté ^a | Formation ^b | GUI | |
| <i>MATSim</i> | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 10 |
| <i>SUMO</i> | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | 7 |
| <i>Aimsun Next</i> | | | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | 6 |
| <i>PTV Vissim</i> | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | 9 |
| <i>GAMA</i> | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | 9 |
| <i>NetLogo</i> | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | | ✓ | 7 |
| <i>AnyLogic</i> | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ | 9 |

a. L’existence d’une communauté d’utilisateur autour du logiciel est capitale pour sa survie et son évolution.

b. De façon générale, les simulateurs propriétaires (*Aimsun Next*, *PTV Vissim*, *AnyLogic*) offrent un support d’assistance à leurs clients. Ils offrent également des formations payantes (périodiques ou sur demandes) aux utilisateurs.

des détails très proches du monde réel. Il est suivi par *Aimsun Next* et *Anylogic* dont les qualités d’affichage sont assez réalistes (cf. Figures B.1b et B.1c). Dans ces captures d’écran, nous pouvons voir plusieurs modes de transport distincts tels que le tram, le bus et la voiture. Les piétons son également bien représentés de même que les bâtiments, les feux tricolores, les arrêts de transports publics.

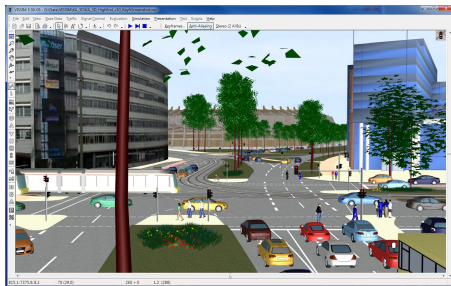
La qualité de simulation dans *SUMO* (Figure B.1d) est meilleure par rapport à *GAMA* (Figure B.1e) où les véhicules, les piétons et les feux tricolores sont représentés uniquement par des formes géométriques (p. ex., triangle, cercle).

TABLEAU B.5 – Évaluation des simulateurs selon nos propres spécifications (Cat. 5).

| Simulateur ^a | Modèle micro. | Echelle | Caractéristiques mode/utilisateur | Sorties statistiques | Critère | | | | | Note |
|-------------------------|---------------|---------|-----------------------------------|----------------------|---------------|-------------|----------------------------|----------------------|---|------|
| | | | | | Intermodalité | Calibration | Comportement API dynamique | Accès au code source | | |
| MATSim | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | | ✓ | 8 |
| SUMO | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ | ✓ | 9 |
| Aimsun Next | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ? | | 7 |
| PTV Vissim | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | | ? | | 7 |
| GAMA | ✓ | ✓ | ✓ | | | | | | ✓ | 4 |
| NetLogo | ✓ | | ✓ | | | | | ✓ | ✓ | 5 |
| AnyLogic | ✓ | ✓ | ? | ✓ | ? | ? | | ? | ? | 3 |

a. Tous les sous critères de cette catégorie sont rédhibitoires en dehors de l'interface d'accès. La **mise à l'échelle** consiste à étendre la simulation sur des réseaux de trafic routier plus vastes à l'échelle par exemple d'une ville ou d'une région. L'**ajout de fonctionnalités supplémentaires** permet de prendre en compte certains besoins de l'utilisateur qui ne sont pas satisfaits dans la version standard du simulateur. Cet ajout peut se faire soit par l'intégration de modules complémentaires propres au simulateur (s'il existe), soit par le développement des fonctionnalités par l'utilisateur et leur intégration par la suite au simulateur. Les **statistiques** sont nécessaires pour mieux comprendre les parties non visibles de la simulation (le taux d'occupation de la route par exemple). Les simulateurs doivent permettre d'implémenter l'**intermodalité** c'est à dire permettre aux usagers de changer de moyens de transport au cours de leur déplacement. Les simulateurs doivent donc permettre de représenter les différents moyens de transport (p; ex., vélo, voiture, camion, bus, train) et les piétons. Le **comportement dynamique** consiste à changer son itinéraire en fonction des informations de perturbation du trafic routier (p. ex., embouteillages, accidents). L'**interface d'accès** permet de prendre en main plus facilement le simulateur pour la personnalisation des comportements des agents et/ou la modification du programme sans rentrer directement dans le code. Cela peut être possible également par l'ajout de plugins API pour de nouvelles fonctionnalités. Le **modification (personnalisation) des comportements** est une nécessité au regard de ce que nous cherchons à faire. Il faut donc avoir la possibilité de créer directement ou indirectement les comportements des agents que nous souhaitons simuler.

Les simulateurs propriétaires (Aimsun Next, PTV Vissim, AnyLogic) offrent la possibilité d'ajouter des fonctionnalités à travers l'achat de modules complémentaires. Ils présentent également des statistiques intéressantes. Mais nous n'avons pas pu tester ces caractéristiques du fait des restrictions imposées par les versions d'évaluations. Nous tenons à préciser que ces informations sont issues des sites desdits simulateurs et non de nos expérimentations.



(a) Capture d'écran des systèmes multi-modaux dans *PTV Vissim* [63].



