



AZISE O. DIALLO, ARNAUD DONIEC, GUILLAUME LOZENGUEZ, RENÉ MANDIAU

Approche centrée agent pour l'intermodalité basée sur des données réelles

Volume 5, n° 1 (2024), p. 95-129.

<https://doi.org/10.5802/roia.66>

© Les auteurs, 2024.



Cet article est diffusé sous la licence

CREATIVE COMMONS ATTRIBUTION 4.0 INTERNATIONAL LICENSE.

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



*La Revue Ouverte d'Intelligence Artificielle est membre du
Centre Mersenne pour l'édition scientifique ouverte*

www.centre-mersenne.org

e-ISSN : 2967-9672

Approche centrée agent pour l'intermodalité basée sur des données réelles

Azise O. Diallo^{a, b}, Arnaud Doniec^a,
Guillaume Lozenguez^a, René Mandiau^c

^a CERI Systèmes Numériques, Institut Mines-Télécom (IMT) Nord Europe, 59653 Villeneuve d'Ascq Cedex, France

^b IFP Energies nouvelles, 69360 Solaize, France

E-mail : azise-oumar.diallo@ifpen.fr, arnaud.doniec@imt-nord-europe.fr,
guillaume.lozenguez@imt-nord-europe.fr

^c Univ. Polytechnique Hauts-de-France, CNRS, UMR 8201 - LAMIH F-59313 Valenciennes, France

E-mail : Rene.Mandiau@uphf.fr.

RÉSUMÉ. — Face aux externalités négatives (par exemple, congestion, émissions de CO₂, pollution sonore) des systèmes de transport, il est important de disposer d'outils de simulation adéquats pour aider à mettre en place une politique de mobilité plus respectueuse de l'environnement et économiquement acceptable par les populations. Dans ce papier, nous proposons un cadre de simulation multi-agent permettant d'évaluer les politiques d'intermodalité existantes et de pouvoir en explorer de nouvelles. Notre cadre de simulation intègre un modèle de choix discret tenant compte de l'alternative intermodale, combinant la voiture personnelle et un transport public pour une meilleure prise de décision du choix modal de l'agent. Comme expérimentations, nous proposons une évaluation de la politique de mobilité durable basée sur la mise à disposition de parkings relais pour favoriser l'intermodalité dans un réseau multimodal à grande échelle. 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. Le cadre de simulation ainsi proposé peut servir de support d'aide à la prise de décision pour permettre l'évaluation de différentes mesures de mobilité.

MOTS-CLÉS. — Approche basée agent (ABM), modèle logit, intermodalité.

1. INTRODUCTION

De nos jours, l'accès au transport fait partie des besoins vitaux des populations au même titre que l'eau, la santé et l'éducation. De plus, 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⁽¹⁾ moins polluants (par exemple, le bus, le vélo, le

⁽¹⁾Un système de transport est une « 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 ».

covoiturage et la multimodalité) afin de proposer des solutions à la fois économiques (pour le client) et écologiques. Ces réformes, pour la plupart, visent à réduire l'usage de la voiture personnelle en faveur des modes de transports doux (par exemple, le vélo ou la marche à pied) et des transports publics. Elles consistent généralement à ajuster la tarification des transports publics [9, 26, 45], à accélérer la transition énergétique (par exemple, le développement des véhicules électriques), et à aménager des infrastructures urbaines de transports (par exemple, les parkings relais et les pôles d'échanges multimodaux).

En France par exemple, de telles réformes s'inscrivent dans la politique d'orientation de la mobilité⁽²⁾ qui prévoit de renforcer les offres de déplacements : i) en rééquilibrant les parts modales des déplacements au profit des modes collectifs ou actifs (marche et vélo), ii) en renforçant l'utilisation partagée des modes de transport individuel (covoiturage, autopartage) et iii) en favorisant la multimodalité et l'intermodalité. La multimodalité désigne la possibilité d'avoir plusieurs modes possibles de transport pour un déplacement donné ; tandis que l'intermodalité se définit comme la combinaison de plusieurs modes de transport au cours d'un même déplacement [24]. L'intermodalité répond, dans une certaine mesure, aux problèmes de congestion, de stationnement et d'émissions de gaz [11]. Par ailleurs, son adoption par les usagers est de nos jours, facilitée grâce au développement des nouvelles offres de service de mobilité (*e.g.*, l'auto-partage, le vélo et la trottinette en libre-service) et une démocratisation des nouvelles technologies de l'information (une planification possible des déplacements incluant différents moyens de transport). Parmi les formes de déplacement intermodal, la combinaison des transports publics avec la voiture personnelle est la plus courante [37]. Elle repose le plus souvent sur l'utilisation de parkings relais situés généralement à proximité des stations de transports publics. Ainsi, la configuration technique (*e.g.*, la localisation, la capacité et l'accessibilité) et le système de tarification sont autant de facteurs impactant cette pratique intermodale [35].

Dans ce contexte, l'élaboration et l'évaluation *a priori* d'une politique d'intermodalité ne sont pas aisées. Les autorités en charge de la mobilité utilisent le plus souvent des outils de modélisation reposant sur des approches agrégées comme les modèles à quatre étapes [32]. Cependant, ces modèles traditionnels restent peu adaptés pour tenir compte du dynamisme des pratiques intermodales. Des approches plus désagrégées telles que les modèles à base d'agents [47] semblent bien plus adaptées à la complexité des systèmes de transport intermodal [4]. Toutefois, à notre connaissance, les comportements intermodaux au sein d'outils de simulation basés sur ces modèles sont assez peu développés, voire inexistant [13, 14, 15, 16].

Dans cet article, nous présentons une démarche permettant de réaliser une simulation à base d'agents de comportements de déplacements intermodaux à partir de données réelles de mobilité. Nous nous focalisons sur la combinaison voiture personnelle et transports publics (*VP + TP*) nécessitant l'usage des parkings relais (*PR*). Une première contribution vise à générer des configurations/populations de simulation

⁽²⁾<https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039666574/>

cohérentes sur la base de jeux de données anonymisées disponibles en France (notamment, les couples Origine/Destination (OD) ainsi que les préférences des modes de transport et d'intermodalité). Une seconde contribution porte dans un premier temps sur l'estimation d'un modèle de choix modal intégrant en plus des modes de transport traditionnels (voiture, transports publics, vélo et marche), une alternative intermodale combinant la voiture personnelle et des transports publics. Ensuite, nous montrons comment intégrer ce modèle dans un outil de simulation (en l'occurrence, *MATSim* [22]). Enfin, nous appliquons le cadre de simulation proposée sur la Métropole Européenne de Lille (*MEL*) en reproduisant les comportements de déplacement intermodal ($VP + TP$). Nous mettons également en évidence le rôle important des *PR* dans cette pratique intermodale.

La suite de l'article est organisée comme suit. La section 2 présente un état de l'art des travaux de simulation sur les systèmes de transport dans l'optique d'une prise en compte de comportements intermodaux. La section 3 décrit les données à disposition, et comment elles peuvent être utilisées aujourd'hui dans le cadre de la simulation de la mobilité d'un territoire. Dans la section 4, nous présentons respectivement comment les données anonymisées provenant de sources multiples peuvent être utilisées pour créer des populations artificielles cohérentes avec une prise en compte du comportement intermodal ($VP + TP$). Ensuite, la section 5 évalue les résultats obtenus avec les données de notre cas d'étude, la Métropole Européenne de Lille (*MEL*). Enfin, la section 6 propose de conclure et de donner des perspectives.

2. TRAVAUX EXISTANTS SUR LA MOBILITÉ ET L'INTERMODALITÉ

Pour réaliser des évaluations sur les impacts de politiques ou de projets de transport, il existe différents outils dont les principaux sont les études (quantitatives et qualitatives) à partir d'enquêtes et de modélisation/simulation [29]. Cette revue de littérature se focalise sur les travaux de modélisation et de simulation des systèmes de transport.

2.1. APPROCHES DE MODÉLISATION DES SYSTÈMES DE TRANSPORT

Il existe principalement trois approches de modélisation d'un système de transport en fonction du degré de finesse recherché : i) macroscopique, ii) mésoscopique, et iii) microscopique.

La modélisation macroscopique s'appuie sur la théorie de la mécanique des fluides pour représenter la dynamique des flux pour la demande de transport. Cette représentation se représente généralement par le biais d'équations mathématiques faisant intervenir trois variables : la vitesse, la capacité (ou débit) et la densité. La formulation mathématique offre une simplification du problème et permet d'expliquer facilement les phénomènes macroscopiques, comme la congestion sur une autoroute. Cependant, la simplicité de ces modèles est aussi son principal défaut, avec une perte d'informations sur les interactions et sur les processus de décisions des usagers qui ont conduit à la production des flux. Les premiers modèles macroscopiques sont apparus au milieu des années 50 [30, 42].

Contrairement aux modèles agrégés, les éléments du système de transport sont considérés dans l'approche microscopique, individuellement et leurs interactions sont prises en compte. Les modèles microscopiques se déclinent en plusieurs groupes avec notamment des modèles micro-économiques dits individu-centré [23], et basés sur des agents (*ABM*, de l'anglais *Agent Based Modeling*) [49]. Ce dernier groupe est particulièrement adapté pour représenter la prise de décision des individus dans leurs comportements de déplacement [4, 47].

La troisième approche de modélisation (mésoscopique) se positionne entre les modèles microscopiques et macroscopiques [28]. Elle consiste à considérer les éléments du trafic en petits groupes homogènes et à représenter mathématiquement les comportements de chaque groupe.

Les approches de modélisation présentées ci-dessus se distinguent également selon la manière de générer, distribuer et affecter la demande de transport en fonction du mode de transport. Dans les modèles traditionnels agrégés (macroscopiques) dits à quatre étapes, la génération consiste à déterminer le nombre total de déplacements dans la région d'étude pour une période de temps donnée [32]. Ces déplacements sont ensuite représentés par des matrices Origine/Destination (O/D) des flux pour chaque zone de production et d'attraction de déplacement ; tandis que dans une approche à base d'agents, il faut d'abord générer une population synthétique de la zone d'étude et inférer ensuite, la demande de déplacement pour la réalisation des activités des agents.

Dans un modèle agrégé, les décisions de déplacement en particulier du mode de transport des individus sont effectuées successivement de manière indépendante (*trip-based approach*) [32]. Cependant, dans la pratique, les individus effectuent leurs choix en fonction des allers retours au domicile, et en tenant compte de l'ensemble des déplacements à effectuer et des activités à réaliser (*activity and trip-based approach*). Cette approche permet de prendre en compte la cohérence des modes de transport successivement choisis (e.g., il n'est pas possible de revenir en voiture si l'aller a été effectué en transport public), ou l'impact de l'indisponibilité d'un mode de transport donné sur la chaîne de déplacement de la journée [33, 40]. De telles interactions ne peuvent pas être facilement modélisées à l'aide d'un modèle agrégé à quatre étapes [34, 41]. De plus, les modèles basés sur les activités permettent, grâce à des techniques de génération de population synthétique [39, 50], d'évaluer différentes politiques de mobilité plus directement que dans le contexte d'un modèle en quatre étapes. En combinant les deux modèles (basés sur les activités et les agents), il est possible de simuler efficacement les interactions entre les individus de la population synthétique dans la réalisation de leurs chaînes d'activités quotidiennes [3]. Cette approche permet donc de modéliser plus explicitement les processus décisionnels (notamment le choix du mode de transport) des individus que les modèles traditionnels.

