

Modélisation prospective de la mobilité. Modèle OPEM Transport

Gauthier Grosjean

▶ **To cite this version:**

Gauthier Grosjean. Modélisation prospective de la mobilité. Modèle OPEM Transport. Gestion et management. 2014. dumas-01904930

HAL Id: dumas-01904930

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01904930

Submitted on 4 Dec 2018

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

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

Modélisation prospective de la mobilité

Modèle OPEM Transport

Mémoire de stage

Master Transports Urbains et Régionaux de Personnes

Présenté par : Gauthier GROSJEAN

Tuteur entreprise : Patrice NOGUES

Tuteur universitaire : Patrick BONNEL

Soutenu le 12 septembre 2014

Fiche bibliographique

[Intitulé du diplôme]

Master Professionnel Transports Urbains et Régionaux de Personnes (TURP)

[Tutelles]

École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE)
Université Lumière Lyon 2

[Titre]

Modélisation prospective de la mobilité

[Sous-titre]

Modèle OPEM Transport

[Auteur]

Gauthier GROSJEAN

[Membres du Jury (nom et affiliation)]

Patrick BONNEL (LET – ENTPE)
Jean-Pierre NICOLAS (LET – ENTPE)
Patrice NOGUES (EIFER)

[Nom et adresse du lieu du stage]

EIFER – European Institute for Energy Research
Emmy-Noether-Straße 11
76131 KARLSRUHE
Allemagne

[Résumé]

OPEM Transport est un modèle de prospective énergétique développé par EIFER, permettant de simuler l'impact des scénarios de politiques de déplacements sur les consommations énergétiques et les émissions polluantes issues de la mobilité à l'échelle d'une agglomération.

Ce stage a pour objectif de rendre cet outil opérationnel pour une utilisation commerciale par les équipes d'ingénierie, dans un compromis entre facilité d'intégration des données d'entrée et précision des données de sortie.

<table>
<tr><td>[Mots clés]

Modélisation de la demande de transport, modèle à quatre étapes, prospective</td><td>Diffusion :

papier : [oui/~~non~~]*

électronique : [oui/~~non~~]*

(* : Rayer la mention inutile)

Confidentiel jusqu'au : 30 août 2017</td></tr>
</table>

[Date de publication]	[Nombre de pages]	[Bibliographie (nombre)]
31 août 2014	73	

Publication data form

[Entitled of Diploma] Master Degree in Urban and Regional Passenger Transport
[Supervision by authorities] École Nationale des Travaux Publics de l'État (ENTPE) Université Lumière Lyon 2
[Title] Foresight modelling of mobility
[Subtitle] OPEM Transport model
[Author] Gauthier GROSJEAN
[Members of the Jury (name and affiliation)] Patrick BONNEL (LET – ENTPE) Jean-Pierre NICOLAS (LET – ENTPE) Patrice NOGUES (EIFER)
[Place of training] EIFER – European Institute for Energy Research Emmy-Noether-Straße 11 76131 KARLSRUHE Germany
[Summary] OPEM Transport is an energy forecasting model developed by EIFER, which simulates the impact of transport policies on mobility-related energy consumptions and polluting emissions at an urban area scale. This internship aims to make this tool operational for a commercial use by the engineering teams, in a compromise between easy data integration and outputs accuracy.

[Key words]	Distribution statement :
Transportation forecasting, four-step model, foresight	paper : [yes/~~no~~]* electronic : [yes/~~no~~]* (* : scratch the useless mention) Declassification date : 30 August 2017

[Publication date]	[Number of pages]	[Bibliography]
31 August 2014	73	

Remerciements

En guise de propos liminaire, je tiens à remercier tout particulièrement :

- M. Patrice NOGUES, tuteur entreprise, pour son suivi régulier et ses précieux conseils de cadrage méthodologique ;
- M. Benjamin MOUSSEAU, pour ses éclairages concernant les spécifications du modèle MARS et des formulations originelles d'OPEM Transport ;
- Mme Élise NIMAL, pour son assistance relative à l'utilisation des logiciels de traitement de bases de données et des systèmes d'informations géographiques ;
- M. Patrick BONNEL, tuteur universitaire, pour son ouvrage *Prévoir la demande de transport* (Presses de l'ENPC, 2004) qui a été extrêmement précieux dans la compréhension des principes de la modélisation de la demande de transport ;

Enfin, je remercie l'ensemble des personnes avec qui mes rapports furent aussi divers qu'enrichissants.

Sommaire

Introduction **7**

I. Contexte et enjeux **8**

I.1. Enjeux énergie-climat de la mobilité 8

I.2. Enjeux pour la modélisation 9

I.3. État des lieux de la mobilité locale 10

II. Problématique **12**

III. Modèle à quatre étapes **14**

III.1. Étapes du modèle 14

III.2. Modèle agrégé vs modèle désagrégé 15

IV. Développement du modèle **16**

IV.1. Spécifications 16

IV.2. Données disponibles 16

IV.3. Méthodologie 19

V. Étapes du modèle **32**

V.1. Introduction 32

V.2. Étape de génération 33

V.3. Étape de distribution 34

V.4. Étape de choix modal 36

VI. Critiques et perspectives **50**

VI.1. Résultats 50

VI.2. Acquisition et traitement des données 50

VI.3. Offre de transport 51

VI.4. Segmentation des motifs 52

Conclusion **53**

Bibliographie **54**

Annexes **56**

Table des matières **67**

Introduction

Ce stage « Modélisation prospective de la mobilité » s'inscrit dans le cadre des thématiques de recherche d'EIFER (European Institute for Energy Research), organisme associant EDF et le KIT (Karlsruher Institut für Technologie), et visant à développer de nouvelles solutions énergétiques à l'échelle locale.

Dans le cadre d'une démarche d'accompagnement des agglomérations autour des problématiques liées à l'énergie, EDF propose aux collectivités locales une Prospective Énergétique Ville (PEV), regroupant diverses analyses, notamment sociales, spatiales et politiques liées aux questions énergétiques :

- Diagnostic et prospective des consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre ;
- Évaluation des ressources renouvelables locales ;
- Évaluation de la précarité énergétique des ménages (dépenses de logement et de transport) ;
- Analyses connexes (accessibilité, implantations de bornes de charge électrique, etc.)

Les études de prospective énergétique visent à donner une vision globale, sans entrer en profondeur à l'intérieur des différents secteurs consommateurs, en se basant sur des outils de type comptable (ratios de mobilité, consommation, etc.). En parallèle de ces études globales, des analyses plus détaillées sont proposées pour chaque secteur afin d'affiner les analyses en termes de résolution spatiale, de détail de politiques simulées, et de chiffrage.

Pour ce qui concerne la mobilité, un prototype d'outil de type quatre étapes (outil OPEM Transport) a été envisagé de manière théorique à partir de l'expérience d'utilisation du modèle MARS (Metropolitan Activity Relocation Simulator), développé par l'Université de Vienne. Ce stage s'inscrit donc à ce niveau, en ayant pour objectif de rendre cet outil opérationnel.

Après avoir fait état des enjeux auxquels fait face ce travail, qu'il s'agisse du point de vue énergétique qu'en termes de mobilité pure, et établi la problématique, on présentera successivement la structuration du modèle, ainsi que le déroulement de son développement, avant de présenter les résultats produits pour les agglomérations de Strasbourg, Mulhouse et Bordeaux, que l'on commentera de manière critique.

I. Contexte et enjeux

I.1. Enjeux énergie-climat de la mobilité

À l'échelle nationale, le secteur des transports est responsable de 32 % des consommations énergétiques et 37 % des émissions de CO_2.[1] Au niveau local, la mobilité fait jeu égal avec la consommation provenant des logements. Les dirigeants européens se sont engagés en mars 2007 de réduire les émissions de l'Union Européenne d'au moins 20 % par rapport aux niveaux de 1990 d'ici 2020. À l'horizon 2030, cet objectif, actuellement encore en discussion, est porté à 40 %.

D'un point de vue national, les régions, départements et EPCI de plus de 50 000 habitants ont l'obligation de réaliser un Plan Climat Énergie Territorial (PCET), dans le but de limiter l'impact du territoire sur le climat en réduisant les émissions de gaz à effet de serre en visant le facteur 4 à l'horizon 2050, et diminuer la vulnérabilité du territoire vis-à-vis des impacts du changement climatique.

Le secteur des transports dépendant à 95 % du pétrole, agir sur les comportements de mobilité est un enjeu majeur pour atteindre les ambitieux objectifs de réduction et diminuer la dépendance aux sources d'énergie carbonées. Si la santé publique pâtit directement de la pollution atmosphérique, des thématiques urbaines sont aussi immédiatement liées aux questions énergétiques, comme l'attractivité des territoires, en termes de qualité de vie, de bruit, de pollution, ou de desserte en transports.

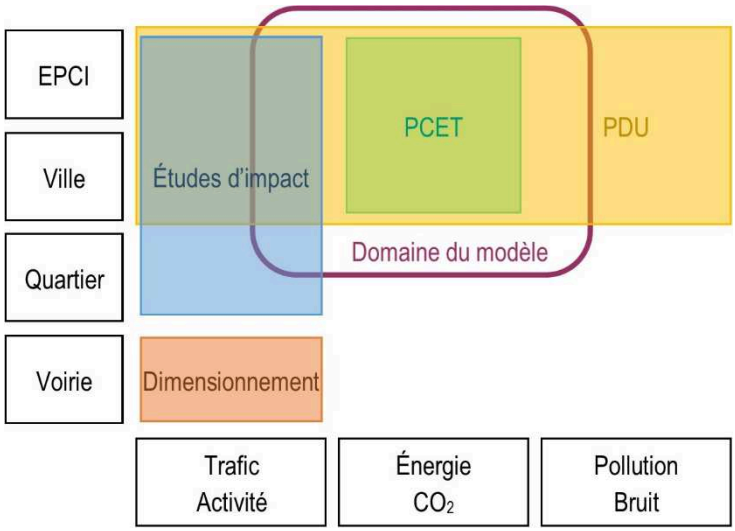


Figure 1: Positionnement du modèle selon les échelles et les objectifs.