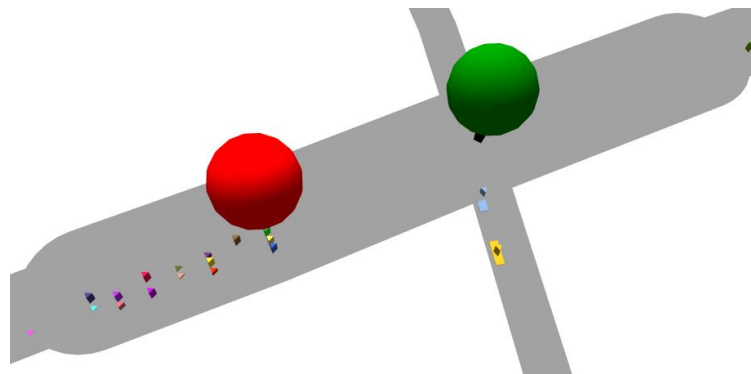
(b) Extrait de simulation dans *AimSun Next* [2].



(c) Extrait de simulation dans *AnyLogic* [5].



(d) Extrait de notre simulation dans *SUMO*.



(e) Extrait de notre simulation dans *GAMA*. Dans ce cas, les véhicules sont représentés par des triangles et les feux par les cercles.

FIGURE B.1 – Qualité de visualisations des simulateurs.

Modèles de choix discrets

Cette annexe présente les codes sources en *Python* de nos modèles de choix discrets *SI-MNL* et *SI-NL* dans le logiciel *PandasBiogeme*.

SI-MNL(modèle 1)

ASC

```
ASC_CAR = Beta('ASC_CAR', 0, None, None, 0) #default, min, max, Keeping
to the initial value (if 1)
ASC_CAR_PASSENGER = Beta('ASC_CAR_PASSENGER', 0, None, None, 0)
ASC_BIKE = Beta('ASC_BIKE', 0, None, None, 0)
ASC_PT = Beta('ASC_PT', 0, None, None, 0)
ASC_WALK= Beta('ASC_WALK', 0, None, None, 0)
```

Paramètres à estimer

```
#CAR
B_TT_CAR = Beta('B_TT_CAR', 0, None, None, 0)

#PT
B_TT_PT = Beta('B_TT_PT', 0, None, None, 0)
B_TRANSFERT_TIME_PT = Beta('B_TRANSFERT_TIME_PT', 0, None, None,
0)
B_ACC_EGR_TIME = Beta('B_ACC_EGR_TIME', 0, None, None, 0)
B_NUMBER_TRANSFERS = Beta('B_NUMBER_TRANSFERS', 0, None, None, 0)
```

#BIKE

$B_TT_BIKE = \text{Beta}('B_TT_BIKE', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$

$B_AGE_BIKE = \text{Beta}('B_AGE_BIKE', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$

#WALK

$B_TT_WALK = \text{Beta}('B_TT_WALK', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$

#GENERAL

$B_COST = \text{Beta}('B_COST', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$

#CALIBRATION

$T_PARKING_SEARCH_PENA = \text{Beta}('T_PARKING_SEARCH_PENA', 4, \text{None}, \text{None}, 1)$

$T_ACC_EGR_WALK_TIME = \text{Beta}('T_ACC_EGR_WALK_TIME', 4, \text{None}, \text{None}, 1)$

$T_ASC_Car_PT = \text{Beta}('T_ASC_Car_PT', 1.25, \text{None}, \text{None}, 1)$

Fonctions d'utilité

#CAR

$V_CAR = ASC_CAR + B_TT_CAR * \text{duration_car} +$

$B_TT_WALK * T_ACC_EGR_WALK_TIME + B_TT_CAR * T_PARKING_SEARCH_PENA$
 $+ B_COST * \text{cost_car}$

#PT

$V_PT = ASC_PT + B_TT_PT * \text{duration_pt} + B_ACC_EGR_TIME * \text{access_egress_time}$
 $+ B_COST * \text{cost_pt} +$

$B_NUMBER_TRANSFERS * \text{number_transfers} + B_TRANSFERT_TIME_PT * \text{transfer_time}$

#BIKE

$V_BIKE = ASC_BIKE + B_TT_BIKE * \text{duration_bike} + B_AGE_BIKE * \text{max}(0, \text{age} - 60)$

#WALK

$V_WALK = ASC_WALK + B_TT_WALK * \text{duration_walking}$

#WALK

$V_WALK = ASC_WALK + B_TT_WALK * \text{duration_walking}$

```
#Car_PT
V_Car_PT = ASC_Car_PT + V_CAR + V_PT - B_TT_WALK * T_ACC_EGR_WALK_TIME
- B_TT_CAR * T_PARKING_SEARCH_PENA - ASC_CAR - ASC_PT
```

```
# Associate utility functions with the numbering of alternatives
V = 0 : V_CAR, 1 : V_PT, 2 : V_BIKE, 3 : V_WALK, 4 : V_Car_PT
# Associate the availability conditions with the alternatives
av = 0 : car_availability, 1 : pt_availability, 2 : bike_availability, 3 : walk_availability,
4 : car_availability
```

Définition du modèle

```
#Observation to the log likelihood function.
logprob = models.loglogit(V, av, choice)
```

```
# Create the Biogeme object
biogeme = bio.BIOGEME(database, logprob, numberOfThreads=4)
biogeme.modelName = '../output/model1_estimation_v1.0.3'
```

```
# Estimate the parameters. Calculate also the standard errors using boots-
trapping.
results = biogeme.estimate(bootstrap=100)
```

SI-NL(modèle 2)