Plusieurs facteurs liés à l'individu (par exemple, la catégorie socio-professionnelle (CSP), le genre, l'âge et le motif du déplacement) et au mode de transport (par exemple, la durée du déplacement, le coût et le confort du transport) ont été identifiés comme ayant un impact sur le choix modal [37]. De plus, les individus peuvent présenter des sensibilités différentes face à l'offre de stationnement en tenant compte par exemple

du temps de recherche, des coûts de stationnement et du temps de marche [18]. Les modèles statistiques de choix discret sont couramment utilisés pour estimer le choix modal pour chaque individu [46]. Ils sont fondés sur la notion d'utilité⁽³⁾ qu'un individu i a pour une alternative m (mode de transport dans notre cas d'étude) [5]. L'intégration de la notion d'utilité dans un modèle à base d'agent correspond à une classe d'agents, appelée *agent basé sur des utilités* [44]. La notion d'utilité permet ainsi de modéliser de manière plus réaliste le comportement de déplacement de l'individu dans le choix de son mode de transport. L'individu choisira alors le mode ou la combinaison de modes qui maximise son utilité.

Face à cette diversité des approches de modélisation des systèmes de transport, le développement des outils de simulation permettant de simuler les scénarios résultants (de type flux et/ou agent) a connu une avancée significative. Pour réaliser une simulation à base d'agent de scénarios d'intermodalité, une étude comparative de sept simulateurs les plus populaires a été proposée dans [13]. Il s'agit de plateformes de simulation spécifiques au transport : *MATSim* [22], *SUMO* [1], *Aimsun Next* et *PTV Vissim* (*Planung Transport Verkehr AG Verkehr In Städten - SIMulationsmodell*), et des simulateurs plus génériques *GAMA* [17], *NetLogo* [48] et *AnyLogic* [2]. Il ressort notamment que *MATSim* est particulièrement adapté pour étudier les comportements de déplacement intermodal à grande échelle. La section suivante présente *MATSim* et les fonctionnalités à développer pour réaliser des déplacements intermodaux.

2.2. FONCTIONNEMENT DE *MATSim*

MATSim est un outil open-source de simulation à base d'activités et d'agents [22]. Dans *MATSim*, chaque individu (agent) a un *plan* quotidien de déplacements et d'activités (par exemple, aller au travail, conduire les enfants à l'école ou faire des achats dans un magasin). La figure 2.1 décrit le cycle générique de simulation de *MATSim*. Les plans journaliers initiaux des agents sont représentés dans une **demande initiale** de transport avec des modèles d'offre de transport (par exemple, le réseau routier et le réseau des *TP*). Les déplacements de tous les agents sont ensuite exécutés à travers le module de micro-simulation de mobilité **QSim** générant les flux des différents modes utilisés (voiture et *TP*). À chaque itération, une portion d'agents est autorisée à modifier leurs plans pour améliorer/maximiser leurs scores (**Scoring**). Le score d'un plan est calculé en fonction de l'utilité de réalisation d'une activité et de celle d'effectuer le déplacement correspondant. Chaque agent à tour de rôle, aura donc la possibilité d'optimiser son comportement jusqu'à atteindre un équilibre du système. Ainsi, à travers le processus d'itération mettant en jeu la demande et l'offre de transport, les agents peuvent « apprendre » de la réalisation de leur plan d'activités pour l'adapter. En effet, les flux générés par **QSim** peuvent entraîner des congestions ou des relaxations du trafic à certains endroits du réseau routier, d'une itération à l'autre. Ainsi, chaque agent peut décider de modifier l'heure de départ, le mode de transport, ou son itinéraire. Après

⁽³⁾L'utilité est une fonction de **variables explicatives** composées des caractéristiques de l'individu (par exemple, CSP, âge) et des attributs de l'alternative (par exemple, le temps de parcours, le coût de transport) à laquelle on ajoute un **terme d'erreur**.

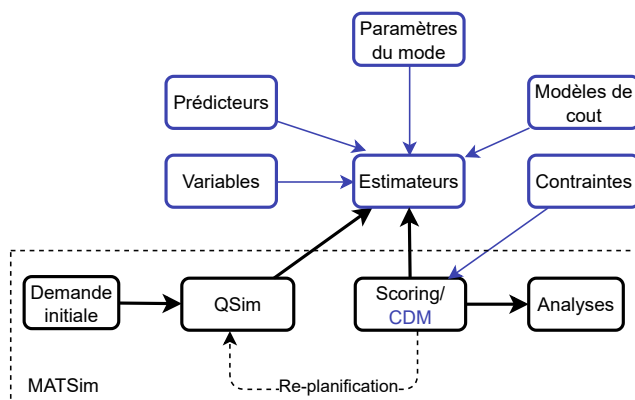


FIGURE 2.1 – Cycle de simulation dans *MATSim* (en noir) et couplage du module de choix discret (en bleu) [19, 21, 22].

stabilisation, il est possible de réaliser des **analyses** grâce au fichier journal (*events file*) qui retranscrit à chaque pas de simulation (1 seconde) toutes les actions réalisées sur le réseau par les différents agents.

La version standard de *MATSim* permet grâce à sa modularité d'intégrer de nouvelles fonctionnalités, telles que l'utilisation d'un module de choix discret modal (**CDM**) en lieu et place du **Scoring** pour choisir le mode de transport [19, 21]. Cette fonctionnalité connue sous le nom de *eqasim*, se focalise sur le choix modal et n'autorise pas les autres stratégies de re-planification comme le changement horaire ou d'itinéraires. L'utilisation d'un modèle de choix discret pour le choix modal permet de reproduire de manière plus fine (paramétrage du mode, modèles de coût) et plus réaliste (contraintes d'utilisation), ce comportement en tenant compte de plusieurs facteurs (variables) autres que la durée et le coût d'utilisation du mode. Elle permet ainsi d'atteindre plus rapidement la convergence du système, souvent avec peu d'itérations. Cette rapidité de convergence s'explique principalement par l'utilisation des paramètres du modèle de choix discret dans la simulation, lesquels ont été préalablement estimés sur les données de déplacement.

Le déplacement en voiture est fondé sur des algorithmes de calcul du plus court chemin, comme celui proposé par Dijkstra; tandis que celui des transports publics repose sur la programmation dynamique mettant en relation les stations/arrêts et les lignes. Notons que le routage intermodal combinant les *TP* et la marche est aussi défini dans *MATSim*. Cependant, les déplacements combinant la voiture privée et les *TP* via les parkings relais (*PR*) ne sont pas encore pris en compte. En d'autres termes, la version actuelle de *MATSim/eqasim* ne permet pas de réaliser directement les formes d'intermodalité visant à réduire l'utilisation de la voiture privée. Il donc nécessaire d'effectuer de développer de nouvelles fonctionnalités dans *eqasim*.

3. TERRITOIRE ET DÉCISION INDIVIDUALISÉE

La principale difficulté des modèles utilisant l'approche *ABM* et ceux de choix discret réside dans la nécessité d'enrichir des bases de données contenant des informations individualisées et hétérogènes pour reproduire un ensemble de comportements cohérents. Dans le cadre d'un usage des données pour la simulation de la mobilité sur un territoire [8, 43], l'objectif consiste alors à pouvoir identifier les déplacements réalisés successifs à l'échelle de chaque individu. Dans un premier temps, la simulation nécessite des couples Origine/Destination (O/D) avec des coordonnées spatio-temporelles, afin de pouvoir simuler chaque individu réalisant un déplacement donné. Ensuite, la raison du déplacement (par exemple, travail, familial, loisir) et ses contraintes temporelles permettent de gérer la répartition spatio-temporelle des équipements et des services sur un territoire. Ces informations sont primordiales pour questionner, en simulation, quand et vers où peuvent être réalisés les déplacements. Enfin, notre intérêt porte sur la modélisation du choix modal d'un déplacement, lequel requiert des informations spécifiques sur les équipements de chaque individu (propriétaire d'un véhicule et/ou d'un vélo, par exemple), sur leurs abonnements (train, transport urbain), leur degré de connaissances des possibilités de transports, leur niveau d'appétence pour les différents modes existants, etc. En effet, le choix du mode de transport est généralement un choix multi-critère où l'aspect financier est mis en balance avec d'autres aspects plus pratiques ou de confort. Dans ce qui suit, nous présentons successivement les différentes sources de données disponibles en France pour la mise en place d'une simulation *ABM* des systèmes de transport.

3.1. DONNÉES SUR LA DEMANDE DE TRANSPORT

En France, les principales sources de données identifiant les habitudes de déplacement sont le recensement et les enquêtes de déplacement. Le recensement permet de connaître de façon très précise, les caractéristiques socio-économiques des individus (par exemple, l'âge, le genre et la catégorie socio-professionnelle) ainsi que leur choix de mode de transport principal (par exemple, la marche, les deux roues, le véhicule et le transport public). En France, cette ressource est fournie par l'Institut National des Statistiques et des Études Économiques (*INSEE*)⁽⁴⁾. La base renseigne également sur les caractéristiques du ménage (par exemple, le nombre de personnes et la possession de véhicule), ainsi que celles de la résidence principale (par exemple, le type de logement, la zone géographique). L'échantillon de cette enquête est très représentatif de la population (environ 35 %). Parallèlement au recensement, des enquêtes sur les mobilités professionnelles et scolaires sont menées. Le recensement n'étant pas focalisé spécifiquement sur les habitudes de déplacements des individus, il contient très peu d'informations sur les comportements de mobilité (par exemple, la fréquence des déplacements, le mode de transport réellement utilisé, les motifs secondaires comme les loisirs ou les achats).

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

Les enquêtes de déplacement peuvent être regroupées en trois groupes [43] : les enquêtes ménages déplacements (*EMD*), les enquêtes déplacements villes moyennes (*EDVM*) et les enquêtes déplacements grands territoires (*EDGT*). L'*EMD* renseigne sur les pratiques de mobilité quotidienne des personnes à l'échelle d'une commune ou d'une communauté d'agglomération à un moment donné. (par exemple, l'*EMD* de la *MEL* réalisée en 2016⁽⁵⁾). Par exemple, elle informe certains éléments socio-économiques des usagers (par exemple, l'âge, le genre et la CSP), les motifs des déplacements (par exemple, le travail, les études ou les loisirs), les modes de transports utilisés (par exemple, la voiture, le vélo, le bus et la marche) et la répartition horaire des déplacements. Les *EDVM* sont des formes réduites d'*EMD* dont la zone d'étude correspond aux villes moyennes (moins de 100 000 habitants). Quant aux *EDGT*, elles portent sur des périmètres plus importants associant des zones urbaines et des territoires péri-urbains et/ou ruraux. Comme exemple, on peut citer l'*EDGT* de l'île de France réalisée en 2020⁽⁶⁾. Les principales limites des enquêtes de déplacements sont leur faible taux d'échantillonnage (entre 0,8 à 2 %) et l'absence de coordonnées O/D qui ne sont connues souvent qu'à l'échelle du secteur de tirage. Les *EMDs* peuvent être complétées localement ou pour un mode particulier par des « Enquêtes voyageurs », lesquelles sont beaucoup moins systématiques.

Outre les bases de recensement et d'enquêtes de déplacement, nous avons aussi les données massives de mobilité issues principalement de la localisation des téléphones mobiles (*floating mobile data* (*FMD*)) et des véhicules (*floating car data* (*FCD*)) qui peuvent renseigner sur des pratiques de mobilité. 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 informations *GPS* des véhicules. Elles peuvent aussi être obtenues via les localisations des téléphones. Les données massives, une fois traitées, fournissent de meilleures connaissances des flux origine/destination que celles issues d'enquêtes (faible couverture). Elles informent également sur les itinéraires détaillés des déplacements des usagers grâce au système de localisation dont la mise à jour est plus fréquente. De ce fait, ces données sont plus récentes que celles issues des enquêtes standards. Le manque d'informations brutes sur le déplacement (par exemple, le motif du déplacement, le mode de transport utilisé ou les caractéristiques de l'individu) est la limite principale des données massives de mobilité. Étant également dépendantes 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 leurs parts de marché.