[1] Commissariat général au développement durable. *Chiffres clés de l'énergie – Édition 2012*, Service de l'observation et des statistiques, décembre 2012.

I.2. Enjeux pour la modélisation

Notre modèle a pour ambition de pouvoir alimenter les réflexions liées à l'énergie et à la mobilité dans le cadre de l'établissement de plans d'action tels que les PCET ou les PDU[2]. Ainsi, il est nécessaire de cadrer les bornes du modèle en termes d'échelle d'agrégation et de thématiques. Comme nous avons pu le dire, il se distingue des outils d'aide à la décision classiques pour accompagner les études de création d'infrastructures nouvelles ou le dimensionnement de voiries.

La question se pose alors sur la typologie de modélisation à employer, compte-tenu de nos objectifs et des données à disposition. On distingue deux grands types d'outils :

- modèle à base de ratios : on considère que les émissions polluantes sont directement corrélées à la consommation énergétique, sur la base de ratios issus des tableaux de bords nationaux relatifs à la mobilité individuelle, comme l'ENTD[3]. On peut résumer leur principe comme suit, en faisant intervenir la mobilité individuelle, le taux de remplissage et la consommation énergétique des véhicules :

$$E = \sum_{\substack{\forall\, zone \\ \forall\, mode \\ \forall\, énergie}} population \times \frac{pax.km/hab}{\tau_{remplissage}} \times kWh/veh.km$$

  Simples à mettre en œuvre, ces modèles sont classiquement employés pour les études de prospective énergétique telles que celles menées dans le cadre des PCET. Cependant, ils ne permettent qu'une appréciation grossière de la situation, et interdisent la localisation des déplacements par origine-destination.

- modèle à quatre étapes : ce type de modèle est classiquement utilisé dans le cadre d'études relatives aux infrastructures de transport, permettant de quantifier la fréquentation probable, et déterminer par conséquent leur dimensionnement. Comme leur nom l'indique, elles comportent quatre étapes déterminant successivement la demande en déplacement, sa distribution au sein du périmètre d'étude, sa structure modale et sa répartition sur les réseaux. Alimentées par une description précise des réseaux et des territoires, elles fournissent des résultats à échelle fine. Cependant, elles s'avèrent coûteuses en préparation de données.

Dans le cadre du type d'études menées à travers notre modèle, il est nécessaire de se positionner à un niveau intermédiaire entre ces deux typologies contrastées, c'est-à-dire en allant plus loin qu'une

[2] Plans de déplacements urbains
[3] Enquête nationale transports déplacements

simple évaluation comptable agrégée à grande échelle, mais aussi à un niveau moins précis que, par exemple, la détermination du taux d'occupation d'une ligne de bus de périphérie à l'heure de pointe du soir.

Les contraintes inhérentes au fonctionnement des équipes d'ingénierie d'EDF impliquent le fait de pouvoir mener l'étude, si possible à partir des données fournies au préalable par l'agglomération, en quinze jours. Ces contraintes ne permettent pas l'utilisation d'outils spécialisés complexes, ou le traitement à haut degré de raffinement des données.

I.3. État des lieux de la mobilité locale

Depuis le milieu des années 2000, on constate une stabilisation, voire une inflexion de la mobilité en France. La mobilité locale[4] représente près de 99 % des déplacements des Français en 2008, soit 3,15 déplacements par jour et par personne[5]. Si ce nombre montre une tendance à la stabilisation ces dernières années, les distances parcourues, soit 25,2 kilomètres quotidiens, sont en revanche en hausse. Ainsi, entre 1994 et 2008, on relève une croissance de l'ordre de +0,7 % par an. Il s'agit de la conséquence de l'accroissement de l'étalement urbain. En revanche, on constate que le temps consacré aux déplacements est stable, et s'établit aux alentours de 56 minutes par personne.

Le motif domicile-travail représente 0,56 déplacements quotidiens, pour une longueur moyenne de 11 kilomètres, soit 18 % des déplacements mais 44 % des kilomètres parcourus. La voiture particulière est omniprésente, avec 76 % des déplacements domicile-travail en France métropolitaine hors Ile-de-France.

I.3.1. Utilisation de l'automobile

La motorisation des ménages est fortement corrélée à la situation géographique. Les territoires périurbains sont davantage enclins à se doter d'une automobile. Si l'on constate une augmentation progressive de la motorisation des ménages, il apparaît en revanche que l'utilisation moyenne de l'automobile diminue. La voiture demeure un mode de transport peu efficace économiquement, puisque stationnée 96 % du temps, occupée en moyenne par 1,32 personne, et source importante de dépenses pour les ménages. Si cette utilisation peu rationnelle peut être mise en regard avec l'aspect patrimonial et social que revêt la propriété d'un véhicule, l'automobile demeure toutefois un mode pertinent pour les zones périphériques peu denses, où les modes de transport alternatifs sont plus rares et moins compétitifs.

[4] Ensemble des déplacements réalisés sur le territoire national dans un rayon de 80 kilomètres autour du domicile
[5] Commissariat général au développement durable. *La Revue du CGDD. La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*, Service de l'observation et des statistiques, décembre 2010.

I.3.2. Transports collectifs

Les années 2000 ont été marquées par la mise en service de près de 450 kilomètres de TCSP[6] dans une vingtaine d'agglomérations. Mode de transport emblématique de cet investissement massif, le tramway apparaît comme le catalyseur du regain d'intérêt des collectivités locales pour les transports collectifs. L'offre globale en transports en commun a progressé de 15 % tous réseaux confondus, et la fréquentation de près de 30 % dans les agglomérations de plus de 250 000 habitants. En revanche, l'augmentation de la taille des périmètres de transport urbains a mécaniquement entraîné une croissance de la fréquentation inférieure à celle observée d'un point de vue démographique, signe que les transports collectifs doivent gagner en pertinence dans l'espace périurbain.

I.3.3. Modes actifs et espaces urbains

Un autre phénomène significatif durant la dernière décennie concerne la réappropriation de la marche à pied et du vélo par les politiques de transport. Celle-ci passe par la revalorisation de ces modes au sein de centres-villes apaisés, où l'automobile est remise à sa juste place. La marche à pied est un mode éminemment urbain, du fait de la plus grande concentration d'opportunités et de la qualité des espaces, et dévolu aux déplacements de proximité. Trois-quarts des déplacements à pied sont effectués sur des distances de moins de neuf cents mètres. Ainsi, les possibilités de report modal sont relativement faibles compte-tenu de ces parts modales déjà importantes.

Le vélo constitue une bonne alternative pour les trajets un peu plus longs. La mise en place de systèmes en libre-service (VLS) dans les agglomérations a donné de la visibilité et un certain dynamisme à ce mode tombé en désuétude depuis les années soixante-dix et l'ère du « tout automobile ». L'enjeu actuel est d'inciter à une utilisation davantage polyvalente de ce mode pertinent en deçà de trois kilomètres[7], cela passe par, nous l'avons dit, une politique volontariste de réduction de la prégnance de l'automobile dans l'espace urbain local, mais également par des actions pédagogiques et sociales pour faciliter l'accès à ce mode par le plus grand nombre.

[6] Transport en commun en site propre
[7] Groupe de travail pour le développement de l'usage du vélo, *Plan national vélo*, janvier 2012, p. 7

II. Problématique

Le modèle OPEM Transport s'inscrit dans une volonté de détermination des flux de transport au sein d'une agglomération, de manière à déterminer les consommations et émissions polluantes qui en sont issues. Il doit également permettre d'envisager différents scénarios en termes de politiques de déplacements, et d'en évaluer les conséquences. La contrainte est de pouvoir réaliser des études de type ingénierie avec des délais et coûts serrés, de l'ordre de quinze jours.

L'objet du présent travail est une étude de faisabilité visant à déterminer s'il existe un niveau de modélisation simplifié permettant de produire des résultats pertinents de manière réplicable, et donc avec un maximum de standardisation.

La difficulté de ce modèle tient lieu dans la combinaison de deux objectifs *a priori* antagonistes. Si la recherche de la modélisation la plus fidèle qu'il soit est évidemment un but incontournable, le fait de devoir l'atteindre en simplifiant le plus possible l'étape d'acquisition et de préparation des données de base engendre bien des interrogations. L'objectif du stage n'est pas tant de déterminer les variables explicatives les plus pertinentes et leurs coefficients associés que de pouvoir affirmer si les objectifs assignés au modèle sont envisageables et atteignables compte-tenu de la qualité des données entrantes.

La démarche prospective du modèle ne réside pas dans sa structure interne, dans le sens où seul le caractère évolutif des données d'entrée engendrera l'évolutivité temporelle des données de sortie. Il n'y a qu'une détermination des flux grâce à la démarche à trois étapes. La préparation des données est donc fondamentale, car elle conditionne pleinement la qualité des résultats. Les projections qui peuvent être faites sont de natures diverses :

- Évolution du coût du transport (carburant, transports collectifs)
- Modification de l'organisation spatiale de la ville (spécialisation de zones, nouvelles opérations urbaines)
- Évolution de la structure sociodémographique (population, emplois)
- Évolution des infrastructures de transport (nouveaux réseaux, performances)

Une fois le calage du modèle effectué, avec de bonnes certitudes sur sa capacité à évaluer avec pertinence une situation actuelle, il sera nécessaire de tester la sensibilité de chaque variable.