ASC

```
ASC_CAR = Beta('ASC_CAR', 0, None, None, 0) #default, min, max, Keeping
to the initial value (if 1)
ASC_CAR_PASSENGER = Beta('ASC_CAR_PASSENGER', 0, None, None, 0)
ASC_BIKE = Beta('ASC_BIKE', 0, None, None, 0)
ASC_PT = Beta('ASC_PT', 0, None, None, 0)
ASC_WALK = Beta('ASC_WALK', 0, None, None, 0)
```

Paramètres à estimer

```
#CAR
B_TT_CAR = Beta('B_TT_CAR', 0, None, None, 0)
```


#PT

$$B_TT_PT = \text{Beta}('B_TT_PT', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

$$B_TRANSFERT_TIME_PT = \text{Beta}('B_TRANSFERT_TIME_PT', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

$$B_ACC_EGR_TIME = \text{Beta}('B_ACC_EGR_TIME', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

$$B_NUMBER_TRANSFERS = \text{Beta}('B_NUMBER_TRANSFERS', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

#BIKE

$$B_TT_BIKE = \text{Beta}('B_TT_BIKE', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

$$B_AGE_BIKE = \text{Beta}('B_AGE_BIKE', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

#WALK

$$B_TT_WALK = \text{Beta}('B_TT_WALK', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

#GENERAL

$$B_COST = \text{Beta}('B_COST', 0, \text{None}, \text{None}, 0)$$

#CALIBRATION

$$T_PARKING_SEARCH_PENA = \text{Beta}('T_PARKING_SEARCH_PENA', 4, \text{None}, \text{None}, 1)$$

$$T_ACC_EGR_WALK_TIME = \text{Beta}('T_ACC_EGR_WALK_TIME', 4, \text{None}, \text{None}, 1)$$

$$T_ASC_Car_PT = \text{Beta}('T_ASC_Car_PT', 1.25, \text{None}, \text{None}, 1)$$

En plus des paramètres du *SI-MNL*, on ajoute un paramètre supplémentaire pour représenter le nid.

$$\# \text{Nested parameter } NEST_PT = \text{Beta}('NEST_PT', 1, 1.0, 10, 0)$$
Fonctions d'utilité

#CAR

$$V_CAR = ASC_CAR + B_TT_CAR * \text{duration_car} +$$

$$B_TT_WALK * T_ACC_EGR_WALK_TIME + B_TT_CAR * T_PARKING_SEARCH_PENA$$

$$+ B_COST * \text{cost_car}$$

#PT

$$V_PT = ASC_PT + B_TT_PT * \text{duration_pt} + B_ACC_EGR_TIME * \text{access_egress_time}$$

$$+ B_COST * \text{cost_pt} +$$

$$B_NUMBER_TRANSFERS * \text{number_transfers} + B_TRANSFERT_TIME_PT * \text{transfer_time}$$

```

#BIKE
V_BIKE = ASC_BIKE + B_TT_BIKE * duration_bike + B_AGE_BIKE * max(0,age-60)

#WALK
V_WALK = ASC_WALK + B_TT_WALK * duration_walking

#WALK
V_WALK = ASC_WALK + B_TT_WALK * duration_walking

#Car_PT
V_Car_PT = ASC_Car_PT + V_CAR + V_PT - B_TT_WALK * T_ACC_EGR_WALK_TIME - B_TT_CAR * T_PARKING_SEARCH_PENA - ASC_CAR - ASC_PT

# Associate utility functions with the numbering of alternatives
V = 0 : V_CAR, 1 : V_PT, 2 : V_BIKE, 3 : V_WALK, 4 : V_Car_PT
# Associate the availability conditions with the alternatives
av = 0 : car_availability, 1 : pt_availability, 2 : bike_availability, 3 : walk_availability, 4 : car_availability
#List of alternatives CAR = 1.0, [ 0]
BIKE = 1.0, [ 2]
WALK = 1.0, [ 3]
INTERMODAL = NEST_PT, [1, 4]
nests = CAR, CAR_PASSENGER, BIKE, WALK, INTERMODAL

```

Définition du modèle

```

#Observation to the log likelihood function.
logprob = models.lognested(V, av, nests, choice)

# Create the Biogeme object
biogeme = bio.BIOGEME(database, logprob, numberOfThreads=4)
biogeme.modelName = '../output/model2_estimation_v1.0.2'

# Estimate the parameters. Calculate also the standard errors using bootstrapping.
results = biogeme.estimate(bootstrap=100)

```


Analyse des données de mobilité

Cette partie regroupe les résultats d'analyse statistique des données de mobilité de manière générale et plus spécifiquement sur les comportements de déplacement intermodal dans la Métropole Européenne de Lille (MEL).