3.2. DONNÉES SPATIALES SUR L'OFFRE DE TRANSPORT

Les données géographiques et spatiales sont indispensables à la génération des coordonnées O/D des déplacements. En France, on distingue principalement la base de

⁽⁵⁾<https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/enquete-deplacement-2016/information/?location=10,50.65641,3.03338&basemap=jawg.streets>

⁽⁶⁾<https://www.omnil.fr/spip.php?article229>

données *BD TOPO*⁽⁷⁾ et la base permanente des équipements (*BPE*)⁽⁸⁾. 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), les constructions (bâtiments), les services et leurs activités, et le transport (les infrastructures du réseau de transport). La *BPE* informe sur le niveau d'équipements et de services rendus par un territoire (une zone géographique qui peut être infra-communale) à la population. La base recouvre les domaines comme les services, les commerces, la santé et l'enseignement. Grâce à la localisation fine des équipements, il est possible d'étudier la concentration spatiale de ces derniers. Ainsi, définir les lieux des activités O/D comme le domicile, le travail, l'éducation, les achats ou les loisirs [20] pourrait s'avérer utile.

Parallèlement, la principale source de données disponible pour la modélisation du réseau de transport est celle décrite dans *OpenStreetMap*⁽⁹⁾ (*OSM*) [7, 31]. Les données *OSM* renseignent sur les informations cartographiques (par exemple, les routes, les sentiers, les lignes et les stations de *TP*, et les bâtiments) du monde. Elles sont disponibles en accès libre grâce au travail collaboratif fourni par différentes personnes dans le monde. En corollaire, les données *OSM* fournissent des informations de qualité inégale (les données étant plus ou moins détaillées selon la zone étudiée).

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

Enfin, les données des Transport Public (*TP*) sont généralement disponibles sous le format standard *GTFS*⁽¹⁰⁾ (*General Transit Feed Specification*). Les données *GTFS* se composent de plusieurs fichiers permettant de modéliser spécifiquement les informations de transports publics comme les arrêts, les itinéraires, les trajets et les horaires. Ces bases de données sont généralement produites et mises à jour par les structures en charge du réseau.

3.3. INTÉGRATION DES DONNÉES EN SIMULATION

Les données d'enquêtes de déplacements (précisément les *EMD*) sont les plus souvent utilisées pour l'estimation des modèles de choix modaux et la génération des demandes de transport pour la simulation. 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

⁽⁷⁾<https://geoservices.ign.fr/documentation/diffusion/telechargement-donnees-libres.html>

⁽⁸⁾<https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/base-permanente-des-equipements-1/>

⁽⁹⁾<https://www.openstreetmap.org/about>

⁽¹⁰⁾<https://gtfs.org/>

et plus représentative dans le cas de la génération de la demande de transport [20]. Le tableau 3.1 présente les sources de données avec leurs domaines de production disponibles en France, relativement à leurs utilités pour la simulation de transport intermodal.

TABLE 3.1 – Principales sources de données sur la demande et l’offre de transport en France.

Domaine	Source	Producteur	Utilité	Informations sur l’intermodalité
Déplacement	Enquêtes déplacement (<i>EMD</i> , <i>EDVM</i> , <i>EDGT</i>)	Collectivités territoriales, <i>CEREMA</i>	Demande de transport	Oui
	Recensement / Mobilités professionnelle et scolaire	<i>INSEE</i>	Demande de transport	Non
	<i>ENTD</i>	Ministère de l’écologie	Demande de transport	Non
	Enquêtes « voyageurs », données de comptage	Organisme des services de mobilité	Calibration	Non
	Données massives (<i>FCD</i> , <i>FMD</i>)	Opérateur de téléphonie, Google	Calibration	Non
	<i>BPE</i> , <i>BD TOPO</i> , bordures administratives, <i>OSM</i>	<i>OSM Community</i> , <i>IGN</i>	Localisation des installations	–
Réseau routier	<i>BD TOPO</i> , <i>OSM</i>	<i>OSM Community</i> , <i>IGN</i>	Offre de transport	–
Réseau de transports publics	<i>GTFS</i>	Organisme des <i>TP</i>	Offre de transport	–

La demande de transport est issue généralement d’une population synthétique. Cette population synthétique est définie comme une collection d’agents, avec des attributs comme la localisation du domicile, l’âge, le genre, la catégorie socio-professionnelle, la possession de cartes/d’équipements de transport (ex., le permis, la voiture et les tickets ou la carte d’abonnement de transports publics). La demande de transport regroupe les activités et les déplacements effectués par les agents. 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 déplacement.

À notre connaissance, il n'existe pas de technique spécifique pour générer de la demande de transport pour la plate-forme *MATSim*. Par contre, il existe des synthétiseurs⁽¹¹⁾ open-sources pour différents cas d'étude disponibles [20, 25, 51]. Pour être réutilisables, ces scripts doivent être réadaptés ou réajustés pour correspondre à la nouvelle zone d'étude. Le réseau de transport multimodal est produit à partir des données *OSM* et *GTFS* de la zone d'étude en utilisant la bibliothèque *pt2matsim* [38].

Les sources de données présentées ci-dessus pour la génération d'un scénario de simulation multi-agent ne contiennent pas d'informations spatiales (les coordonnées et les villes) relatives aux origines/destinations et les combinaisons modales des déplacements effectués. Il convient donc de reconstruire ces informations, afin de réaliser des scénarios de simulation à base d'agents de transport intermodal. La section suivante décrit notre approche méthodologique et nos hypothèses de travail.

4. MÉTHODOLOGIE ET HYPOTHÈSES

Cette section détaille notre approche de génération de la demande de transport intermodal ainsi que les choix de modélisation effectués. Elle décrit dans la deuxième partie, les développements additionnels de *MATSim/eqasim* pour simuler les comportements de déplacement intermodal.

4.1. RECONSTITUTION DES O/D ET DE LA PRATIQUE INTERMODALE

Comme évoqué précédemment, l'« Enquête Ménage Déplacement » (*EMD*) permet de renseigner au mieux sur l'intermodalité. Cependant, pour éviter une éventuelle identification des personnes enquêtées, les zones (*i.e.*, les 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 tout en conservant la protection des données personnelles.

4.1.1. Reconstitution des O/D des activités

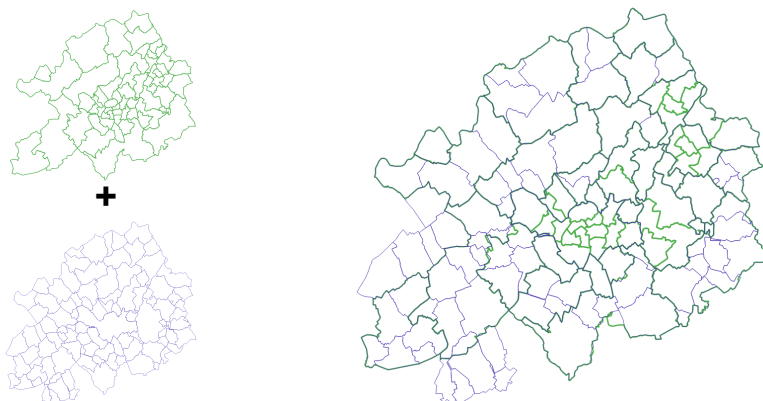
Le choix des ménages de l'enquête de déplacement repose sur des secteurs de tirage, de sorte à garder une cohérence avec les découpages administratifs, tout en garantissant un nombre suffisant d'habitants par zone. Ainsi, les activités sont localisées dans ces secteurs de tirage. L'objectif est de maintenir l'anonymat des individus dans des groupes statistiques. Pour reconstruire les communes d'activités, il suffit d'effectuer une superposition des secteurs de tirage sur les communes via des logiciels de traitement des données géographiques comme *QGIS*⁽¹²⁾ et *ArcGIS*⁽¹³⁾. La figure 4.1b

⁽¹¹⁾Des outils de synthèse (ou synthétiseurs) font référence ici à un ensemble de méthodes et de scripts qui permet de générer une population synthétique d'agents ou une demande de transport à partir de données réelles.

⁽¹²⁾<https://www.qgis.org/fr/site/>

⁽¹³⁾<https://www.arcgis.com/index.html>

donne un aperçu de cette superposition pour la Métropole Européenne de Lille (MEL) : les contours géographiques (les limites administratives) des communes (en bleu) et ceux des secteurs de tirage (en vert) sont représentés à la figure 4.1a.



(a) Limites administratives en bleu et les secteurs de tirage en vert.

(b) Résultat de la superposition des deux formes dans QGIS.

FIGURE 4.1 – Superposition des formes géographiques des secteurs de tirage (en vert) sur les limites administratives des communes (en bleu) de la MEL.

On peut voir que le centre correspondant à la ville de Lille (commune principale) est composé de plusieurs secteurs de tirage ; tandis que certaines communes (périphériques) appartiennent à une même zone statistique. Cette méthode nous permet d’identifier facilement les communes de résidence et d’activités, à partir des secteurs de tirage issus de l’enquête de déplacement. En effet, comme on peut le voir à la figure 4.1(b), la taille du secteur de tirage est inférieure ou égale à celle de la commune. Une fois les communes d’activités connues, il est alors possible de fusionner l’enquête de déplacement avec d’autres bases de données comme le recensement.

Outre l’identification des communes, il faut aussi reconstruire les coordonnées des O/D des déplacements. Ces coordonnées sont nécessaires pour estimer les temps et les distances de parcours des modes inutilisés dans l’enquête, et aussi pour reconstruire les conditions initiales avant d’effectuer un choix modal. L’EMD présente les déplacements en termes de secteurs O/D, complétés d’une information sur la distance euclidienne ou à vol d’oiseau. Des coordonnées précises sont nécessaires à l’estimation des paramètres du modèle de choix discret de mode (CDM) de transport dans *MATSim*. La méthode que nous utilisons est assez simple et est définie en deux étapes :

- (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 de celle fournie dans l’enquête.

Il faut noter ici que nous conservons la coordonnée du point correspondant au domicile pour garantir la cohérence des déplacements entre le domicile et les autres activités. Un exemple de génération et de recherche de couple de points pour deux secteurs de tirage O/D est fourni à la figure 4.2. Dans cet exemple, les deux points identifiés fournissent une distance proche de celle de référence.

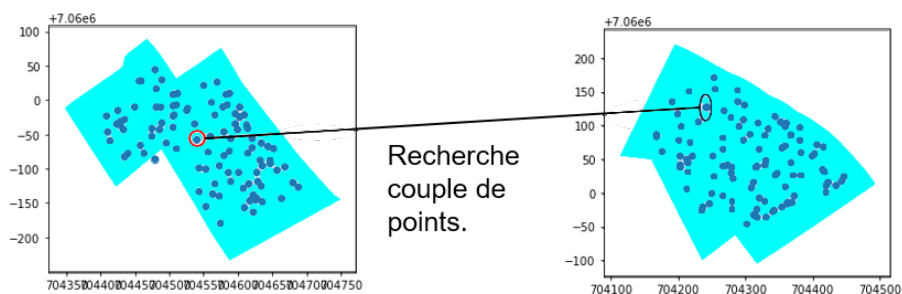
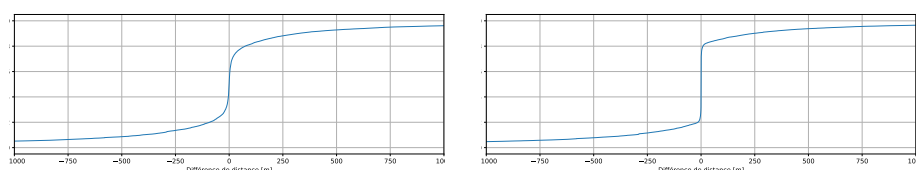


FIGURE 4.2 – Processus de reconstruction de couples de points O/D des déplacements à partir de leurs secteurs de tirage : le secteur de tirage d'origine sur la figure de gauche, le secteur de destination sur celle de droite

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 à partir des coordonnées reconstruites. La figure 4.3 présente les résultats de cette évaluation avec respectivement 10 (figure 4.3(a)) et 100 (figure 4.3(b)) points à générer aléatoirement dans les secteurs de tirage et leur temps d'exécution (TE).