Il est toujours difficile d'anticiper les changements de comportement, car de nombreuses incertitudes demeurent autour de ce que sera la société de demain. Certes, il est toujours possible d'extrapoler à partir de la situation actuelle, au regard des tendances constatées, mais les performances passées ne préjugent pas des futures, d'autant que de nombreux aspects imprévisibles entrent en ligne de compte. Le contexte économique mouvant et incertain que nous connaissons actuellement rend difficile une

prévision à long terme. L'émergence de nouvelles technologies ou de tendances comportementales inédites peuvent transformer radicalement un secteur d'activité en quelques années. Ainsi, il faut bien avoir à l'esprit qu'il n'est possible de modéliser que ce qui entre dans le champ du modèle, sous la forme de variables d'entrée. De plus, les évolutions temporelles des variables d'entrée ne devront pas être brutales, au risque de sortir de l'enveloppe opérationnelle du modèle.

Des modèles de type *land use* assurent une rétroaction entre les infrastructures de transport et le développement du tissu urbain. Ici, les modifications démographiques seront intégrées dans les variables d'entrée, c'est-à-dire que l'évolution de l'offre ne va pas entraîner une augmentation de l'attractivité de la zone concernée, et donc des localisations. En revanche, une modification de l'occupation des sols (habitants et emplois) entrainera une évolution des flux de déplacement.

Le modèle OPEM Transport nécessite donc un compromis entre facilité de mise en œuvre, qui va concerner les données d'entrées, et la précision des données de sortie. L'identification de lois de comportement généralisées aux agglomérations françaises permettra de déterminer leur pertinence à être intégrées par défaut dans le modèle.

La problématique s'écrit donc en ces termes : *Quels jeux de données, variables et paramètres permettent de quantifier de manière prospective, dans un compromis entre précision de résultat et facilité de mise en œuvre, les volumes de déplacements multimodaux sur une agglomération donnée ?*

III. Modèle à quatre étapes

La modélisation de la demande de transport se base généralement sur quatre étapes, décrivant la démarche de réflexion théorique de l'individu souhaitant se déplacer. Chacune d'entre elles répond à une question :

- Vais-je me déplacer ? **Génération**
- Vers quelle destination ? **Distribution**
- Par quel moyen ? **Choix modal**
- Par quel itinéraire ? **Affectation**

III.1. Étapes du modèle

La **génération** correspond à la décision de se déplacer ou non. Pour chaque zone, on détermine les émissions (déplacements dont l'origine se situe dans la zone) notées *E* et les attractions (déplacements dont la destination se situe dans la zone) notées *A* en fonction de la composition sociodémographique. Cette étape permet d'établir des scénarios d'évolution des localisations (population et emplois).

La **distribution** correspond aux choix de la destination, c'est-à-dire que les émissions des zones sont ventilées en fonction des attractions. Ainsi, la matrice origine-destination est calculée à partir des valeurs de ses marges, ce qui permet de déterminer les flux tous modes confondus entre zones.

La **répartition modale** correspond à la décision de l'individu d'utiliser tel ou tel mode de transport. La matrice origine-destination est éclatée en autant d'autres matrices pour chaque mode, permettant d'estimer les volumes de déplacement de chaque moyen de transport. La détermination du choix modal est conditionnée par différents facteurs : l'offre de transport, la nature du déplacement, et les caractéristiques de l'individu et des zones de départ et d'arrivée. Elle est indispensable dans le cas de notre modèle, puisque l'on souhaite déterminer l'évolution de la structure modale des déplacements.

L'**affectation** est la phase de distribution des déplacements sur les réseaux, correspondant ainsi aux itinéraires empruntés par les individus pour réaliser leur déplacement. Notre modèle **n'effectue pas** cette étape, pour les raisons suivantes :

- nécessité d'un rebouclage entre répartition modale et affectation, coûteux en temps ;
- indisponibilité des données relatives aux réseaux (trame viaire et transports collectifs) ;
- information sur l'axe emprunté superflue, contrairement à la distance parcourue, ce qui permet la détermination du volume des émissions polluantes, mais pas leur localisation précise.

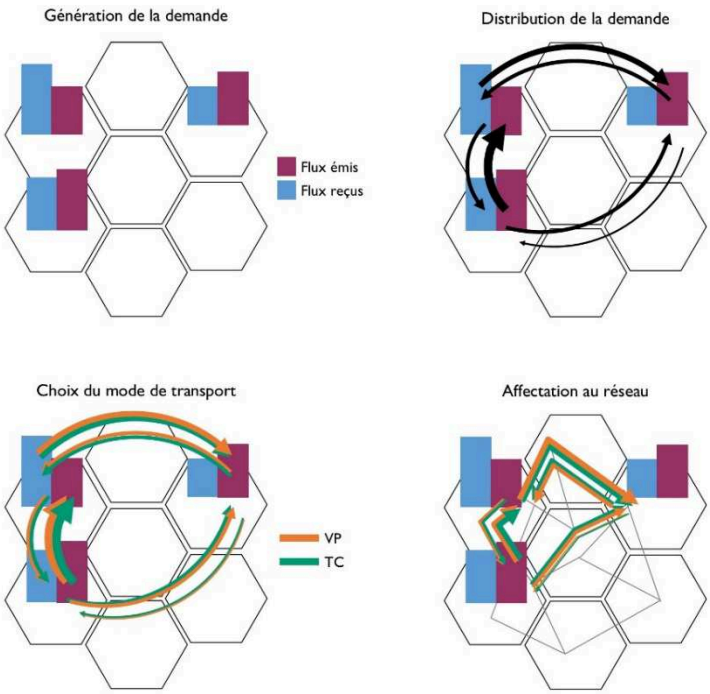


Figure 2: Schématisation du modèle à quatre étapes

III.2. Modèle agrégé vs modèle désagrégé

Dans un modèle agrégé, l'individu considéré aura les mêmes caractéristiques que l'ensemble des autres individus de sa zone agrégée. Il s'agit donc d'un individu moyen, représentation fictive de la réalité. Cette approche entraîne une perte d'informations, qu'il est possible de réduire en considérant plusieurs catégories (actifs, étudiants, etc.) au sein desquelles on construit un individu moyen.

Dans le cadre d'un modèle désagrégé, les individus sont considérés de manière isolée, ce qui est envisageable lorsque l'on dispose de données d'enquête à l'échelle individuelle, à l'instar des EMD. Toutefois, la détermination de la distribution des variables peut être difficile du point de vue de la distribution aléatoire avec des données empiriques. Un autre frein à l'utilisation d'un tel modèle est la difficile intégration de données à l'échelle désagrégée.

La localisation de chaque individu est limitée à la zone fine d'appartenance, ce qui dégrade la qualité de l'information, notamment dans l'estimation des distances parcourues localement, en particulier pour l'accès aux transports collectifs. Dans ce cas, il faut décrire l'offre au niveau de la zone fine, ce qui est très coûteux. La description discrète des individus rend également délicat la simulation d'une évolution de la structure de la population à moyen ou long terme, puisque les individus décrits et localisés précisément à l'année de l'EMD vont voir leurs caractéristiques socio-économiques évoluer (vieillissement, déménagement, niveau de revenus, etc.). Le choix retenu est celui du modèle agrégé, pour la possibilité d'intégrer aisément des données agrégées issues d'autres sources autres que l'EMD.

IV. Développement du modèle

IV.1. Spécifications

Le modèle développé au cours de ce stage s'inscrit dans une démarche prospective.

Contrairement à d'autres modèles existant sur le marché, le principe est de disposer d'une estimation des flux de déplacements au sein de l'agglomération, de manière à pouvoir en évaluer les émissions polluantes et la consommation énergétique. Il est également souhaitable de pouvoir tester des scénarios concernant la politique de l'agglomération en termes de déplacement, par la prise en compte de paramètres tels que la vitesse commerciale des transports en commun, le coût du stationnement, du carburant, d'un péage urbain, etc.

Les données de base sont les Enquêtes Ménages Déplacements (EMD) réalisées par les pouvoirs publics. Elles constituent une base de données précieuse, en fournissant un panorama des habitudes de déplacements des individus résidant dans une agglomération. Elles obéissent à un standard défini par le CERTU, ce qui permet d'assurer leur comparabilité.

Il pourrait paraître étonnant de souhaiter développer un modèle spécifique alors que d'autres outils disponibles sur le marché permettent d'atteindre la même finalité. La donnée de sortie étant les véhicules.km effectués sur le périmètre d'étude, il serait tout à fait envisageable de se placer en aval de ce type de modélisation. Cependant, le parti pris est de pouvoir rapidement mener à bien ce type d'étude à la demande d'une collectivité locale, à des coûts d'acquisition et de traitement des données limités et une précision de résultats acceptable.

L'enjeu du modèle est donc de pouvoir décrire les déplacements au sein de l'agglomération dans une échelle temporelle à moyen terme, ce qui implique la prise en compte de paramètres relatifs aux scénarios testés.

IV.2. Données disponibles

Le développement d'un modèle de ce type nécessite la mise à disposition de jeux de données représentatifs des déplacements d'une ou plusieurs agglomérations, avec l'idée sous-jacente que la multiplication des cas d'étude permettra de tester les différentes hypothèses qui auront pu être formulées de manière théorique. Plus pragmatiquement, il s'agira également de ne pas se conformer spécifiquement aux particularités d'une agglomération, au risque d'avoir une spécification et des paramètres de calage exclusifs qui ne permettront pas la reproductibilité des calculs.