D.1 Mobilité dans la MEL

D.1.1 Nombre de déplacements par mode principal de transport

Les parts modales représentent la proportion des déplacements qui sont réalisés selon leur mode principal. La longueur ou la durée des déplacements n'est pas prise en compte dans ce calcul. On peut effectuer les principales observations suivantes sur les déplacements réalisés quotidiennement (cf. Figure D.1) :

- Le principal mode de transport utilisé par les habitants de 5 ans et plus de la MEL en semaine est la voiture en tant que conducteur avec plus de 41% des déplacements.
- La marche est le deuxième mode de transport des métropolitains, avec 32,7% des déplacements.
- La voiture en tant que passager représente 14,2% des déplacements
- Les transports publics (bus, tram, métro) représentent près de 10% des déplacements par jour avec plus d'utilisation du métro.
- Le vélo avec 1,8% de part modale, est le dernier mode au-dessus du seuil symbolique des 1%.
- Les hommes et les femmes partagent le même taux d'utilisation de la voiture. Il ressort que les femmes utilisent plus la marche à pied que les

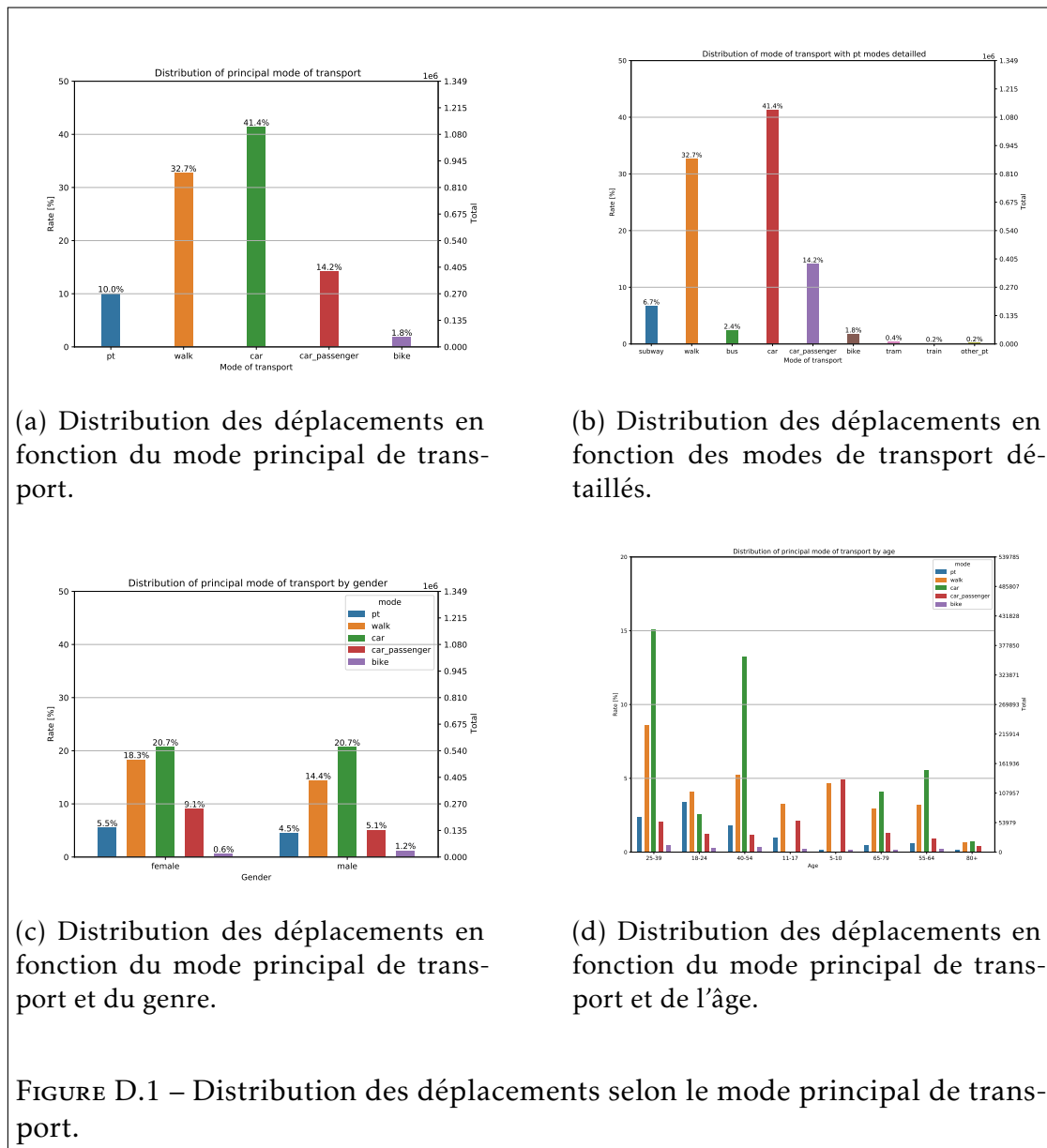


FIGURE D.1 – Distribution des déplacements selon le mode principal de transport.

hommes. Les hommes utilisent beaucoup plus les deux-roues motorisés et le vélo (1,2% déplacements pour les hommes contre 0,6% pour les femmes).

- Pour les personnes majeures, la part modale de la voiture en tant que conducteur est de 51,4%.

Distribution des déplacements en fonction du motif

Les motifs combinés permettent d’analyser de manière synthétique les déplacements sans tenir compte de l’ordre des activités à l’origine. Les déplacements secondaires sont les déplacements n’ayant ni pour origine ni pour destination le domicile.