(a) Cas 1 : 10 points aléatoires, TE : 0 h 2 min.

(b) Cas 2 : 100 points aléatoires, TE : 1 h 16 min.

FIGURE 4.3 – Écarts entre les distances réelles et celles obtenues à partir des coordonnées reconstruites.

Le nombre de couples de coordonnées O/D à reconstruire est de 24 630 correspondant aux déplacements totaux pour l'*EMD* 2016 de la *MEL*. Les calculs ont été réalisés sur une machine équipée d'un processeur *Intel Xeon CPU E5-2650 v4 2.2GHz* (2 processeurs) avec 128 Go de RAM. La différence entre les deux distances (réelles et reconstruites) est représentée sur l'axe des abscisses; tandis que la fonction de distribution cumulative (FDC) de cette différence est définie par l'axe des ordonnées.

Comme on pouvait s'y attendre, plus le nombre de points générés est important, plus la différence entre les distances est moindre et le temps d'exécution est considérablement en revanche, élevé. En effet, on passe de 2 minutes pour 10 points à plus de 1 800 minutes pour 500 points (soit 900 fois plus de temps de calcul). Cette importance du temps d'exécution est due à la complexité de notre algorithme de recherche qui est de l'ordre de $O(n^2)$ (quand on ajoute un nouveau point, il faut exécuter $2 \times n$ opérations : l'algorithme parcourt ainsi deux fois la liste des points générés).

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, la figure 4.3(b) montre que la base de la courbe est bien centrée au niveau de l'origine sur l'axe des abscisses. En outre, les écarts entre deux distances restent relativement faibles (autour de 250 à 1 000 mètres). Nous estimons ainsi que ces valeurs visant à reproduire la situation réelle, restent toutefois acceptables pour notre cas d'étude.

4.1.2. Reconstitution des déplacements intermodaux

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 (par exemple, la motorisation, la localisation et le 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* [43]. Par exemple, le métro est le mode de transport urbain le plus important. Il est prédominant sur le tramway et le bus. Ensuite, on trouve les notions de passager sur différents véhicules, pour conclure la relation d'ordre sur les modes doux : vélo, skate, roller, etc. Ainsi, lorsque deux ou plusieurs modes sont utilisés lors du déplacement, le mode le plus important dans cette relation d'ordre sera ainsi utilisé. Par exemple, un déplacement effectué en voiture (en tant que conducteur) puis en train, sera considéré comme effectué en train comme mode principal. Le fichier *trajets* informe sur le ou les modes de transport effectivement utilisés durant le déplacement. En effet, un déplacement est composé d'un ou plusieurs trajets : par exemple, prendre une correspondance bus/métro ou bien voiture/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. Donc, la combinaison de plusieurs moyens de transports publics (*TP*) (e.g., bus et métro) est un déplacement intermodal [36, 37].

Pour reconstituer les déplacements intermodaux, nous avons identifié tous les trajets pour chaque déplacement en fusionnant ces deux fichiers. En outre, nous proposons 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 que conducteur ou passager est considéré comme voiture privée (VP) : $VP_{conducteur} + TP = TP + VP$ ou $VP_{passager} + TP = TP + VP$, par exemple.
- Pour les combinaisons intermodales avec les transports publics, nous considérons tous ces transferts comme un seul pendant le déplacement : par exemple, $VP + TP + TP = TP + VP$ ou encore $vélo + TP + TP = TP + vélo$.
- les combinaisons trop peu représentatives ($VP + vélo$ ou encore $VP + vélo + TP$) ne sont pas traitées. Nous ne considérons pas non plus la combinaison de modes $TP + TP$, dans cette étude.

La section suivante décrit notre approche pour prendre en compte des comportements d'intermodalité dans l'outil de simulation.

4.2. INTÉGRATION DE COMPORTEMENT INTERMODAL DANS MATSim/EQASIM

Le présent travail est basé sur l'outil de simulation *MATSim*, plus précisément sa version intégrant un module de choix discret de mode de transport *eqasim*. Comme évoqué plus haut (cf. section 2.2), la version actuelle de *eqasim* ne permet pas de décrire des comportements de déplacement intermodal de type $VP + TP$. Pour permettre une telle pratique chez les agents, nous avons créé une nouvelle alternative de ce mode de transport. Nous avons aussi défini ses conditions d'utilisation et son module de routage⁽¹⁴⁾.

4.2.1. Création de l'alternative intermodale véhicule/transports publics

La combinaison voiture personnelle et transports publics ($VP + TP$) nécessite des infrastructures dédiées, notamment des parkings relais (PR). Pour rendre possible cette combinaison, nous proposons deux nouveaux modes de transport complémentaires désignés par *car_pt* et *pt_car*, respectivement pour les allers et les retours. La figure 4.4 présente une illustration de notre approche pour permettre les déplacements intermodaux combinant la voiture et les transports publics dans *eqasim*.

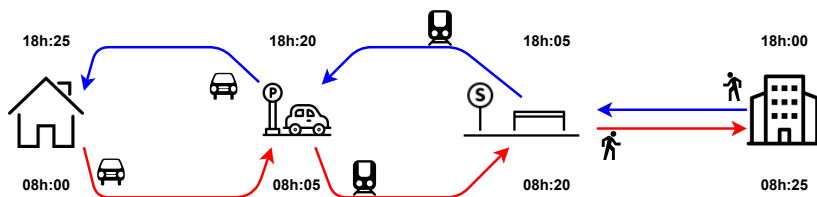


FIGURE 4.4 – Déplacement intermodal combinant la voiture personnelle et les transports publics dans *eqasim* : le mode *car_pt* pour l'aller (tracé rouge), le mode *pt_car* pour le retour (tracé bleu).

⁽¹⁴⁾L'ensemble de nos développements sont accessibles sur github : <https://github.com/diallitoz/eqasim-java-intermodality/tree/develop>.

L'alternative *car_pt* (idem pour *pt_car*) est composée de deux modes de transport, la voiture et les transports publics, 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 obligatoirement le domicile. La destination peut être toute autre activité comme le travail dans le cas de l'exemple présenté à la figure 4.4. 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 4.2.2). 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 (par exemple, le bus, le métro, le tramway ou le train) du parking relais à la destination du déplacement, plus précisément à la station la plus proche (l'individu terminant son déplacement à pied). Nous effectuons 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*) représentant l'alternative intermodale, l'utilisation de la voiture personnelle et des transports publics (*VP + TP*), ont les mêmes caractéristiques. Seules les méthodes de routage sont différentes.

Pour tenir compte de la nouvelle alternative intermodale dans le choix modal, nous avons employé un modèle *logit multinomial* ($MNL^{(15)}$) dénommé *Simple Intermodal MNL* (*SI-MNL*). *SI-MNL* est une variante de régression logistique où la variable à prédire (correspondant au mode de transport) a plus de deux résultats discrets possibles (e.g., *VP*, *TP*, *vélo*, *marche*). Le choix des modèles logit multinomial se justifie notamment par la simplicité de leur mise en œuvre [27, 46]. Ce modèle est fondé sur l'une des propriétés des modèles *MNL*, à savoir l'indépendance entre les alternatives *IIA*⁽¹⁶⁾. Nous supposons donc que les alternatives sont indépendantes et que les termes d'erreur ne sont pas corrélés.

Par la suite, nous avons défini la fonction d'utilité représentant l'alternative intermodale. Cette fonction est définie sur celles de la voiture et des transports publics. L'utilité de l'alternative intermodale *VP + TP* est donc définie par les équations suivantes :

$$U_{i,car_pt} = \beta_{ASC,car_pt} + U_{i,car} - \beta_{inVehicleTime,car} \times \theta_{parkingSearchPenalty} + U_{i,pt} - \beta_{ASC,car} - \beta_{ASC,pt} \quad (4.1)$$

$$U_{i,car} = \beta_{ASC,car} + \beta_{inVehicleTime,car} \times x_{inVehicleTime,car} + \beta_{inVehicleTime,car} \times \theta_{parkingSearchPenalty} + \beta_{accessEgressWalkTime} \times \theta_{accessEgressWalkTime} + \beta_{cost} \times x_{cost,car} \quad (4.2)$$

⁽¹⁵⁾ Acronyme anglo-saxon pour *Multinomial Logit*.

⁽¹⁶⁾ *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*.

$$\begin{aligned}
 U_{i,pt} = & \beta_{ASC,pt} + \beta_{inVehicleTime,pt} \times x_{inVehicleTime,pt} \\
 & + \beta_{accessEgressTime,pt} \times x_{accessEgressTime,pt} \\
 & + \beta_{numberTransfers} \times x_{numberTransfers} \\
 & + \beta_{transferTime,pt} \times x_{transferTime,pt} + \beta_{cost} \times x_{cost,pt} \quad (4.3)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_{i,bicycle} = & \beta_{ASC,bicycle} + \beta_{travelTime,bicycle} \times x_{travelTime,bicycle} \\
 & + \beta_{highAge,bicycle} \times \begin{cases} 1 & \text{if } a_{age} \geq 60 \\ 0 & \text{else.} \end{cases} \quad (4.4)
 \end{aligned}$$

$$U_{i,walk} = \beta_{ASC,walk} + \beta_{travelTime,walk} \times x_{travelTime,walk} \quad (4.5)$$

Où, i : individu, β : paramètres (coefficients) du modèle à estimer, x : variables explicatives (par exemple, le temps de parcours, le coût) du choix du mode, a : attributs de l'individu i impactant son choix comme l'âge, ASC (pour *Alternative Specific Constants*) : constantes spécifiques à l'alternative décrivant la variation de choix non expliquée par les attributs uniquement, θ : des paramètres de calibration qui seront à ajuster (estimer) manuellement dans la simulation. Nous retirons la pénalité relative à la recherche de parking (*parkingSearchPenalty*) appliquée pour l'usage de la voiture uniquement.

4.2.2. Contraintes d'utilisation de l'alternative

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

- Seuls les agents disposant d'une voiture et d'un titre de transport (ticket ou abonnement) de TP peuvent utiliser l'alternative $VP + TP$.
- Il faut utiliser le même parking relais (PR) à l'aller comme au retour.
- Le domicile doit être respectivement l'origine et la destination du déplacement pour car_{pt} et 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 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 4.4), ce routage dépend du parking relais utilisé. Nous avons ainsi développé un module de recherche de parking relais, lequel est maintenant présenté.

4.2.3. *Module de recherche du parking relais (PR)*

Le choix du parking relais est défini comme la décision de sélectionner celui-ci parmi un ensemble de *PR* situés à proximité du domicile de l'agent. Le processus de recherche d'une place de stationnement ainsi que la capacité du *PR* ne sont pas pour l'instant pris en compte afin de proposer un modèle simple. Par conséquent, le choix du *PR* 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 *PR* le plus 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 l'absence de données relatives à l'usage des *PR* pour identifier des préférences individuelles, lorsque nous devrions prendre en compte les éléments comme le temps de recherche, le coût du parking et le temps de marche [18].

L'option est constituée uniquement du *PR* le plus proche du domicile de l'individu. Une fois le choix du *PR* effectué, le module de routage calcule l'itinéraire en voiture du domicile au *PR* sélectionné. Ensuite, il effectue le routage en *TP* du *PR* vers le point d'arrêt le plus proche de la destination. L'agent termine son déplacement à pied pour arriver au point de destination.