Les jeux de données dont dispose EIFER concernent deux agglomérations de la région Alsace, en l'occurrence Strasbourg et Mulhouse, et celle de Bordeaux, dont la disponibilité est arrivée tardivement durant le stage. Pour ces agglomérations, les EMD sont relativement récentes (2008 ou 2009), ce qui permet d'observer des comportements de déplacement assez actuels.

IV.2.1. Enquête ménages déplacements

IV.2.1.1. Présentation de l'enquête

Depuis 1976, les agglomérations françaises ont recours aux enquêtes ménages déplacements pour évaluer et élaborer leurs politiques de transports. Il s'agit d'une méthodologie de référence conçue et actualisée par le CERTU, permettant de disposer d'un large panel d'informations relatives à la mobilité et son évolution au cours du temps, qu'il est possible de comparer avec d'autres agglomérations, grâce à sa relative standardisation en termes de contenu et de méthodologie.

Chaque EMD est définie par un cahier des charges strict, contrôlé et validé par le CERTU, pouvant être résumé ainsi :

- des milliers d'enquêtes sont réalisées, portant sur un échantillon représentatif de la population étudiée, soit entre 1 et 2 % ;
- les entrevues sont réalisées en face à face au domicile des personnes étudiées, soit les membres du foyer âgées de 5 ans ou plus ;
- tous les déplacements effectués la veille de l'entretien sont consignés et décrits précisément, quels que soient leur mode, durée ou motif ;
- seuls les jours ouvrables sont concernés selon le standard, mais une extension aux fins de semaine est possible localement.

Le découpage du périmètre de l'EMD se fait au niveau de zones fines, elles-mêmes issues d'une subdivision de zones statistiques (telles que les IRIS utilisés par l'INSEE), de manière à pouvoir recouper des informations provenant d'autres sources. La représentativité statistique est assurée au niveau agrégé DTIR. Cette disposition est essentielle pour pouvoir générer des données socio-économiques permettant le calage du modèle.

IV.2.1.2. Composition des données EMD

Les jeux de données mis à disposition suivent généralement la même trame :

- table déplacements, précisant notamment l'origine-destination et le motif ;
- table personnes, caractérisant les individus composant le ménage ;
- table ménage, décrivant les caractéristiques socio-économiques de chaque ménage, qui est affecté d'un coefficient de pondération correspondant au nombre de foyers que ce ménage est censé représenter ;
- table trajets, précisant notamment le mode utilisé et les temps de marche à pied ;
- table opinions, recueillant l'avis des personnes du ménage à propos des transports de l'agglomération.

Des exploitations standard complémentaires permettent d'analyser chaque variable séparément.

IV.2.2. Autres données

En l'absence de l'étape d'affectation, la description fine des réseaux de transport n'est pas assurée. De même, le réseau routier n'est pas modélisé. Il n'y a donc pas de prise en compte de phénomènes de congestion. Comme il a déjà pu être dit, les longueurs et les durées des déplacements sont issues des EMD, donc sur la base des déclarations des usagers. Ainsi, le raisonnement se fait en moyenne, sur l'ensemble des déplacements réalisés.

En revanche, les étapes du modèle se basent sur une offre potentielle reconstruite, comme nous allons le développer. Il est envisageable de raffiner les données d'entrée relatives aux parcours en utilisant des outils de cartographie grand public (par exemple, Google Maps ®), permettant de déterminer rapidement les distances entre zones agrégées.

IV.3. Méthodologie

IV.3.1. Dimension temporelle

IV.3.1.1. Horizon de prospective

L'horizon de référence a été fixé à 2030, cette échéance correspondant aux scénarios à moyen terme tels qu'ils peuvent être envisagés dans les études de prospective énergétique. Elle a l'avantage d'être suffisamment proche temporellement pour être relativement similaire en termes de comportement de déplacements aux situations décrites par les EMD, mais également lointaine pour simuler la mise en place de politiques de déplacement ou de projets de transports lourds, dont les temps de développement, de réalisation et de montée en charge sont au moins de l'ordre de la décennie (projet de TCSP, péage urbain, etc.).

Une agglomération va immanquablement évoluer au cours des années, tant dans sa structure urbaine que socio-économique. L'intrication entre les sous-systèmes (localisations, transports, relations sociales) rend délicate la prévision, d'autant plus que la simplification aurait tendance à sous-estimer certains liens de cause à effet. La logique de prospective ne vise cependant pas à décrire précisément la situation à l'année *N*, mais étudie la réaction du système global au changement d'une variable, autrement dit, quantifie l'effet de mesures individuelles ou groupées.

Le modèle tient compte des projections sociodémographiques de l'INSEE dans la structure de la population et des emplois, ce qui va modifier les émissions-attractions de chaque zone, avec pour conséquence une modification de la matrice origines-destinations. Les nouvelles habitudes de mobilité, en termes de nombre de déplacements et de choix modal, sont conditionnées par les variables du modèle. Les tableaux de bord du CERTU et d'autres sources institutionnelles peuvent fournir des éléments pour anticiper ces évolutions et proposer des scénarios.

Il est en effet difficile de prévoir des changements majeurs en l'absence de référence actuelle. Par exemple, le renchérissement des produits pétroliers est un phénomène qui aura des répercussions sur le coût du carburant, impactant le coût généralisé de la voiture particulière. En revanche, la montée en puissance de l'énergie électrique sera difficilement appréciable, puisque dans ce cas de figure, il y a transfert du coût d'utilisation vers le coût d'acquisition, ce que le modèle n'évalue pas. De même, l'introduction d'un nouveau mode (autopartage, vélo à assistance électrique) est très délicat puisqu'il n'existe pas de données pour estimer les coefficients de leurs fonctions d'utilité.

IV.3.1.2. Périmètre temporel

La non-prise en compte des déplacements de fin de semaine par les EMD conduit à évaluer la part de ces derniers à partir de ratios permettant le passage d'un jour moyen de semaine à l'année. Par définition, on raisonne en jour de semaine, considérant que les données des EMD sont lissées sur l'ensemble des jours de semaine (du lundi au vendredi) et représentatives d'un comportement moyen d'un usager. On dispose donc d'un nombre moyen de déplacements par jour et par personne (mobilité individuelle).

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Mobilité individuelle *(dep./pers./jour)*	3,02	3,68	3,74

Tableau 1 : Mobilités individuelles. Source : CERTU

Le trafic de week-end n'est pas considéré dans le modèle en tant que tel. Sa structure en termes de motifs et de distances parcourues étant très différente de celui des jours de semaine. En analysant les données de l'ENTD, on remarque que la part des transports en commun est divisée par deux, et que la distance moyenne des déplacements augmente de plus de 20 %.La mobilité de week-end liée à la voiture particulière étant d'autant plus exacerbée que l'agglomération est importante.

		Jours de semaine	Week-end
Parts modales	Deux-roues motorisés	4 %	5 %
	Marche à pied	22 %	21 %
	Transports en commun	8 %	4 %
	Voiture particulière	65 %	71 %
Répartition annuelle des déplacements		77 %	23 %
Distance moyenne parcourue (km)		7,9	9,6

Tableau 2: Caractéristiques comparées des déplacements entre jours de semaine et week-end. Source : ENTD

IV.3.2. Dimension géographique

IV.3.2.1. Périmètre d'étude

La définition du périmètre d'étude est essentielle : dans le cadre de notre modèle, le périmètre est constitué des communes dont il est possible d'extraire des données. Généralement, il correspond à celui de l'enquête ménages déplacements, source la plus exhaustive. Il paraît cependant absolument indispensable de définir les flux concernés par l'étude. En particulier, la prise en compte des trafics de transit et d'échange est mise en question. La vision prospective consistant à déterminer l'impact des politiques sur les déplacements au sein du périmètre, le trafic de transit n'est pas considéré dans le modèle. Il n'apparaît pas dans les données à disposition, et correspond à des déplacements d'ordre régionaux, nationaux et internationaux. Il est le plus souvent circonscrit à des axes traversants ou de contournement, dont les trafics sont connus ou peuvent être déterminés. Ces derniers ne sont généralement pas concernés par les politiques urbaines en matière de déplacement.

Les déplacements dont l'origine ou la destination sont situées en dehors du périmètre constitué des zones peuvent être significatifs dans les agglomérations comportant des pôles périphériques proches. Les exemples de Strasbourg et de Mulhouse, situées à proximité de frontières et sur un territoire densément peuplé, montrent une dépolarisation des zones les plus éloignées du centre, avec des taux de trafic vers l'extérieur avoisinant parfois les 25 %.

Zone	Taux interne tous motifs	Taux interne domicile-travail
1	96,1%	93,8%
2	95,3%	89,8%
3	93,8%	87,8%
4	94,0%	89,0%
5	91,8%	83,5%
6	72,6%	67,7%
7	92,7%	84,6%
8	90,8%	87,1%
9	88,5%	73,3%
10	86,3%	69,1%
11	90,8%	75,5%
Total	**91,9%**	**84,2%**

Tableau 3: Part des déplacements réalisés au sein du périmètre d'enquête. Source : EMD Mulhouse 2009

Il paraît assez difficile de prévoir ces phénomènes, d'autant qu'ils relèvent le plus souvent de particularismes locaux. Si l'on se réfère à l'exemple de Bordeaux, sans considérer celui-ci comme représentatif des agglomérations françaises, on constate que la part du trafic en direction ou en provenance de l'extérieur du périmètre de l'EMD n'excède jamais 6 % quelle que soit la zone considérée.

La prise en compte de ces trafics en provenance et à destination de l'extérieur pose problème du point de vue de leur localisation et de leur segmentation, en raison de leur faible nombre et de la multiplicité de natures. Dans le modèle, on ne considérera donc pas ces trafics, d'autant que trois agglomérations ne semblent pas être suffisantes pour tirer des conclusions générales. Des analyses complémentaires pourront ultérieurement permettre d'appliquer un coefficient permettant d'évaluer grossièrement la part de déplacements s'effectuant vers l'extérieur, et, dans le meilleur des cas, estimer leurs caractéristiques (motifs, longueur, etc.).