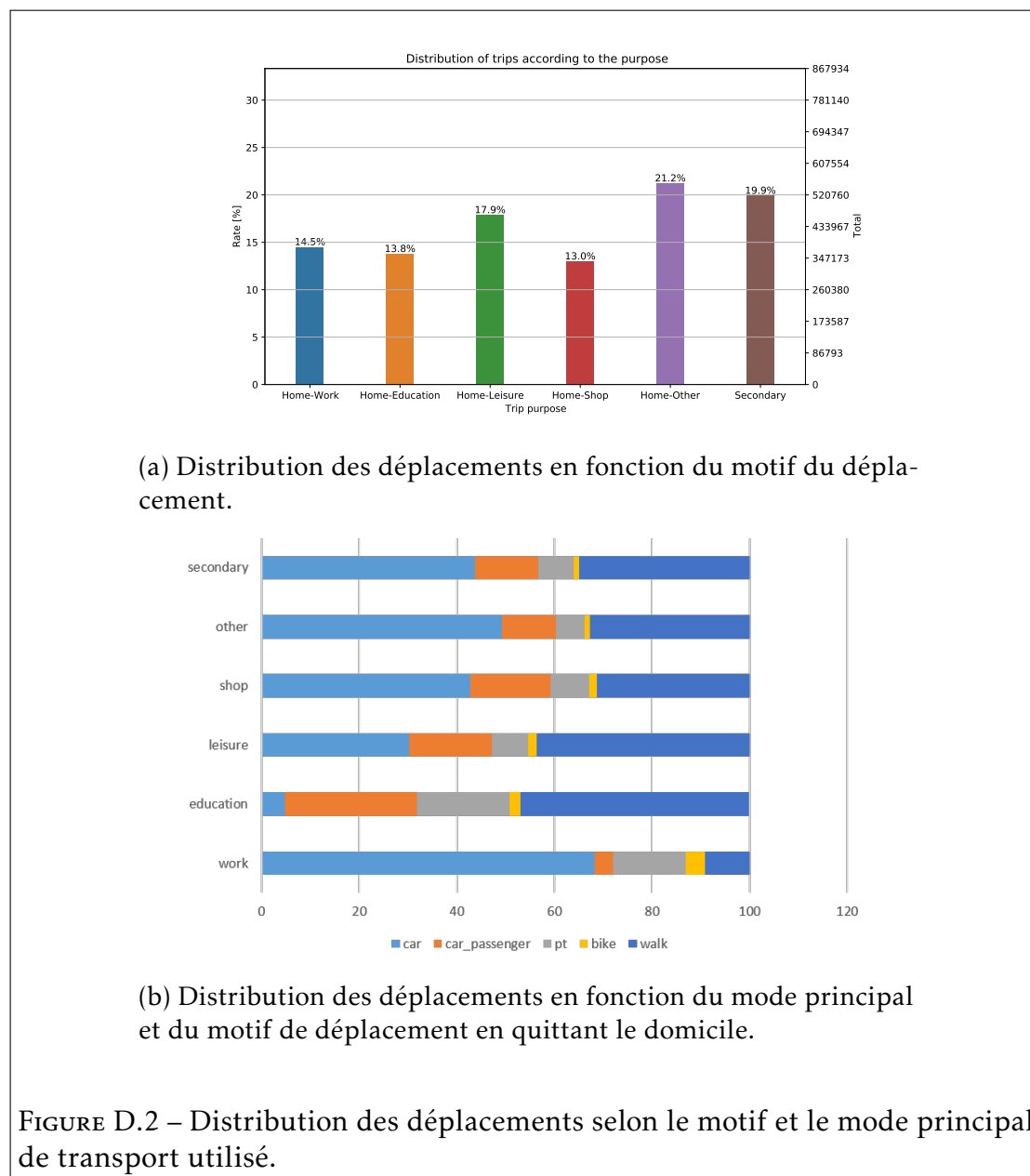


FIGURE D.2 – Distribution des déplacements selon le motif et le mode principal de transport utilisé.

Il ressort de l’analyse de la Figure D.2 que :

- Les déplacements secondaires représentent 20% de l'ensemble des déplacements réalisés. Ainsi, la grande majorité des déplacements restent en lien direct avec le domicile (80%).
- Le motif domicile-travail habituel direct représente près de 15% de l'ensemble des déplacements.
- La marche dépasse l'utilisation de la voiture pour les motifs domicile-école et domicile-loisir. Elle reste cependant bien plus faible pour le domicile-travail. Ce résultat s'explique notamment par la proximité des lieux d'éducation contrairement aux lieux de travail.
- Pour les déplacements domicile-travail, la voiture en tant que conducteur est la plus utilisée, avec près de 70% de part modale.
- La voiture en tant que passager est très élevée pour les déplacements domicile-école avec 32,0% de part modale.
- Les transports publics (TP) représentent 15,0% pour les déplacements vers le travail et 20,1% pour l'école et l'université. Ce résultat peut s'expliquer des habitudes de déplacements notamment dans des zones bien desservies par les TP.
- Le vélo reste toujours assez minoritaire quelque soit le motif du déplacement.

D.2 Pratiques intermodales dans la MEL

Les déplacements sont classés en trois catégories :

- Les déplacements à pied ;
- Les déplacements monomodaux (un seul mode mécanisé, avec éventuellement de la marche avant/après) ;
- Les déplacements intermodaux (au moins deux modes mécanisés enchaînés, ces deux modes pouvant être identique (p. ex., correspondance bus/bus).