4.2.4. *Routage de l'alternative intermodale*

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

- (1) Trouver le *PR* le plus proche du domicile de l'agent (cf. section 4.2.3 sur le mécanisme de choix).
- (2) Effectuer le déplacement en voiture entre le domicile et le *PR* en utilisant le module de routage par défaut de *MATSim*.
- (3) Effectuer le déplacement entre *PR* 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. 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 toujours passer par le même *PR* pour effectuer les déplacements en voiture et en *TP*. En outre, un déplacement *VP + TP* est uniquement du domicile vers le lieu d'autres activités (comme le travail, l'éducation ou les courses). Ainsi, le module de routage de *VP + TP* reçoit les informations suivantes lors de la simulation : l'agent effectuant le déplacement, l'O/D du déplacement et la localisation du parking relais (fournie par le module de recherche de *PR*) nécessaires au calcul de l'itinéraire.

Nous présentons dans la section suivante les résultats des différentes expérimentations effectuées.

5. EXPÉRIMENTATIONS SUR LA MÉTROPOLE EUROPÉENNE DE LILLE (MEL)

Cette section décrit la zone d'étude, les détails de configuration de la simulation et l'approche de calibration du modèle.

5.1. DESCRIPTION DE LA ZONE D'ÉTUDE

La Métropole Européenne de Lille (MEL) est composée de 95 communes avec 1,1 million d'habitants sur une superficie de 672 km². La figure 5.1 donne un aperçu de la répartition spatiale des populations⁽¹⁷⁾ et de la possession d'une voiture (au moins une voiture) par ménage⁽¹⁸⁾ dans les communes de la MEL. Nous constatons une forte concentration de la population au niveau des principales villes, notamment à Lille, Roubaix et Tourcoing; alors que la densité de population reste faible dans les zones périphériques (par exemple, Illies, Fretin, Deülémont 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.

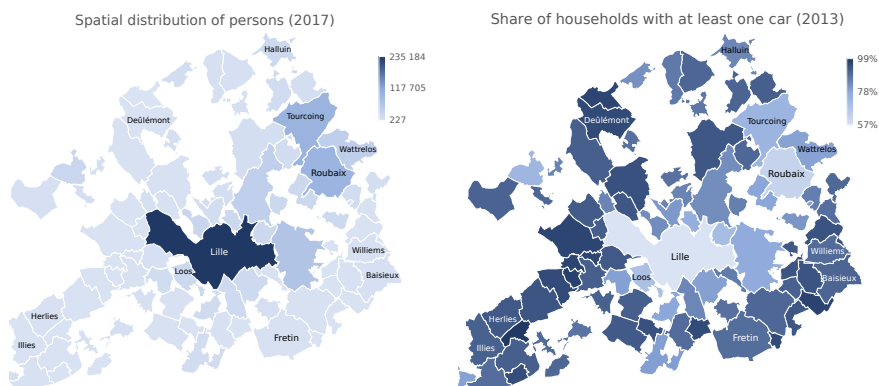


FIGURE 5.1 – Répartition spatiale de la population (à gauche) et possession de voiture par ménage (à droite) dans les communes de la MEL

La figure 5.2 présente les principales caractéristiques socio-démographiques de la population de la MEL en 2017.

⁽¹⁷⁾Source : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/3698339#consulter>

⁽¹⁸⁾Source : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/taux-de-motorisation-des-menages/>

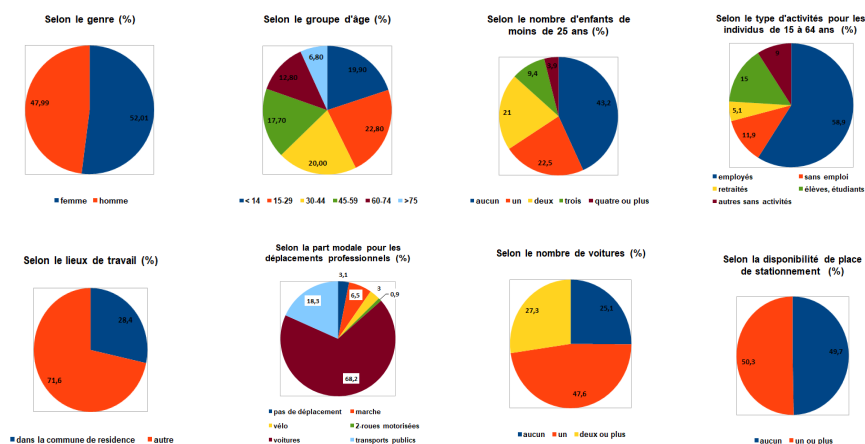


FIGURE 5.2 – Répartition des principales caractéristiques socio-démographiques de la population de la MEL en 2017 (source : INSEE⁽¹⁹⁾).

Nous notons une bonne hétérogénéité au sein de la population avec autant de femmes que d'hommes. La répartition des individus selon l'âge est assez uniforme avec un pourcentage important de jeunes (43 %), 20 % ont moins de 14 ans, 18 % ont un âge compris entre 45 et 59 ans et 19 % sont âgés de plus de 60 ans.

Sur le plan professionnel, 79 % des individus ont une activité dont 59 % de travailleurs. Plus de 70 % de professionnels travaillent à l'extérieur de leur commune de résidence, se traduisant par une forte utilisation de la voiture (68 %) par rapport aux autres modes de transport. On note également que près de la moitié des personnes est susceptible d'être confrontée à un problème de stationnement. Cette dépendance à la voiture impliquant des problèmes de stationnement, des pollutions sonore et atmosphérique, rend la population de la MEL particulièrement intéressante pour étudier des politiques de mobilité visant à réduire son utilisation.

L'enquête ménage-déplacement (EMD) de la MEL, réalisée en 2016, a été utilisée dans cette étude. Cette étude résulte d'une enquête de 9 479 participants (âgés de 5 ans et plus) appartenant à 4 539 ménages, soit environ 0,87 % de la population. Les données de cette enquête sont disponibles en libre accès sur le site de la MEL⁽²⁰⁾. La distribution des parts modales ainsi que les répartitions intermodales issues de l'EMD est présentée à la figure 5.3, en se basant sur notre méthode de reconstruction de la pratique intermodale (cf. section 4.1.2).

Seulement 4 % des déplacements sont intermodaux (combinaison de plusieurs modes de transport mécanisés). 82,5 % des déplacements intermodaux ne comportent

⁽¹⁹⁾<https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=EPCI-245900410#chiffre-cle-1>

⁽²⁰⁾<https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/enquete-deplacement-2016/information/?location=10,50.65641,3.03338&basemap=jawg.streets>

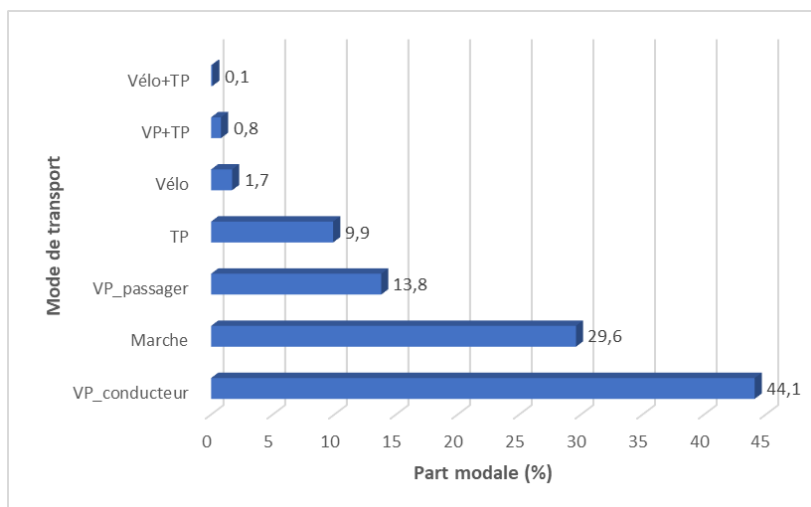


FIGURE 5.3 – Distribution des parts modales avec les alternatives intermodales dans la MEL selon l'EMD 2016.

que des correspondances entre des services de transports publics. Les formes d'intermodalité recherchées par les pouvoirs publics ($VP + TP$) par l'utilisation des parkings relais concernent moins de 16 % de ces déplacements.

Sur le plan de l'offre de transport, la MEL dispose d'un réseau de transports publics constitué de deux lignes de métro (43,6 km), de deux lignes de tramway (22 km) et d'environ 90 lignes de bus. Pour encourager la combinaison $VP + TP$, la MEL s'est engagée en 2016 dans le développement des pôles d'échanges. Au moment de l'étude en 2018, la MEL disposait de douze parkings relais correspondant à 5 005 places de stationnement⁽²¹⁾. De plus, il y a 33 abris vélos indépendamment du stationnement pour les vélos en libre-service. La figure 5.4 donne un aperçu des emplacements des parkings relais (symbole du parking en bleu), des abris vélos (symbole du vélo en rouge), des principales gares, des stations métro et un point de localisation avec le symbole du métro en rouge) et le nombre d'arrêts de bus (nombre dans les cercles rouges) dans la MEL⁽²²⁾.

Nous pouvons aussi montrer une forte connectivité des services de TP (métros, bus, trains) autour des grandes villes comme Lille, Roubaix et Tourcoing. Par contre, dans les zones périphériques (par exemple, 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 de la forte utilisation de la voiture personnelle dans ces zones.

⁽²¹⁾<https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/ilevia-parkingrelais/information/>

⁽²²⁾Référence : https://opendata.lillemetropole.fr/map/reseau_mel/

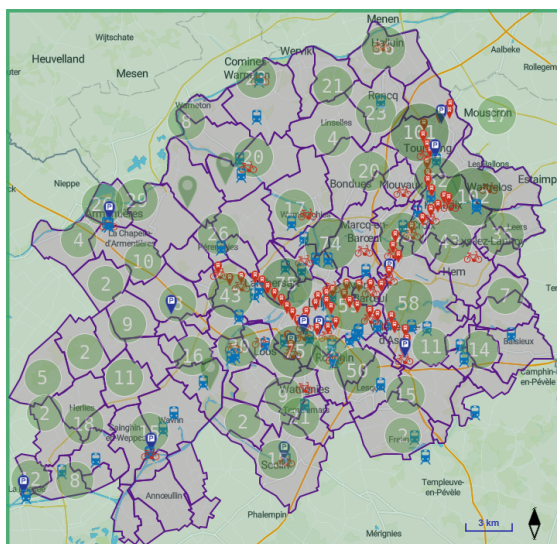


FIGURE 5.4 – Représentation de l’offre de transports publics dans la MEL.

5.2. CONFIGURATION DE LA SIMULATION

Dans le cadre de cette étude, nous avons adapté le synthétiseur initialement développé pour l’Île-de-France [20] pour générer la demande et l’offre de transport. Ce synthétiseur utilise plusieurs sources de données comme le recensement, les enquêtes de déplacements (*EMD* dans notre cas), les flux de mobilités professionnelles et éducatives, afin d’obtenir une population générique plus complète avec des caractéristiques socio-démographiques plus riches et des chaînes d’activités quotidiennes pour les déplacements. Le processus consiste à partir des données de recensement (plus représentative de la population réelle), pour générer des agents artificiels dont les attributs de déplacements seront enrichis par l’*EMD* (par exemple, la possession de matériels de transport ou des activités secondaires). La mise en correspondance est basée sur certaines caractéristiques socio-démographiques (par exemple, l’âge, le genre, le revenu et la catégorie socio-professionnelle) et la représentation géographique (la commune dans ce cas) partagée par ces deux sources de données⁽²³⁾. Dans notre cas, La population synthétique représente un échantillon de 20 % de la population réelle, correspondant à 225 240 agents avec un total de 746 318 déplacements. La taille de la population synthétique se justifie principalement pour des raisons de temps calcul de simulation. À titre indicatif, le temps de calcul avec une telle population pour une simulation de 300 itérations sur une machine Intel Xeon CPU E5-2650 v4 2,2 GHz et 128 Go de RAM dure environ 18 heures.