IV.3.2.2. Zonage

La mise en œuvre d'un modèle est relative à un contexte territorial et temporel défini, pour lequel il s'applique. En premier lieu, on aura soin de définir un périmètre servant de cadre au développement de modèle. Ce périmètre d'étude, que l'on qualifiera d'isolat, constitue la délimitation avec l'extérieur, supposé exogène donc indépendant. Ses limites sont déterminées par les objectifs du modèle et les données disponibles pour alimenter son développement.

Les modèles à quatre étapes se basent sur un découpage du contexte territorial en zones, afin de permettre une affectation des données. Toutefois, il est nécessaire de choisir avec pertinence la finesse de cette partition. En effet, un découpage trop grossier engendrera des résultats de piètre qualité, tandis qu'une finesse trop poussée nécessitera une quantité d'informations dissuasive en termes de coût et de représentativité statistique. Le nombre de zones se détermine donc au vu des objectifs du modèle, des données à disposition, et de l'étendue du périmètre. Un zonage fin requiert une importante quantité d'informations devant demeurer statistiquement pertinentes à cette échelle.

Chaque zone est affectée des informations la concernant, spatialisées par un point fictif appelé centroïde. Par exemple, les distances qui pourront être calculées entre zones se feront entre centroïdes. Cela n'est pas sans poser le problème de la fidélité des résultats, car la variabilité des localisations au sein de la zone entraîne également une variabilité dans les distances. De même, ce principe est synonyme de nullité des longueurs des déplacements au sein des zones, qui doivent donc être reconstituées par une autre méthode.

Dans le cas de notre modèle, le centroïde est défini comme le barycentre de la zone, ce qui demeure acceptable tant que la zone concernée est homogène du point de vue de la répartition interne des localisations. Dans le cas où il y a concentration des opportunités dans un endroit de la zone, il est envisageable de déplacer le centroïde de manière à augmenter la représentativité des données.

Les EMD utilisent différents niveaux de découpage du périmètre, il est envisageable d'en utiliser les niveaux supérieurs (D10 ou D30) pour s'affranchir d'une tâche de sélection manuelle. L'arbitrage concernant le découpage du périmètre arrête un nombre de zones compris entre dix et vingt, dépendant de la taille et des caractéristiques de l'agglomération.

Ce stage n'a cependant pas permis de tester différents découpages et leurs conséquences sur les résultats obtenus. Nous attirons cependant l'attention sur la nécessité d'effectuer des investigations en ce sens, de manière à valider objectivement les choix émis. Dans l'hypothèse où un découpage manuel serait utilisé, le suivi d'une méthodologie standard s'avérerait nécessaire pour assurer la reproductibilité des résultats, par exemple en posant des critères d'homogénéité spatiale et de suivi des infrastructures de desserte en transports collectifs.

IV.3.3. Choix des modes de transport

IV.3.3.1. Sélection des modes

La mobilité urbaine est par nature multimodale, c'est-à-dire que chaque déplacement peut s'effectuer par un large panel de moyens de transport. Cependant, un modèle n'a pas vocation à représenter l'ensemble de ces possibilités qui sont bien trop multiples et complexes, et bien souvent marginales. Les enquêtes réalisées distinguent une dizaine de modes identifiés. Le traitement statistique et la simplification du modèle rendent nécessaires leur agrégation ou leur non-prise en compte. Dans le traitement initial des données provenant des EMD, on distingue six catégories de modes, dont une regroupant ceux qui n'ont pas été singularisés. Cette catégorie sera exclue de la modélisation, car minoritaire, extrêmement composite et hétérogène.

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Voiture	59,8 %	48,5 %	61,5 %
Marche à pied	26,4 %	29,0 %	20,8 %
Transports en commun	10,2 %	13,6 %	11,9 %
Vélo	2,4 %	7,0 %	3,3 %
Deux-roues motorisés	0,4 %	0,7 %	1,3 %
Autres	0,8 %	1,3 %	1,3 %

Tableau 4: Comparaison des parts modales dans les agglomérations étudiées. Sources : EMD

La voiture particulière demeure le mode de transport majoritaire et finalement incontournable, en tant que principal consommateur d'énergie et émetteur de polluants. De la même manière, les transports en commun devront être considérés en tant qu'alternative.

Les modes actifs, en l'occurrence la marche à pied et le vélo, concernent une mobilité davantage locale, non génératrice de polluants. Le vélo dispose d'un bon potentiel de report modal, avec des portées pouvant couvrir une grande partie des déplacements en agglomération, au vu des parts modales de 20 à 30 % courantes à l'étranger[8] (Pays-Bas, Danemark, Allemagne).

Les deux-roues motorisés constituent la catégorie pour laquelle le choix de l'exclusion a été fait. Cet arbitrage correspond principalement à la sous-représentation statistique de ce mode au sein de la matrice origine-destination, ce qui rend difficile son appréhension. Les deux-roues motorisés sont de surcroît un phénomène concernant essentiellement les grandes villes, par exemple à Paris, où il a quadruplé entre 1994 et 2008[9], et qui devient très marginal lorsque l'on considère des agglomérations de taille plus réduite. Il est à noter que la consommation énergétique de ce mode est environ un tiers inférieure à celle d'une voiture particulière, mais du fait des normes moins contraignantes, ses émissions polluantes n'y sont pas corrélées, et sont supérieures.

Dans le domaine de la prospective, l'exclusion d'un mode minoritaire est toutefois risquée car elle l'interdit de pouvoir se développer. Ainsi, les exemples du développement non anticipé des deux-roues motorisés à Paris, ou l'exclusion systématique du vélo des modèles un peu plus anciens, du fait d'un manque de données permettant sa prise en compte, et empêchant de penser son renouveau, doivent inciter à la prudence.

		Consommation énergétique	
		kgéqCO_2/pax.km	kWh/pax.km
Voiture particulière thermique	Mixte	0,18	0,70
	Interurbain	0,15	0,60
	Urbain	0,26	1,00
Transports en commun	Rail local	0,01	0,02
	Bus local	0,04	0,20
Deux-roues motorisé		0,08	0,30

Tableau 5: Comparaison des consommations énergétiques des modes de transport. Source : Bilan Carbone V6.2.

[8] Commissariat général au développement durable. *La Revue du CGDD. La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*, Service de l'observation et des statistiques, décembre 2010, p. 81.
[9] CERTU, *La mobilité urbaine en France. Enseignements des années 2000-2010.* Éditions du CERTU, janvier 2012, p. 32.

IV.3.3.2. Définition de l'offre

La définition des modes de transport disponibles par zone est issue de l'analyse de l'offre de transport de l'agglomération. L'étape d'affectation n'étant pas prise en compte, on exclut d'emblée une description exhaustive des déplacements sur le réseau de transport ou la trame viaire. Le modèle simplifié ne considère qu'un mode unique pour une grande zone, conditionné par la présence ou non d'un TCSP. Si tel est le cas, la zone est dite T, dans le cas contraire, elle est dite B, c'est-à-dire qu'on la présume desservie par un service de bus.

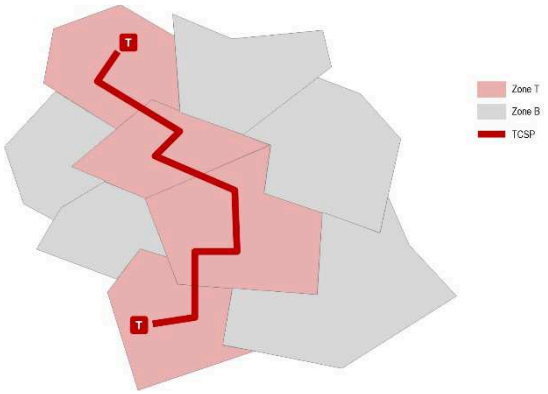


Figure: Schéma de répartition des zones T et B

La présence d'un TCSP dans une agglomération est déterminante dans le choix modal, en particulier dans les zones immédiatement desservies. On remarque que les zones centrales, généralement les mieux pourvues en termes de desserte, affichent des taux d'utilisation du TCSP (parmi les TC) assez importants. Les opérations de mise en place d'une telle ligne s'accompagnant de la restructuration du réseau de bus, il est somme toute assez logique de retrouver de tels résultats.

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Ensemble zones T	50,0%	67,2%	65,6 %
Ensemble zones B	23,1%	6,0%	36,8 %

Tableau 6: Part des déplacements effectués en TCSP parmi l'ensemble des transports collectifs urbains. Sources : EMD

Cependant, il apparaît qu'une partie non négligeable des trajets provenant ou à destination des zones T se font malgré tout par bus. Ainsi, l'affectation binaire à un mode ou un autre sur une origine-destination se voit critiquable. Nous y reviendrons page 51, où il est proposé d'améliorer la description de l'offre de transport.

Le plus évident aurait été de considérer les DTIR comprenant au moins une station de TCSP (notée T), et d'affecter aux DTIR environnants une pénalité correspondant à la durée de marche à pied. Cette méthode se heurte toutefois à plusieurs difficultés. En premier lieu, les données SIG de localisation des stations de transport en commun ne sont pas toujours disponibles, et le zonage DTIR inexistant en l'absence d'EMD. Ce dernier constitue de surcroît un degré de finesse supérieur à celui des zones définies pour la matrice OD, ce qui rend plus complexe la préparation préalable des données.

Si l'on considère le réseau de bus se superposant à celui de TCSP, l'exemple est encore plus frappant. La diversité des amplitudes et horaires rend très difficile la définition d'un niveau d'offre général, et la description fine est inenvisageable.