Nous pouvons effectuer les commentaires suivants suite à l'analyse de la Figure D.3 :

- Seulement 4% des déplacements effectués dans la MEL sont effectués par combinaisons de modes de transport (Figure D.3a).
- 82,5% des déplacements intermodaux ne comportent que des correspondances entre services de transports publics. L'intermodalité qui est généralement recherchée par les pouvoirs publics concerne la voiture (voiture+TCU ou voiture+train via les parkings relais ou voiture+voiture via

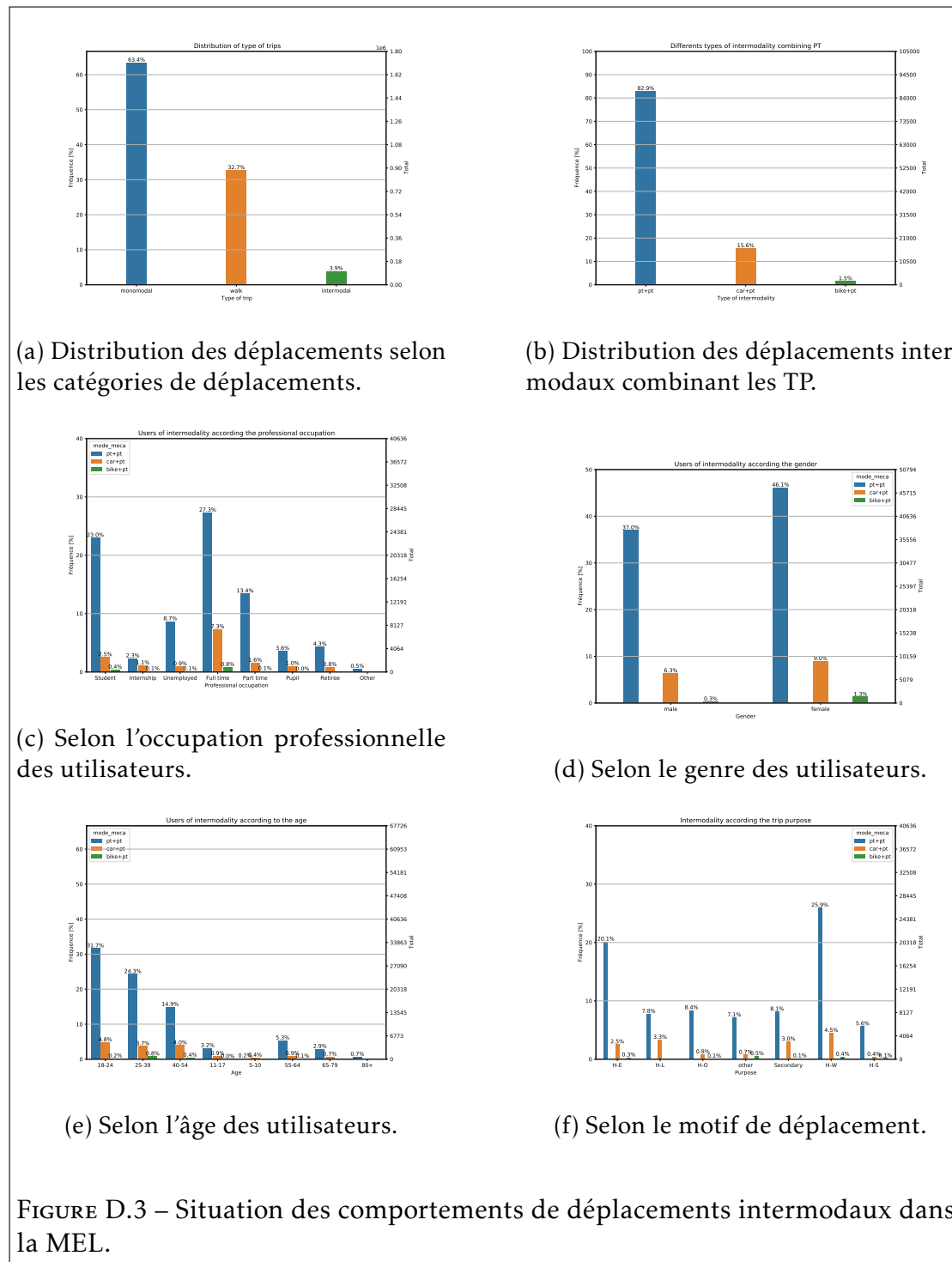


FIGURE D.3 – Situation des comportements de déplacements intermodaux dans la MEL.

les aires de covoiturage). Cette intermodalité faisant intervenir la voiture en tant que conducteur, concerne moins de 16% des déplacements intermodaux (Figure D.3b).

- Les étudiants et les travailleurs constituent les grands utilisateurs de l'intermodalité (Figure D.3c). Les travailleurs combinent plus la voiture personnelle et les TP que les autres usagers, traduisant une part de réalité au regard de la possession de voitures pour cette catégorie d'individus.
- Les femmes pratiquent plus l'intermodalité que les hommes que ce soit en combinant plusieurs moyens de TP, ou la voiture et les TP ou le vélo et les TP (Figure D.3d).
- Les jeunes restent majoritairement les grands utilisateurs de l'intermodalité (Figure D.3e). Cette observation se traduit également au niveau des motifs de déplacement où le travail et l'éducation sont les principales activités (Figure D.3f).