⁽²³⁾La version adaptée du synthétiseur est également disponible sur github <https://github.com/diallitoz/eqasim-synthetic-population>

Pour la phase de calibration, le scénario utilisé a été calibré en ajustant les paramètres des fonctions d'utilité des alternatives du modèle de choix discret afin d'obtenir une sortie de la simulation proche des données empiriques ou de référence (*EMD*), en termes de répartition modale et de distribution de distance. Nous avons particulièrement ajusté 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 réalisée 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.

5.3. RÉSULTATS

Dans cette section, nous présentons les résultats de la phase de calibration et l'évaluation de l'utilisation des *PR* dans les déplacements combinant la voiture personnelle et les *TP*.

5.3.1. Estimation des paramètres du modèle SI-MNL

Le tableau 5.1 présente les paramètres estimés du modèle *SI-MNL* à partir d'un tiers des données issues de l'*EMD* 2016 de la *MEL* [12]. Le modèle a été estimé avec *PandasBiogeme* [6].

TABLE 5.1 – Valeurs des paramètres du modèle de choix modal (*SI-MNL*)

Alternatives	Paramètres	Value	p-value	Robust Std err
car	$\beta_{ASC,car}$	-1,19	$3,77 \cdot 10^{-15}$	0,132
	$\beta_{inVehicleTime,car}$	-0,005 1 min ⁻¹	0,591	0,008 08
pt	$\beta_{ASC,pt}$	-2,24	0,0	0,103
	$\beta_{inVehicleTime,pt}$	0,002 91 min ⁻¹	0,061 8	0,001 47
	$\beta_{accessEgressTime,pt}$	-0,016 3 min ⁻¹	0,884	0,041 4
	$\beta_{numberTransfers}$	-0,168	0,999	2,19
	$\beta_{transferTime,pt}$	-0,823 min ⁻¹	0,973	0,4
bicycle	$\beta_{ASC,bicycle}$	-1,64	0,0	0,205
	$\beta_{travelTime,bicycle}$	-0,112 min ⁻¹	0,0	0,014 7
	$\beta_{highAge,bicycle}$	0,009 25	0,040 2	0,004 84
Walk	$\beta_{ASC,walk}$	1,77	0,0	0,153
	$\beta_{travelTime,walk}$	-0,137 min ⁻¹	0,0	0,006 18
Other	β_{cost}	-0,293 euro ⁻¹	$2 \cdot 10^{-15}$	0,037
Calibration	$\theta_{parkingSearchPenalty}$	4	–	–
	$\theta_{accessEgressWalkTime}$	4	–	–
	β_{ASC,car_pt}	1,25	–	–

Nous montrons qu'il est statistiquement significatif avec un *Init log likelihood* (LL) égal à $-8,668\,555$, tandis que le *log likelihood* estimé est de $-5,086\,908$. Le LL initial est estimé uniquement avec des constantes. Les paramètres estimés sont statistiquement significatifs, sauf ceux liés à la durée du temps passé dans la voiture ($\beta_{inVehicleTime,car}$) et les TP ($\beta_{inVehicleTime,pt}$) et le temps d'entrée/sortie des TP ($\beta_{accessEgressTime,pt}$, $\beta_{numberTransfers}$ et $\beta_{transferTime,pt}$) avec une valeur p supérieure à $0,5$.

La qualité de notre modèle est également évaluée par le signe des paramètres. Le signe de β_{time} sauf pour les TP est négatif, reflétant une *dés-utilité* de ces modes de transport. L'utilité marginale du temps passé en TP est positive, car les navetteurs peuvent par exemple réaliser autre chose pendant leur trajet. Cependant, le temps passé lors du transfert impacte négativement ce mode. Une analyse similaire montre que β_{cost} est négatif : plus une alternative a un coût d'utilisation élevé, moins elle sera attractive.

5.3.2. Calibration de la simulation

La figure 5.5 donne un aperçu de la situation du trafic en début de matinée en diminuant la capacité du réseau à 18 %, afin de correspondre à la taille de la population simulée (20 %).



FIGURE 5.5 – Trafic automobile à partir de 8 h 30 du matin. Les véhicules en vert circulent à vitesse normale, tandis que ceux en rouge sont dans un état de congestion.

Nous notons que le flux du trafic est important aux heures de pointe (8 h 30), avec pour conséquence l'apparition de micro congestions par endroit du réseau de transport

(en rouge). Nous remarquons 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 empruntée.

La figure 5.6 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 5.6(a)), $\beta_{ASC,car_pt} = 10$ (figure 5.6(b)), $\beta_{ASC,car_pt} = 2$ (figure 5.6(c)), et $\beta_{ASC,car_pt} = 1,25$ (figure 5.6(d)).

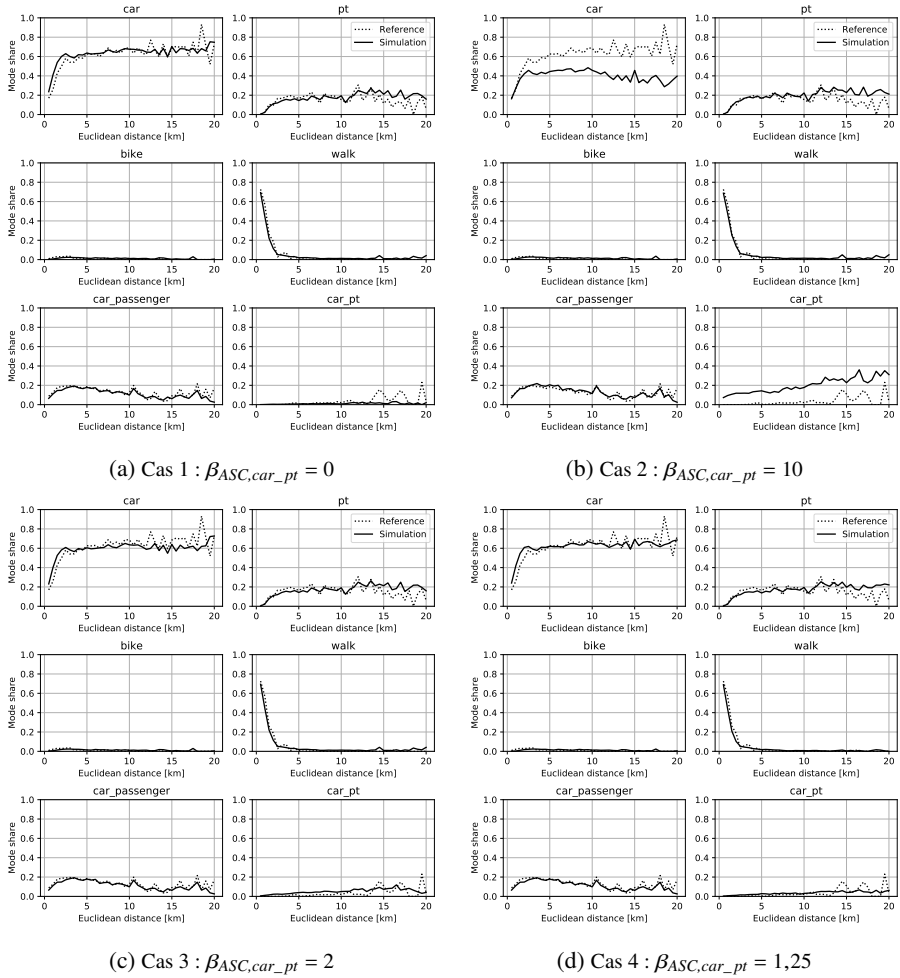
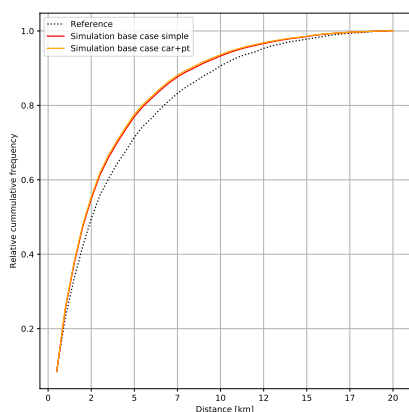


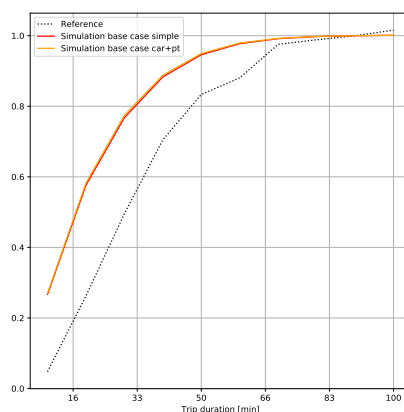
FIGURE 5.6 – Résultats de la phase de calibration pour différentes valeurs de β_{ASC,car_pt} .

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 5.6(d)) produit une sortie de simulation similaire à la situation de référence. Nous notons une différence importante pour les longs déplacements (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 5.7 donne un aperçu de la distribution des distances et des durées de déplacements effectués en voiture personnelle issues de la simulation (avec ou sans l'alternative intermodale *VP + TP*) et de l'enquête ménage déplacement (*EMD*).



(a) Distances des déplacements effectués uniquement en voiture personnelle



(b) Durées des déplacements effectués uniquement en voiture personnelle

FIGURE 5.7 – Distribution des distances et temps de parcours en simulation (avec (orange) ou sans (rouge) l'alternative intermodale *VP+TP*) et dans l'*EMD* (ligne pointillée) en voiture personnelle uniquement

On peut voir que les distances de déplacements issues de la simulation correspondent parfaitement aux données de référence de l'*EMD*. On note des variations des temps de déplacements effectués en voiture personnelle. Ces variations de manière générale, peuvent s'expliquer par les données de référence où les durées de déplacements sont rapportées par les personnes enquêtées de manière « arrondie » plutôt que des valeurs exactes. Par la suite les valeurs du cas 4 ont été retenues pour la suite de l'étude notamment pour l'évaluation des *PR*.

5.3.3. Évaluation de l'utilisation des PR de la MEL

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 sont basés sur des données de sortie redressées à 100 % pour correspondre à la population réelle de la MEL. La figure 5.8 présente la fréquence d'utilisation (nombre d'entrées) journalière des PR pour la ville de Lille dans le sens des départs (déplacements commençant par la voiture personnelle). La période d'utilisation en abscisse et le nombre d'entrées des PR est en ordonnée. La capacité de chaque PR est fournie en parenthèses pour donner une idée du taux de remplissage.

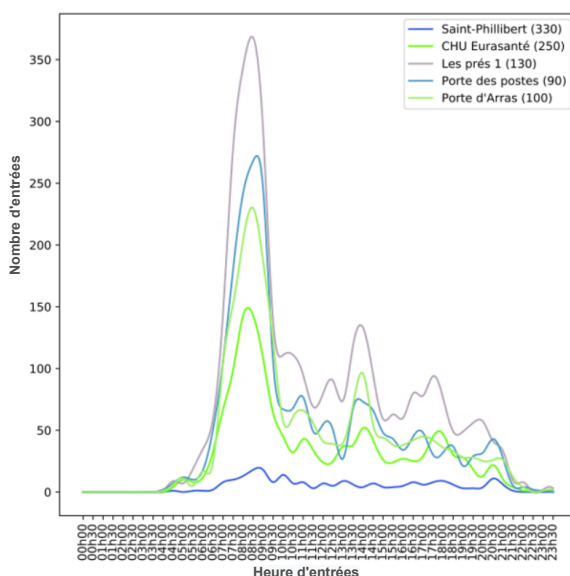


FIGURE 5.8 – Fréquence d'utilisation (nombre d'entrées) journalière des PR situés à Lille

Nous observons une forte affluence dans les PR pendant les heures de pointe (par exemple, entre 5 h 30 et 9 h 00), ce qui semble aussi intuitivement cohérent. Les parkings relais situés dans la zone lilloise sont ainsi 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).