Dans le modèle, le temps d'attente est considéré comme la moitié de la fréquence de la ligne concernée. On peut toutefois considérer un temps de référence de dix minutes au-delà duquel l'usager a tendance à retenir l'horaire de passage[10], pour lequel il se ménage une marge pour son arrivée à la station. Cependant, il a été décidé de maintenir de principe de demi-fréquence pour simuler l'effet d'offre de la desserte, en particulier pour des lignes de transport à faible niveau de service (par exemple, bus périurbain).

IV.3.4. Choix des motifs

La répartition des motifs de déplacements dans le cadre des EMD montre une structure assez contrastée.

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Accompagnement	10,5%	11,4%	12,4%
Achat	14,8%	12,6%	13,8%
Autre	37,6%	43,9%	43,7%
École	**10,2%**	**10,1%**	**9,3%**
Secondaire	0,0%	0,1%	0,1%
Travail habituel	**19,2%**	**14,3%**	**12,5%**
Université	0,9%	1,2%	2,4%
Visites	6,7%	6,3%	5,8%

Tableau 7: Répartition des motifs de déplacement par agglomération, la catégorie Autre regroupant les déplacements non liés au domicile. Sources : EMD

[10] Keolis, *Keoscopie 2012*, 2012, page 19.

IV.3.4.1. Domicile-travail

Il a été décidé, dans le cadre de ce travail, de ne s'intéresser dans un premier temps qu'aux déplacements domicile-travail. Ces derniers possèdent en effet la particularité d'être bien documentés en termes de bibliographie, de pouvoir être expliqués par des variables dont les données peuvent être aisément recueillies, et de constituer des effectifs suffisants d'un point de vue statistique. De plus, ce type de déplacements est identifié comme source de saturation des infrastructures de transport (congestion automobile, charge des lignes de transport en commun, etc.). Il s'agit donc d'une thématique à laquelle sont particulièrement sensibles les collectivités locales. En outre, une modélisation basée sur une compétition entre modes semble également plus pertinente pour ce motif que pour les autres, car les vitesses pratiquées sont plus élevées toutes choses égales par ailleurs.

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Budget temps *(min)*	48,6	67,4	68,4

Tableau 8 : Durée quotidienne totale de déplacement par personne mobile. Source : CERTU

Pa la suite, on considérera les déplacements exclusivement réalisés entre le domicile et le travail et polarisés dans ce sens, c'est-à-dire que l'on exclut les boucles multiples liées au travail. Cette hypothèse est confortée par le fait que les déplacements aboutissant au travail sont très majoritairement en provenance du domicile.

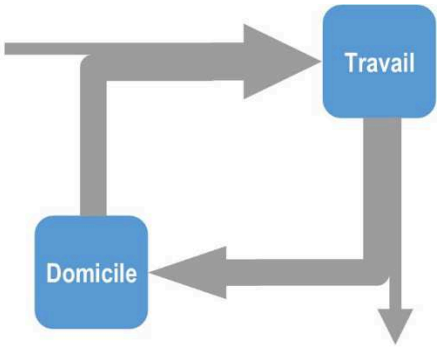


Figure 3: Schématisation des déplacements domicile-travail

On remarque que les déplacements liés à un lieu de restauration hors du domicile sont d'autant plus nombreux que l'agglomération est importante, ce qui s'explique par le non-retour au domicile pour la prise de repas méridienne.

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Part des déplacements depuis le domicile parmi l'ensemble des déplacements **vers le travail**	82% *(84%)*	72% *(78%)*	67% *(74%)*
Part des déplacements vers le domicile parmi l'ensemble des déplacements **depuis le travail**	74% *(77%)*	65% *(72%)*	58% *(65%)*

Tableau 9: Part des déplacements domicile-travail parmi ceux en provenance ou à destination du travail principal (entre parenthèses, en considérant un autre lieu de travail déclaré). Sources : EMD

IV.3.4.2. Autres motifs

Les déplacements liés aux motifs liés aux études représentent un autre poste important. Cependant, il ne fera pas l'objet d'une étude par le modèle, en grande partie à cause du manque d'informations à ce sujet. Les bases de données d'établissements scolaires fournies par l'INSEE ou le Ministère de l'Éducation Nationale ne sont pas assez précises, soit en termes de localisation ou structure des effectifs pour pouvoir être exploitées directement.

On distingue trois segments propres à ce motif, en lien avec les niveaux scolaires des élèves. Les élèves du secteur sont le plus souvent scolarisés non loin de leur domicile. Il s'agit d'une mobilité ne représentant pas un enjeu majeur en termes d'émissions polluantes, et qui se fait généralement en marche à pied, ou en accompagnement d'un adulte par le mode de transport choisi par ce dernier. Les élèves au collège et au lycée ont généralement plus de latitude et d'indépendance dans leur choix de mode, à ceci près que n'ayant pas accès à la voiture individuelle par eux-mêmes, ils plébiscitent davantage les transports en commun et le vélo pour atteindre leur établissement de scolarisation, situé à plus grande distance que dans le cas du secteur primaire.

Enfin, les déplacements universitaires représentent localement des enjeux importants, en particulier du point de vue du dimensionnement des lignes de transport desservant les siteqs concernés. Toutefois, lorsque l'on rapporte la population universitaire et les déplacements liés à l'ensemble de l'agglomération, cette part est somme toute assez marginale.

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Population universitaire (2012)	7 754	43 076	60 482
Population de l'EPCI (2011)	251 226	473 187	727 256
Part population universitaire	3,1 %	9,1 %	8,3 %
Part déplacements motif « universitaire »	0,9 %	1,2 %	2,4 %

Tableau 10 : Part de la population universitaire par EPCI.
Sources : Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, INSEE, EMD.

Les informations relatives aux effectifs des différents sites universitaires étant de surcroît malaisées à obtenir, il a été décidé de laisser de côté le motif correspondant dans le cadre de cette étude.

Les achats relèvent de natures assez diverses. Dans l'EMD, on distingue ceux effectués en petit et moyen commerce de ceux réalisés en hypermarché ou en centre commercial. Si les premiers peuvent être effectués aux alentours du domicile, du travail ou à l'occasion d'un déplacement, donc difficilement localisables, les seconds sont beaucoup plus concentrés, et correspondent le plus souvent à des comportements de week-end. Les achats en hypermarché ou en zones commerciales sont extrêmement dépendants de l'automobile.

IV.3.5. Calcul des distances

L'évaluation des vitesses des modes de transport est une question relativement complexe. Tout d'abord, il faut avoir en tête que les données EMD ne fournissent des informations qu'à propos des zones de départ et d'arrivée, et de la durée totale du déplacement, mais pas de la distance parcourue. Cette dernière doit donc être reconstituée *a posteriori.* En localisant les centroïdes de départ, il est possible de déterminer une longueur à vol d'oiseau entre zones.

Ainsi, la distance à vol d'oiseau entre les zones A et B, dont les centroïdes ont X et Y pour coordonnées, est définie comme telle :

$$DVO_{AB} = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2}$$

Toutefois, cette distance n'est pas représentative de la complexité géométrique du déplacement, qui va suivre la trame viaire ou le réseau de transports en commun de l'agglomération. Il est donc nécessaire de transformer cette valeur en fonction du mode utilisé. Par exemple, un trajet à pied est beaucoup moins dépendant des réseaux que le même effectué au moyen de modes mécanisés. Les distances parcourues à pied sont donc considérées comme telles, sans modification.

En l'absence de référentiel d'évaluation, on se réfèrera donc à un document du CERTU[11] indiquant la méthode de reconstitution des distances **entre zones fines** à partir des distances à vol d'oiseau. Ce document est issu des recherches effectuées par cet organisme, mais demeure fortement expérimental.

[11] CERTU, *Calcul a posteriori des distances dans les enquêtes ménages déplacements*, janvier 2009.

On note $DIST_d$ la distance du déplacement *d* entre la zone fine d'origine et celle de destination, $DIST_t$ la distance de chaque trajet *t* avec le mode de déplacement inclus dans le déplacement *d*, et DVO_t la distance à vol d'oiseau de ce même trajet. Ainsi on a :

$$DIST_d = \sum_t DIST_t$$

Pour chaque mode, l'expression de $DIST_t$ s'exprime ainsi :

- Voiture et deux-roues motorisés :
  Lorsque $DVO_t \leq 1$ km, alors $DIST_t = (2{,}2 - 0{,}72\ DVO_t)\ DVO_t$
  Lorsque $DVO_t > 1$ km, alors $DIST_t = 1{,}4\ DVO_t$
- Transports collectifs : $DIST_t = 1{,}5\ DVO_t$
- Vélo : $DIST_t = 1{,}35\ DVO_t$

Le document du CERTU précise toutefois que ces formules relèvent d'un caractère provisoire, et que des tests permettront de les préciser et d'ajuster les coefficients. On notera également que les distances calculées se font entre centroïdes de zones fines, ce qui suppose l'ajout, pour disposer de la totalité de la distance parcourue, des distances d'accès et de diffusion. Cependant, les distances parcourues par l'usager entre les différents modes mécanisés empruntés ne sont pas prises en compte car effectuées à pied sur de faibles longueurs.

La taille des zones en zone centrale pose le problème de la caractérisation de déplacements internes. En effet, si l'on se réfère à une longueur-équivalent-surface, ce qui est une approximation recommandée par le CERTU[12], la longueur moyenne d'un déplacement interne à une zone fine pour un mode mécanisé est déterminé en fonction de la surface selon la formule suivante :

$$DIST_{interne} = 0{,}5\ \sqrt{S_{zone}}$$

Dans le cas de zones agrégées de taille importante, la longueur parcourue théoriquement sera donc tout aussi importante, mais plus forcément en lien avec la réalité observée, puisque les déplacements internes sont le plus souvent de proximité. Ainsi, il est préférable de revenir sur ce principe pour trouver des longueurs moyennes de déplacement forfaitaires adaptées aux typologies de chaque zone. On remarque que le budget temps déplacement piéton global est relativement constant au sein de chaque zone, ce qui encourage à la détermination d'une valeur commune, sans lien avec les caractéristiques intrinsèques de la zone.