Table des matières

| | |
|--|--------------|
| Résumé | xv |
| Remerciements | xvii |
| Sommaire | xix |
| Liste des tableaux | xxiii |
| Table des figures | xxv |
| Glossaire | xxix |
| Introduction générale | 1 |
| Contexte de l'étude | 1 |
| Objectifs applicatifs et résultats attendus | 4 |
| Hypothèses | 5 |
| Problématiques scientifiques abordées | 7 |
| Approche méthodologique | 8 |
| Contributions | 10 |
| Organisation du manuscrit | 10 |
| Partie I. Revue de littérature scientifique | 11 |
| Partie II. Contributions | 12 |
| Partie II. Annexes | 12 |
| Partie I. Revue de littérature scientifique | 14 |
| 1 Politiques d'intermodalité et les outils d'évaluation | 15 |
| Introduction | 15 |
| 1.1 Généralités sur les politiques d'intermodalité | 16 |
| 1.1.1 Définitions | 16 |
| 1.1.2 Les bienfaits de la pratique intermodale | 18 |
| 1.1.3 Politiques d'intermodalité | 19 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.2 | Les études qualitatives et quantitatives de mobilité | 21 |
| 1.2.1 | Définitions | 21 |
| 1.2.2 | Enquêtes sur les comportements d'intermodalité | 23 |
| 1.2.3 | Les recensements de la population | 24 |
| 1.2.4 | Les enquêtes de déplacements | 25 |
| 1.2.5 | Les données massives de mobilités | 28 |
| 1.3 | Modélisation et simulation des systèmes de transport | 30 |
| 1.3.1 | Définitions | 30 |
| 1.3.2 | Modèles de simulation des systèmes de transport | 33 |
| 1.3.3 | Données d'entrée pour réaliser une simulation de transport | 35 |
| 1.3.4 | Simulation de comportement d'intermodalité | 39 |
| | Conclusion | 40 |
| 2 | Modélisation multi-agent du transport | 43 |
| | Introduction | 43 |
| 2.1 | Modèles de simulation multi-agent de systèmes de transport | 44 |
| 2.1.1 | Paradigme Agent (Définition) | 44 |
| 2.1.2 | Exemple d'application aux transports | 48 |
| 2.2 | Génération de la demande de déplacement | 53 |
| 2.2.1 | Le modèle traditionnel à quatre étapes | 53 |
| 2.2.2 | Génération de la demande de transport multi-agent | 56 |
| 2.2.3 | Estimation du choix modal de transport | 60 |
| 2.3 | Choix de l'outil de simulation | 67 |
| 2.3.1 | Les études comparatives des simulateurs de systèmes de transport | 67 |
| 2.3.2 | Présentation de l'approche de comparaison utilisée | 70 |
| 2.3.3 | Evaluation des simulateurs existants selon les critères | 72 |
| 2.3.4 | L'intermodalité dans <i>MATSim</i> et <i>SUMO</i> | 75 |
| | Conclusion | 88 |
| | Partie II. Contributions | 91 |
| 3 | Modélisation de comportements de déplacement intermodal | 93 |
| | Introduction | 93 |
| 3.1 | Reconstruction des informations manquantes de l'EMD | 95 |
| 3.1.1 | Reconstitution des déplacements intermodaux | 95 |
| 3.1.2 | Génération des alternatives non prises en compte dans le choix de départ de l'individu dans l'EMD | 98 |
| 3.1.3 | Calcul du coût du transport | 102 |
| 3.1.4 | Reconstruction des coordonnées O/D des déplacements | 103 |
| 3.1.5 | Reconstruction des communes origine/destination | 106 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.2 | Modèles de choix discret avec l'alternative intermodale VP+TP | 108 |
| 3.2.1 | Structures des modèles proposés | 108 |
| 3.2.2 | Fonctions d'utilité | 115 |
| 3.3 | Intégration du comportement intermodal | 119 |
| 3.3.1 | Création d'une alternative intermodale (VP+TP) | 120 |
| 3.3.2 | Contraintes d'utilisation de l'alternative intermodale VP+TP | 121 |
| 3.3.3 | Module de recherche du parkings relais (P+R) | 122 |
| 3.3.4 | Routage l'alternative intermodale VP+TP | 123 |
| 3.4 | Discussion | 124 |
| 3.4.1 | Modèles de choix discrets <i>vs</i> méthodes d'apprentissage supervisé | 124 |
| 3.4.2 | De la reconstruction des origines/destinations des déplacements | 131 |
| 3.4.3 | La fonction d'utilité de l'alternative intermodale VP+TP | 132 |
| | Conclusion | 132 |
| 4 | Résultats d'expérimentations : cas de la MEL | 135 |
| | Introduction | 135 |
| 4.1 | Présentation de la MEL | 136 |
| 4.1.1 | Caractéristiques socio-démographiques de la MEL | 136 |
| 4.1.2 | La mobilité dans la MEL | 138 |
| 4.2 | Valeurs des paramètres des modèles de choix discret | 142 |
| 4.2.1 | Configurations de base pour l'estimation des modèles | 142 |
| 4.2.2 | Evaluation des modèles estimés | 143 |
| 4.3 | Mise en place de la simulation | 146 |
| 4.3.1 | Génération de la demande de déplacements et de l'offre de transport | 147 |
| 4.3.2 | Description du pipeline utilisé | 150 |
| 4.3.3 | Principales adaptations du pipeline | 152 |
| 4.3.4 | Résultats de l'offre et de la demande de transport générées | 152 |
| 4.3.5 | Paramètres de configuration de la simulation | 156 |
| 4.3.6 | Processus de calibration de la simulation | 157 |
| 4.4 | Evaluation des parkings relais (P+R) | 162 |
| 4.4.1 | Configuration de la simulation | 162 |
| 4.4.2 | Résultats | 163 |
| 4.5 | Expérimentation du péage urbain | 167 |
| 4.5.1 | Configuration de la simulation | 168 |
| 4.5.2 | Résultats | 169 |
| 4.5.3 | Discussion | 176 |
| | Conclusion | 177 |