Nous nous sommes interrogés sur le fait de vérifier si les PR 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 5.2 nous renseigne sur le nombre d'entrées des PR (les capacités sont indiquées entre des parenthèses) entre 5 h 30 et 9 h 00 du matin dans le sens du départ.

TABLE 5.2 – Nombre d’entrées cumulées des 12 parkings relais (*PR*) de la *MEL* entre 5 h 30 et 9 h 00 du matin

Parkings relais	Nombre d’entrées	Parkings relais	Nombre d’entrées
Saint Philibert (330)	100	Pont de Neuville (42)	1 390
CHU - Eurasanté (250)	690	Armentières (450)	730
Les Près 1 (130)	1 370	Don Sainghin (290)	170
Porte des Postes (90)	2 050	La Bassée (166)	90
Porte d’Arras (100)	780	Seclin (370)	130
Gare de Tourcoing (90)	1 560	4 Cantons (2 088)	910

Les parkings relais (*PR*) en gras présentent des dépassements de capacité durant la période indiquée. Par manque de données réelles sur la fréquentation des *PR*, 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 *PR*. En effet, rappelons que le choix du *PR* est fonction de celui qui est le plus proche du domicile de l’agent. Par exemple, nous mettons en évidence une forte présence d’agents dans le voisinage des *PR* : le **Gare de Tourcoing** et le **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 *PR* **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 5.9 donne un aperçu de la répartition des agents de la zone d’étude. Nous observons effectivement que les parkings relais les plus utilisés sont situés dans des zones denses (Lille, Villeneuve-d’Asq et Tourcoing). Le *PR* Saint-Philibert est un cas d’usage assez particulier qui ressort bien dans la simulation ; ce *PR* est éloigné des arrêts de *TP*. Cette situation augmente donc le temps de déplacement lors du passage dans ce *PR* pour utiliser ensuite la *TP*. Les parkings relais comme La Bassée 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 5.10 présente quelques caractéristiques socio-démographiques des utilisateurs de l’intermodalité et les motifs du déplacement.

La grande majorité des utilisateurs du mode *VP + TP* ont un âge compris entre 18-54 ans. Nous pouvons voir que 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. Nous notons également

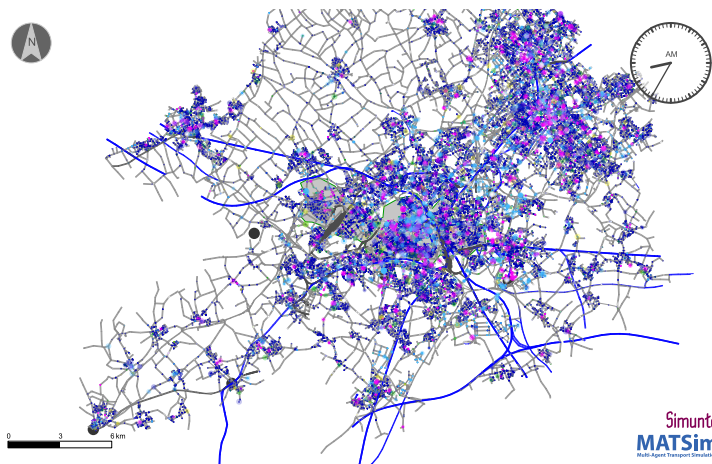


FIGURE 5.9 – Localisation des agents (en bleu) sur le réseau. Les agents en violet commencent leurs activités. Les parkings relais sont représentés par des points noirs.

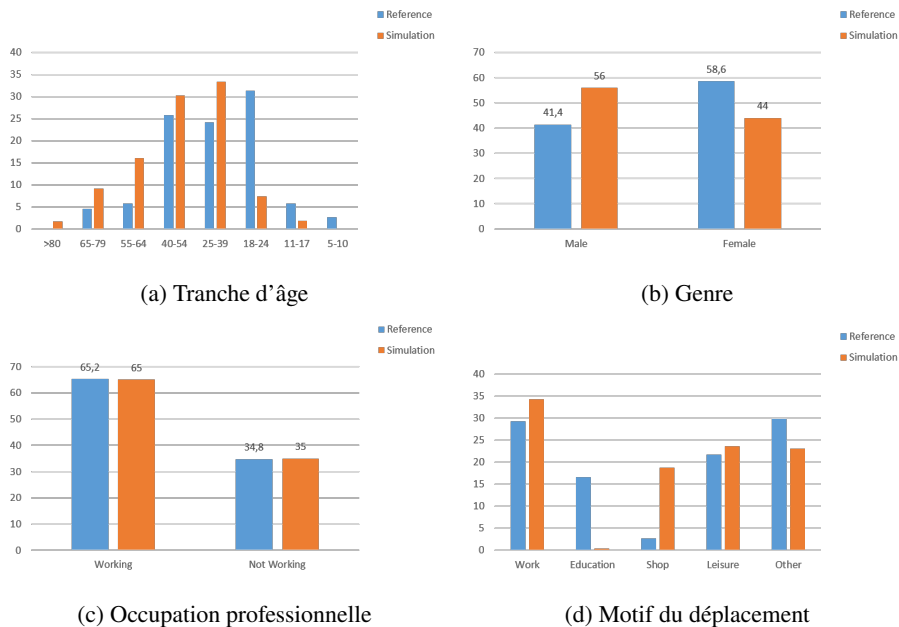


FIGURE 5.10 – Quelques caractéristiques socio-démographiques des utilisateurs de l'alternative intermodale *VP + TP*.

une cohérence entre les deux sorties sur le motif du déplacement concernant le travail,

les loisirs et d'autres motifs (par exemple, les visites). Le motif éducatif ne donne pas le résultat souhaité dans la simulation ; tandis que les achats comme le motif de déplacements simulés dépassent ceux des données de référence.

Les résultats obtenus des différentes simulations sont assez cohérents, traduisant aussi une part de réalisme dans le comportement des individus durant leurs déplacements. Dans la section suivante, nous allons discuter des limites de notre approche et des pistes d'amélioration de notre travail.

5.4. LIMITATIONS

Notre approche méthodologique de création ou de génération de scénario de transport à partir de données ouvertes anonymisées présente des limites discutées dans cette section.

La précision de l'algorithme de reconstruction des coordonnées 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 des 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 (figure 4.3). Une solution à ce problème serait d'utiliser des bases de données géographiques comme la *BD TOPO* de l'*IGN*, la base permanente des équipements (*BPE*) de l'*INSEE* et les données *OSM* pour générer un ensemble fixe d'emplacements O/D correspondant aux zones d'activités éventuelles (par exemple, un domicile, un lieu de travail, une école ou un commerce). Cette approche pourrait éviter de générer un trop grand nombre de points aléatoires irréalistes (par exemple, des couples de points proches pour des distances euclidiennes plus importantes). Par conséquent le temps de mise en correspondance serait réduit. Cette approche permettrait également d'améliorer la qualité des coordonnées reconstruites en tenant compte de la réalité du terrain.

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 *VP* et *TP* sont fortement dépendants des installations de parkings relais. Par conséquent, il pourrait 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 [10] :

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

Malheureusement, à notre connaissance, il n'existe pas de base de données contenant ces informations. De plus, la construction d'un modèle *MNL* imbriqué comme proposé dans [27] permettrait de mieux prendre en compte les (éventuelles) dépendances entre *VP* et *TP* dans la combinaison des deux modes. Dans le même ordre d'idée, le choix du *PR* pourrait être amélioré en tenant compte de la destination du déplacement. En effet, le *PR* situé à proximité du domicile de l'agent peut engendrer plus de temps (et de transferts) de déplacement notamment, quand il est dans une position opposée. Un autre *PR* offrirait une durée de déplacement plus optimale. Les données d'utilisation des *PR* permettraient de catégoriser les individus selon leurs pratiques (p.ex., les individus qui préfèrent le *PR* à proximité de leur domicile, ou qui souhaitent passer peu de temps dans les *TP* ou qui n'aiment pas les transferts). En fonction du profil de l'agent, il lui sera attribué le *PR* adapté.

L'une des principales limites pour la création des scénarios de transport reste la qualité des données disponibles. Pour notre cas d'étude sur l'intermodalité, il existe très peu de sources de données sur le périmètre d'étude (*MEL*). Cette situation impacte sur la mise en place des modèles multi-agent afin de reproduire des sorties plus proches de la réalité. Par exemple, les données sur l'utilisation des *PR* peuvent être utiles pour calibrer et évaluer le modèle de simulation avec l'alternative intermodale *VP + TP*. En outre, l'utilisation des données de comptage urbain (recensement du nombre de véhicules passant à un endroit) permettrait aussi de calibrer le modèle (par exemple, la matrice O/D et le réseau).

6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé 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 (par exemple, la commune, la métropole ou la région). Cette étude s'est focalisée sur les combinaisons intermodales entre une voiture personnelle (*VP*) et les transports publics (*TP*) au travers des parkings relais (*PR*). L'approche basée agent, comparativement aux modèles traditionnels à quatre étapes, est particulièrement adaptée pour étudier les comportements de déplacement intermodal. Celle-ci nécessite en entrée des données désagrégées pour reproduire le plus fidèlement possible les comportements de déplacements individualisés.

Nous avons montré dans un premier temps comment reconstruire les informations nécessaires (par exemple, les coordonnées des origines/destinations des déplacements, les combinaisons intermodales utilisées lors des déplacements) à partir des sources de données utilisées pour l'estimation du choix modal et la génération de scénarios de simulation multi-agent. Ensuite, pour tenir compte de l'alternative intermodale (combinaison de la voiture personnelle et les transports publics) dans le processus de décision du choix modal, nous avons proposé un modèle de choix discret *multinomial logit* (*Simple Intermodal MNL* (*SI-MNL*)). Enfin, nous avons intégré ce modèle dans l'outil de simulation *MATSim/eqasim* en créant de nouveaux modes de transport (*pt_car*

et *car_pt*), tout en définissant leurs contraintes d'utilisation et le routage intermodal via les *PR*.

Nos expérimentations ont été effectuées sur les données de la Métropole Européenne de Lille (*MEL*). La *MEL* est une communauté d'agglomération composée de 95 communes. Nous avons réalisé au total deux scénarios de simulation pouvant être résumés comme suit :

- Reconstitution de la situation de référence de la mobilité sur le territoire de la *MEL* avec un focus sur la combinaison *VP + TP*.
- Évaluation de l'usage des parkings relais (*PR*) dans les comportements de déplacements intermodaux. Nous avons constaté une cohérence entre les sorties de la simulation et l'utilisation réelle des *PR*, notamment aux heures de pointe. Les *PR* situés à l'entrée de Lille connaissent une forte utilisation, souvent avec des dépassements de capacité pour certains parkings. Contraints par l'absence de données réelles sur l'utilisation des *PR*, 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 reproduit les parts d'individus pratiquant l'intermodalité, pour les groupes de personnes âgées de 18 à 54 ans.