[12] *ibidem*

L'analyse de ces « budgets marche à pied » pour chaque agglomération a permis de dégager des tendances intéressantes. On constate que les valeurs obtenues sont assez cohérentes.

		Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Ensemble agglomération	Tous motifs	12'	12'	11'
	Domicile-travail	9'	9'	11'
Zones desservies par le tram	Tous motifs	11'	12'	11'
	Domicile-travail	10'	11'	12'

Tableau 11: Durée moyenne des déplacements intra-zones. Sources : EMD

V. Étapes du modèle

V.1. Introduction

Les manipulations de données nécessaires au développement du modèle se sont faites à plusieurs échelles, en fonction de l'étape considérée. Le modèle de choix modal est présenté ici en premier lieu, puisqu'il correspond à l'étape qui a été privilégiée dans notre étude.

V.1.1. Choix modal

Pour chaque origine-destination, c'est-à-dire pour l'ensemble des combinaisons possibles entre zones, on constitue une base de données provenant de la table de référence, de manière à calculer les valeurs de référence observées sur le terrain, qui vont servir au calage du modèle. En particulier, on détermine les parts modales des quatre modes considérés ainsi que le nombre de déplacements correspondants.

Les composantes du coût généralisé sont ensuite calculées pour chaque origine-destination, et l'application d'un modèle logit, explicité page 44, permet la détermination des parts modales théoriques. Le développement du modèle de choix modal étant découplé de celui du modèle de génération, on considère les déplacements réellement observés par l'EMD, que l'on ventile pour chaque mode à partir des parts modales calculées.

Ainsi, il est possible d'appliquer la méthode des moindres carrés sur les écarts entre déplacements mesurés et calculés pour estimer le meilleur jeu de coefficients servant au calcul du coût généralisé. La résolution est réalisée au moyen de l'outil Solver d'Excel.

V.1.2. Génération

Le modèle de génération a d'abord été originellement mis de côté au profit du modèle de choix modal, au développement considéré *a priori* comme plus ardu.

Comme pour le modèle de choix modal, on dispose du nombre de déplacements mesurés au moyen de l'EMD sur chaque origine-destination. Les données INSEE, généralement au niveau infracommunal, c'est-à-dire par IRIS, sont agrégées pour pouvoir être disponibles au niveau de chaque zone.

Le calage du modèle se fait à partir de régressions linéaires des émissions et des attractions à partir de variables explicatives. Dans le cadre des déplacements domicile-travail, on retient la population et le nombre d'emplois. Des coefficients sont donc élaborés à partir de ces analyses, et sont injectés dans le modèle.

V.1.3. Distribution

À partir des valeurs d'émissions et d'attractions, le modèle gravitaire de distribution va déterminer les flux entre zones au sein d'une matrice origines-destinations. Toutefois, cette matrice brute ne respecte

pas les critères de contraintes aux marges. On lui applique donc la méthode de Furness, détaillé en page 35, sur trois itérations pour pallier cette difficulté. On obtient ainsi une matrice origines-destinations de calcul, qu'il est possible de comparer à celle issue des observations de l'EMD. Là encore, la méthode des moindres carrés permet le calage des coefficients utilisés dans le modèle gravitaire.

V.2. Étape de génération

V.2.1. Déplacements domicile-travail

Bien que ne représentant qu'une part limitée des déplacements totaux, les trajets domicile-travail constituent plus de la moitié des véhicules-kilomètres parcourus. De plus, en tant que première raison de sortie du domicile, ils conditionnent très souvent le choix modal des autres trajets de la journée. Il s'agit donc de trajets intéressants du point de vue des objectifs du modèle, par leur impact significatif en termes de comportement de mobilité et d'émissions polluantes.

L'évaluation du volume et de la nature des déplacements domicile-travail a fait l'objet de la majeure partie du travail effectué, avec l'idée sous-jacente que la méthodologie employée pouvait être reproduite pour le motif domicile-études dans un premier temps, et être étendu aux autres motifs par la suite.

Les données de l'INSEE permettent de connaître la structure socio-économique pour chaque zone, en particulier le nombre d'habitants et d'emplois. Un premier raisonnement consiste à vouloir trouver une corrélation entre ces données et les émissions et attractions relatives ce motif.

On procèdera donc à une analyse statistique sur la dizaine de zones agrégées. Les zones plus fines (DTIR) n'ont volontairement pas été choisies, d'une part en raison de leur insuffisante précision statistique pour pouvoir évaluer les émissions et attractions avec pertinence, et d'autre part en raison de leur découpage parfois hasardeux, sans relation avec les limites des découpages statistiques de l'INSEE, en particulier les IRIS.

V.2.2. Évaluation des émissions-attractions

Pour le motif domicile-travail, on part du principe que ces déplacements sont majoritairement pendulaires. Aussi, il est souhaitable de polariser l'étude depuis le domicile vers le travail, de manière à observer des comportements homogènes. L'évaluation du nombre de déplacements nous amènera à considérer un retour correspondant à chaque aller.

L'analyse statistique consiste à évaluer le degré de corrélation entre les émissions (notées *E*) et la population (notée *P*), et celui entre les attractions (notées *A*) et les emplois (notés *J*). On procède donc à deux régressions linéaires sur l'ensemble des données EMD à l'échelle de la zone agrégée, afin d'aboutir à deux relations du type :

$$\begin{cases} E = \alpha_1 P + \beta_1 \\ A = \alpha_2 J + \beta_2 \end{cases}$$

Les jeux de données segmentés par agglomération aboutissant à des résultats assez médiocres du fait du manque de points (limités *de facto* au nombre de zones, soit une dizaine), on agrège l'ensemble des données à disposition, pour augmenter la représentativité statistique de la source de données, et trouver des tendances générales.

En l'absence de données de comptage le long de lignes écran (cours d'eau, boulevards circulaires, etc.), le calage des données de distribution est limité à ce que les enquêtes peuvent fournir.

V.3. Étape de distribution

Une fois l'étape de génération effectuée, il est nécessaire de distribuer les volumes de déplacements générés par zone agrégée selon les origines-destinations.

V.3.1. Modèle gravitaire

Le modèle utilisé dans le cadre de la distribution est de type gravitaire, c'est-à-dire que le flux de déplacement entre deux zones sera d'autant plus fort que ces zones sont proches. On utilisera donc une fonction dite de dissuasion pour pondérer cette demande, ayant la distance comme variable. La littérature[13] préconise d'opter pour une fonction de dissuasion de type exponentielle-puissance, permettant un meilleur calage sur les données d'enquête. Cette dernière comporte deux paramètres, et prend la forme suivante :

$$f(d) = d^{-\xi} e^{-\lambda d}$$

Ainsi, le flux de déplacement entre les zones *i* et *j* s'écrit :

$$T_{ij} = \frac{E_i A_j f(d)}{\sum_k A_k f(d)}$$

[13] Bonnel P., *Prévoir la demande de transport*, Presses de l'ENPC, 2004, p. 204.

On notera que dans le cadre de déplacements polarisés, les émissions ne sont pas égales aux attractions. Ainsi, pour la même origine-destination, le flux aller sera différent du flux retour. Une autre méthode, qui reste à explorer, consisterait à prendre en compte le coût généralisé de chaque mode comme fonction de dissuasion afin de mieux prendre en compte les caractéristiques de l'offre de transport.

V.3.2. Méthode de Furness

Les flux obtenus ne sont pas contraints aux marges, au sens où la somme de l'ensemble des déplacements à l'origine ou à destination d'une zone de la matrice origine-destination calculée n'est pas égale à celle issue de l'EMD. Il est donc nécessaire de déformer les données obtenues.

La méthode de Furness consiste à traiter successivement les lignes et les colonnes de la matrice origine-destination calculée, en répétant l'opération jusqu'à convergence, afin qu'elles respectent la contrainte aux marges. Généralement, quelques itérations suffisent à obtenir une précision de l'ordre de quelques déplacements sur l'ensemble des sommes.

On formalise mathématiquement le modèle comme suit :

- itération I : calcul des $F_i^{(I)} = \frac{E_i}{e_i}$,

  d'où $T_{ij}^{(I)} = t_{ij}\, F_i^{(I)}$, la contrainte est respectée sur les lignes ;
- itération II : calcul des $F_j^{(I)} = \frac{A_j}{\sum_i T_{ij}^{(I)}}$,

  d'où $T_{ij}^{(II)} = T_{ij}^{(I)}\, F_j^{(I)}$, la contrainte est désormais respectée sur les colonnes ;
- itération III : calcul des $F_i^{(II)} = \frac{E_i}{\sum_j T_{ij}^{(II)}}$,

  d'où $T_{ij}^{(III)} = T_{ij}^{(II)}\, F_j^{(II)}$, la contrainte est de nouveau respectée sur les lignes ;

- on renouvelle l'opération jusqu'à convergence des F_{ij}.

On trouvera en annexe, page 63, un exemple d'application de la méthode de Furness pour l'agglomération de Mulhouse.

V.4. Étape de choix modal

V.4.1. Coût généralisé

V.4.1.1. Définition

Le processus de choix de l'individu est difficilement quantifiable de manière exhaustive, puisqu'elle obéit à des perceptions pouvant par exemple concerner le confort ou encore la sécurité. Le temps de transport peut être déterminé de manière objective, mais son ressenti est fonction de l'individu, du mode emprunté, etc.