| | |
|--|------------|
| Conclusion générale et perspectives | 179 |
| Bilan | 179 |
| Perspectives | 182 |
| Les données sur la pratique intermodale | 182 |
| Routage intermodal | 182 |
| Généralisation de la combinaison intermodale | 184 |
| Mise à l'échelle | 184 |
| Publications et communications | 188 |
| Publications | 188 |
| Bibliographie | 189 |
| A Plan de recherche | 203 |
| A.1 Matrices des mots-clés | 203 |
| A.2 Le Qui et le Comment? | 203 |
| B Détails des résultats sur la comparaison de simulateurs | 207 |
| B.1 Résultats comparatifs par catégorie de critères d'évaluation . . | 207 |
| B.2 Qualité de visualisation des simulateurs | 207 |
| C Modèles de choix discrets | 215 |
| <i>SI-MNL</i> (modèle 1) | 215 |
| ASC | 215 |
| Paramètres à estimer | 215 |
| Fonctions d'utilité | 216 |
| Définition du modèle | 217 |
| <i>SI-NL</i> (modèle 2) | 217 |
| ASC | 217 |
| Paramètres à estimer | 217 |
| Fonctions d'utilité | 218 |
| Définition du modèle | 219 |
| D Analyse des données de mobilité | 221 |
| D.1 Mobilité dans la MEL | 221 |
| D.1.1 Nombre de déplacements par mode principal de transport | 221 |
| Distribution des déplacements en fonction du motif | 223 |
| D.2 Pratiques intermodales dans la MEL | 224 |
| Table des matières | 229 |

Résumé

Le transport occupe une place capitale dans les besoins vitaux des populations au même titre que l'eau, la santé et l'éducation. De nombreux déplacements sont effectués dans le cadre de la réalisation des activités quotidiennes (p. ex., travail, éducation, shopping). Ces déplacements, réalisés en France majoritairement en voitures individuelles, génèrent également plusieurs conséquences négatives sur la santé et le bien-être des usagers (p. ex., pollution, congestion, nuisances sonores, accidents routiers). Pour réduire ces impacts négatifs, les pouvoirs publics prennent des mesures de mobilité pour orienter les comportements de déplacements des individus afin de les inciter à réduire l'usage de la voiture personnelle en faveur des transports publics (TP) et autres modes plus doux (p. ex., la marche, le vélo) et leurs combinaisons (intermodalité). L'élaboration de ces mesures et surtout leurs évaluations, nécessite l'utilisation d'outils adéquats. Les plateformes de simulation de trafic, utilisant les approches multi-agent et les modèles à base d'activités, sont de plus en plus utilisées pour adresser les politiques de mobilité à différentes échelles.

C'est dans cette dynamique que s'inscrit cette thèse qui vise à proposer un cadre de simulation multi-agent permettant d'évaluer les politiques d'intermodalité existantes et de pouvoir en explorer de nouvelles. Nous avons pu ainsi :

- Evaluer l'usage des parkings relais (P+R) dans la combinaison des voitures personnelles et des TP. Nous avons pu faire ressortir le rôle que jouent ces infrastructures dans les pratiques intermodales notamment pour les déplacements issus des zones périphériques vers l'hypercentre.
- Analyser l'impact du péage urbain avec ou sans la possibilité de combiner la voiture individuelle et les TP. On a pu montrer qu'avec 20 euros comme taxes de péage, il était possible de réduire l'usage de la voiture personnelle de 20% dans la Métropole Européenne de Lille (MEL).

Mots clés : simulation, multi-agent, intermodalité, choix modal, MATSim, mel

Abstract

Transport occupies a central place in the vital needs of populations, along with water, health and education. Several trips are performed for the realization of daily activities purpose (eg, work, education, shopping). These journeys, carried out mainly by private cars in France, also generate several negative consequences on the health and well-being of people (eg pollution, congestion, noise pollution, road accidents). To reduce these negative impacts, the public authorities are taking mobility measures to guide the travel behavior of individuals in order to encourage them to reduce the use of personal cars in favor of public transport (PT) and other soft modes (eg, walking, cycling) and their combinations (intermodality). The development of these measures and especially their evaluations, require the use of adequate tools. Traffic simulation platforms, using multi-agent approaches and activity-based models, are increasingly used solutions to address mobility policies at different scales.

This thesis is part of this dynamic, which aims to propose a multi-agent simulation framework to assess existing intermodality policies and to be able to explore new ones. We were able to:

- Assess the use of the park and ride facilities on the combination of personal cars and public transport. We were able to highlight the role that these infrastructures play in intermodal practices, in particular for trips from peripheral areas to the hyper-center.
- Analyze the impact of congestion charges with or without the possibility of combining private cars and public transport. It has been shown that with 20 euros as toll taxes, it was possible to reduce personal car use by 20% in the MEL.

Keywords: simulation, multi-agent, intermodality, modal choice, MATSim, mel