Dans le cadre de travaux futurs, nous prévoyons d'évaluer l'impact de la mise en place d'un péage urbain pour accéder au centre-ville. L'objectif est d'identifier le montant de la taxe de péage nécessaire à la réduction d'un pourcentage donnée de l'utilisation de la voiture personnelle dans ces zones. Nous voulons ainsi étudier les comportements d'intermodalité des usagers combinant la voiture personnelle et des transports publics, au travers de l'utilisation des parkings relais pour éviter de payer ce péage urbain.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été soutenu par la région des Hauts-de-France et le ministère de l'industrie. Les auteurs remercient aussi la Métropole Européenne de Lille pour l'obtention des données. Les auteurs remercient également les rapporteurs anonymes pour leurs remarques constructives en vue d'améliorer la présentation de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. ALVAREZ LOPEZ, M. BEHRISCH, L. BIEKER-WALZ, J. ERDMANN, Y.-P. FLÖTTERÖD, R. HILBRICH, L. LÜCKEN, J. RUMMEL, P. WAGNER & E. WIEBNER, « Microscopic Traffic Simulation using SUMO », in *The 21st IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, 2018.
- [2] ANYLOGIC, « AnyLogic : des solutions et outils logiciels de modélisation de simulation au service des entreprises », 2018, <https://www.anylogic.fr/>, [Accessed October-25th-2018].
- [3] M. BALMER, « Travel demand modeling for multi-agent transport simulations : Algorithms and systems », Thèse, ETH Zurich, 2007.
- [4] A. L. BAZZAN & F. KLÜGL, « A review on agent-based technology for traffic and transportation », *The Knowledge Engineering Review* **29** (2014), n° 3, p. 375-403.

- [5] M. E. BEN-AKIVA, S. R. LERMAN & S. R. LERMAN, *Discrete choice analysis : theory and application to travel demand*, vol. 9, MIT press, 1985.
- [6] M. BIERLAIRE, « A short introduction to PandasBiogeme », Tech. report, Transport and Mobility Laboratory, ENAC, EPFL, 2020.
- [7] A. BONHOMME, P. MATHIEU & S. PICAULT, « Simuler le trafic routier à partir de données réelles », *Revue d'Intelligence Artificielle* **30** (2016), n° 3, p. 329-352.
- [8] P. BONNEL, « Prédiction de la demande de transport », Thèse, Université Lumière-Lyon II, 2002.
- [9] O. CATS, T. REIMAL & Y. SUSILO, « Public transport pricing policy : Empirical evidence from a fare-free scheme in Tallinn, Estonia », *Transportation Research Record* **2415** (2014), n° 1, p. 89-96.
- [10] CEREMA, « Modélisation multimodale des déplacements de voyageurs Concevoir un modèle de choix modal », Tech. report, Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement, 2015.
- [11] S. G. DACKO & C. SPALTEHOLZ, « Upgrading the city : Enabling intermodal travel behaviour », *Technological Forecasting and Social Change* **89** (2014), p. 222-235.
- [12] A. O. DIALLO, G. LOZENGUEZ, A. DONIEC & R. MANDIAU, « Agent-based simulation from anonymized data : An application to Lille metropolis », in *The 12th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2021)*, March 23-26, 2021, Warsaw, Poland, vol. 184, Elsevier, 2021, p. 164-171.
- [13] ———, « 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)*, vol. 1, 2021, p. 265-272.
- [14] ———, « Usage des parkings relais dans les comportements de déplacements intermodaux : génération de demande de population d'agents à partir de données réelles », in *Collectifs cyber-physiques – Vingt-neuvièmes Journées Francophones sur les Systèmes Multi-Agents*, Bordeaux, France, June 28-30, 2021 (J. Jamont, éd.), Cépaduès, 2021, p. 83-92.
- [15] ———, « Agent-Based Intermodal Behavior for Urban Toll », in *Advances and Trends in Artificial Intelligence. Theory and Practices in Artificial Intelligence - 35th International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems, IEA/AIE 2022, Kitakyushu, Japan, July 19-22, 2022, Proceedings* (H. Fujita, P. Fournier-Viger, M. Ali & Y. Wang, eds.), Lecture Notes in Computer Science, vol. 13343, Springer, 2022, p. 397-408.
- [16] ———, « Estimation of minority modes of transportation based on machine learning approach », in *The 13th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2022)*, March 22-25, 2022, Porto, Portugal (E. M. Shakshuki & A. Yasar, eds.), Procedia Computer Science, vol. 201, Elsevier, 2022, p. 265-272.
- [17] A. GRIGNARD, P. TAILLANDIER, B. GAUDOU, D. A. VO, N. Q. HUYNH & A. 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.
- [18] S. HESS & J. 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.
- [19] S. HÖRL & M. BALAC, « Introducing the eqasim pipeline : From raw data to agent-based transport simulation », *Procedia Computer Science* **184** (2021), p. 712-719.
- [20] ———, « Synthetic population and travel demand for Paris and Île-de-France based on open and publicly available data », *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* **130** (2021), article no. 103291.
- [21] S. HÖRL, M. BALAC & K. W. AXHAUSEN, « Pairing discrete mode choice models and agent-based transport simulation with MATSim », in *Transportation Research Board (TRB) 98th Annual Meeting*, Transportation Research Board, 2019.
- [22] A. HORN, K. NAGEL & K. AXHAUSEN (eds.), *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*, Ubiquity Press, 2016, 618 pages.
- [23] M. HUSTON, D. DEANGELIS & W. POST, « New computer models unify ecological theory : computer simulations show that many ecological patterns can be explained by interactions among individual organisms », *BioScience* **38** (1988), n° 10, p. 682-691.

- [24] W. B. JONES, C. R. CASSADY & R. O. BOWDEN JR, « Developing a standard definition of intermodal transportation », *Transportation Law Journal* **27** (2000), n° 3, p. 345-352.
- [25] B. KICKHOFFER, D. HOSSE, K. TURNER & A. TIRACHINIC, « Creating an open MATSim scenario from open data : The case of Santiago de Chile », Working Paper 16-02, TU Berlin, Transport System Planning and Transport Telematics, 2016.
- [26] M. KILANI, S. PROOST & S. VAN DER LOO, « Road pricing and public transport pricing reform in Paris : complements or substitutes ? », *Economics of Transportation* **3** (2014), n° 2, p. 175-187.
- [27] D. KRAJZEWICZ, M. HEINRICH & S. BEIGE, « Embedding intermodal mobility behavior in an agent-based demand model », *Procedia computer science* **130** (2018), p. 865-871.
- [28] L. LECLERCQ & C. BECARIE, « Meso lighthill-whitham and richards model designed for network applications », in *Transportation Research Board (TRB) 91st Annual Meeting*, n° 12-0387, 2012.
- [29] A. L'HOSTIS & T. 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 », Rapport technique, Laboratoire Ville, Mobilité, Transport, École des Ponts — Paris Tech, 2012.
- [30] M. J. LIGHTHILL & G. B. WHITHAM, « On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads », *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* **229** (1955), n° 1178, p. 317-345.
- [31] R. MANDIAU, A. CHAMPION, J. AUBERLET, S. ESPIÉ & C. KOLSKI, « Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation », *Appl. Intell.* **28** (2008), n° 2, p. 121-138.
- [32] M. G. McNALLY, « The four step model », in *Handbook of transport modelling* (D. A. Hensher & K. J. Button, eds.), vol. 1, Emerald Group Publishing Limited, 2 éd., 2007, p. 35-53.
- [33] M. G. McNALLY & C. R. RINDT, « The activity-based approach », in *Handbook of Transport Modelling*, vol. 1, Emerald Group Publishing Limited, 2 éd., 2007, p. 55-73.
- [34] E. J. MILLER & M. J. ROORDA, « Prototype model of household activity-travel scheduling », *Transportation Research Record* **1831** (2003), n° 1, p. 114-121.
- [35] K. C. MOUSKOS, M. BOILE, N. PARKER et al., « Technical solutions to overcrowded park and ride facilities », Tech. report, New Jersey. Dept. of Transportation, 2007.
- [36] L. D. OLVERA, A. GUÉZÉRÉ, D. PLAT & P. POCHE, « Intermodality in a context of poor transport integration : the case of Sub-Saharan African cities », in *Transport Research Arena (TRA) 5th Conference*, 2014.
- [37] R. OOSTENDORP & L. 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 », *Journal of Transport Geography* **71** (2018), p. 72-83.
- [38] F. POLETTI, P. M. BÖSCH, F. CIARI & K. W. AXHAUSEN, « Public transit route mapping for large-scale multimodal networks », *ISPRS International Journal of Geo-Information* **6** (2017), n° 9, article no. 268.
- [39] O. E. RAMADAN & V. P. SISIPIKU, « A critical review on population synthesis for activity- and agent-based transportation models », in *Transportation Systems Analysis and Assessment* (S. D. Luca, R. D. Pace & B. Djordjevic, eds.), IntechOpen London, 2019, p. 1-16.
- [40] S. RASOULI & H. TIMMERMANS, « Activity-based models of travel demand : promises, progress and prospects », *International Journal of Urban Sciences* **18** (2014), n° 1, p. 31-60.
- [41] W. W. RECKER, « The household activity pattern problem : general formulation and solution », *Transportation Research Part B : Methodological* **29** (1995), n° 1, p. 61-77.
- [42] P. I. RICHARDS, « Shock waves on the highway », *Operations research* **4** (1956), n° 1, p. 42-51.
- [43] S. ROUX & J. ARMOOGUN, *Mise en perspectives des Enquête Nationales Transport*, INRETS/DEST Département Economie et Sociologie des Transports, 2008.
- [44] S. RUSSELL & P. NORVIG, *Artificial Intelligence : A Modern Approach*, second éd., Pearson Education, 2003.
- [45] A. TIRACHINI & D. A. HENSHER, « Multimodal transport pricing : first best, second best and extensions to non-motorized transport », *Transport Reviews* **32** (2012), n° 2, p. 181-202.
- [46] K. E. TRAIN, *Discrete choice methods with simulation*, Cambridge university press, 2009.
- [47] J.-P. TREUIL, A. DROGOU & J.-D. ZUCKER, *Modélisation et simulation à base d'agents : exemples commentés, outils informatiques et questions théoriques*, Dunod, 2008.

- [48] U. WILENSKY & W. RAND, *An introduction to agent-based modeling : modeling natural, social, and engineered complex systems with Netlogo*, MIT Press, 2015.
- [49] M. WOOLDRIDGE, *An introduction to multiagent systems*, John Wiley & Sons, 2009.
- [50] B. F. YAMÉOGO, P. GASTINEAU, P. HANKACH & P.-O. VANDANJON, « Comparing methods for generating a two-layered synthetic population », *Transportation research record* **2675** (2021), n° 1, p. 136-147.
- [51] D. ZIEMKE, I. KADDOURA & K. NAGEL, « The MATSim Open Berlin Scenario : A multimodal agent-based transport simulation scenario based on synthetic demand modeling and open data », *Procedia computer science* **151** (2019), p. 870-877.

ABSTRACT. — Due to transport systems' negative externalities (*e.g.*, congestion, CO₂ emissions), it is essential to have well-adapted simulation tools to study a sustainable mobility policy. In this paper, we propose a multi-agent framework allowing to evaluate existing intermodality policies and to be able to explore new ones. It investigates a discrete choice model considering the intermodal alternative, combining private car and public transport for the agent's better decision-making of the modal choice. As experiments, we evaluate the sustainable mobility policy based on providing park-and-ride facilities to promote intermodality in a large-scale multimodal network. We highlight the role played by these infrastructures in intermodal practices, particularly for trips from peripheral areas to the hyper-center. The proposed simulation framework can be used to support decision-making to evaluate different mobility measures.

KEYWORDS. — Agent-based model (ABM), Logit model, Lnter-modality.

Manuscrit reçu le 12 janvier 2022, accepté le 26 juin 2023.