Le concept de « coût généralisé » du déplacement est utilisé ici pour représenter la pénibilité ressentie par l'usager pour effectuer son déplacement. À noter que ce que l'on désigne par « coût généralisé » correspond à la fonction d'utilité dans son ensemble, et non à la simple composante temporelle.

V.4.1.2. Composition

Les variables composant les fonctions de coût généralisé sont choisies à partir d'une étude de la littérature et de nos propres analyses de corrélation (voir page 38). L'utilisation du Solver Excel pour l'estimation des coefficients ne permet toutefois pas d'effectuer les tests de significativité habituels. Il s'agit donc d'une première approche de faisabilité, la robustesse statistique du modèle ayant vocation à être renforcée dans de prochains travaux.

La pénibilité de l'usager s'exprime en premier lieu par le temps mis pour effectuer le déplacement, décomposé en plusieurs étapes, et pondérées au moyen de fonctions exponentielles :

- temps d'accès, correspondant à la durée de marche à pied jusqu'au et depuis le véhicule ;
- temps d'attente, qui concerne les transports en commun ;
- temps de trajet, c'est-à-dire le temps effectivement passé dans le véhicule.

Les différentes variables de durée sont transformées au moyen de fonctions exponentielles de type $e^{\gamma t}$ afin de représenter des « temps ressentis », cette perception n'étant pas linéaire avec la durée. Ces fonctions ont la propriété de présenter des valeurs peu élevées pour des temps faibles, mais qui deviennent rapidement dissuasives lorsque l'on excède une valeur temporelle limite, ce qui permet d'exclure des modes au rayon d'action limité à partir d'une certaine distance, comme la marche à pied ou le vélo. Chaque mode est doté de son propre jeu de coefficients, permettant de représenter sa propre sensibilité au temps.

On intègre ensuite trois variables explicatives supplémentaires :

- Le taux de motorisation de la zone de départ rend compte de la plus grande propension de l'usager à utiliser sa voiture particulière pour effectuer le déplacement lorsqu'il en possède une. Il faut toutefois noter que cette variable englobe implicitement plusieurs autres aspects comme par exemple la différenciation de tissu urbain, ou les différences de revenus ou de types de ménages.
- La difficulté de stationnement, c'est-à-dire le temps moyen de recherche d'une place de stationnement à l'arrivée, permet de rendre compte de l'effet dissuasif de la contrainte du stationnement automobile, avec la limite liée au fait que ces temps sont issus de l'EMD, donc ceux déclarés par les utilisateurs de la voiture, d'où une possible mésestimation de ces temps de recherche.
- Le coût monétaire du déplacement représente le coût marginal supporté par l'usager.

En notant X_i le vecteur de variables explicatives mentionnées ci-dessus, et β le vecteur des coefficients de régression à estimer, le coût généralisé pour le mode *i* s'écrit ainsi :

$$C_{g_i} = \beta_i X_i = \beta_{0_i} + \beta_{1_i} X_1 + \beta_{2_i} X_2 + \cdots$$

Le coefficient β_0 est qualifié de « constante » ou d' « intercept ». Il prend implicitement en compte les différences de coût généralisé qui ne sont pas captées par les variables du modèle.

Ainsi, il vient :

$$C_{g_i} = \beta_i X_i = \beta_{0_i} + \beta_{a_i} e^{\gamma_{a_i} t_{a_i}} + \beta_{w_i} e^{\gamma_{w_i} t_{w_i}} + \beta_{t_i} e^{\gamma_{t_i} t_{t_i}} + \beta_{s_i} s_i + \beta_{m_i} m_i$$

avec :

t_a	temps d'accès
t_w	temps d'attente
t_t	temps de trajet
s	difficulté de stationnement
m	taux de motorisation

Il faut toutefois noter que dans la réalité, les coûts généralisés des différents modes de transport évoluent dans le temps, notamment en fonction de la période de la journée. En effet, la congestion du réseau routier aux heures de pointe va pénaliser la voiture particulière, tout comme les fréquences plus basses des transports en commun aux heures creuses va réduire l'attractivité de ces derniers. Dans notre modèle, en l'absence d'étape d'affectation, la congestion automobile est prise en compte implicitement en considérant les vitesses observées pour le motif domicile-travail, qui s'effectue majoritairement en heure de pointe. De même, il n'y a pas distinction entre heures creuses et heures de pointe dans les données d'offre. Le coût généralisé des modes et des trajets demeure donc le même, et correspond à une valeur moyenne issue de l'EMD.

V.4.2. Justification des variables utilisées

V.4.2.1. Vitesse des modes

La vitesse est une donnée qui s'extrapole à partir de la connaissance de la distance, que nous venons de développer, et de la durée du déplacement. Comme nous l'avons dit, cette durée inclut à la fois le temps d'attente et le temps de trajet. Ainsi, dans le cas des transports en commun, l'attente en station ou les temps de correspondance dégradent fortement la vitesse calculée, ce qui engendre une compétitivité virtuellement dégradée par rapport à la voiture particulière, ou même au vélo dans certains cas. Il serait possible de reconstituer ces temps en ayant accès aux informations relatives aux lignes empruntées, mais qui ne figurent malheureusement pas dans l'EMD. Dans le meilleur des cas, on pourrait envisager d'accéder à cette information à partir du type de desserte (mode, fréquence) de la zone fine de départ. Cependant, de telles bases de données n'existent pas pour chaque agglomération. La tâche de recueil des données correspondante est cependant trop fastidieuse pour pouvoir être appliquée manuellement de manière systématique.

Une solution envisageable est de considérer que la vitesse du déplacement croît avec la distance parcourue. Ainsi, pour de courts trajets :

- la part d'attente des transports en commun est prépondérante sur le temps passé à bord du véhicule ;
- les voies empruntées en voiture particulière sont secondaires et ne permettent pas l'atteinte de vitesses de pointe pendant une longue durée, en particulier du fait de l'arrêt aux carrefours ;
- la vitesse de marche à pied est constante, et on relève peu de longs déplacements ;
- les déplacements de longue distance en vélo sont effectués par des utilisateurs chevronnés physiquement plus à même d'atteindre des vitesses importantes.

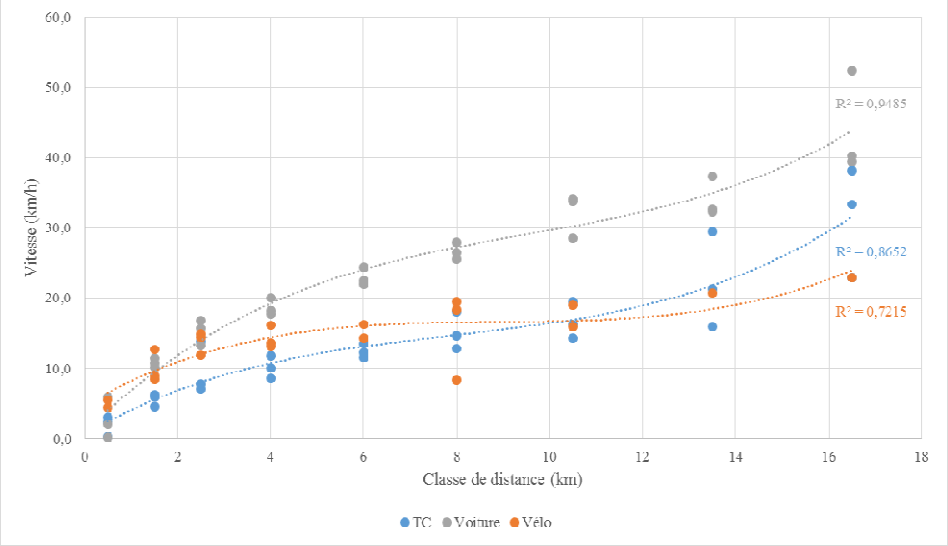
La polarisation du déplacement pour le motif domicile-travail va générer des vitesses plus faibles en raison des effets de congestion relevés à l'heure de pointe du matin, où se concentrent la majorité des déplacements recueillis par l'EMD. Toutefois, cela n'est pas de nature à modifier la structure modale des déplacements, puisqu'en ayant polarisé les déplacements dans le sens domicile-travail, c'est-à-dire à l'aller, on présuppose à raison que le retour se fera par le même mode, sauf exceptions à la marge.

Il est ainsi possible de définir des classes de distances permettant d'observer la vitesse pratiquée pour chacun des modes. Ces classes doivent à la fois être de taille suffisamment importante pour être statistiquement représentatives, en particulier si l'on segmente par motif, et relativement resserrées dans le cas des courts déplacements pour pouvoir capter des phénomènes fins.

Ainsi, on détermine pour chaque agglomération la vitesse des modes en fonction de la distance parcourue. On relève une homogénéité intéressante (voir annexe page 61), avec toutefois un problème

d'effectifs insuffisants dans le cas du vélo. Il sera donc nécessaire d'expurger certaines valeurs aberrantes.

On procède ensuite à des régressions polynomiales du troisième ordre, semblant correspondre au mieux aux nuages observés, et qui fourniront le profil moyen de vitesse pour chaque mode. On remarque que le vélo présente davantage d'inhomogénéité par rapport aux autres modes, ce qui s'explique par la faible représentativité statistique de ce mode, et par sa forte sensibilité au contexte territorial.



Graphe 2:Régressions polynomiales au troisième ordre des vitesses moyennes observées par mode et par classe de distance. Sources : EMD

Il est ainsi possible de définir les fonctions de vitesse génériques, ainsi que les vitesses nominales par mode et par classe de distance issues de la tabulation de ces fonctions :

$$\begin{pmatrix} v_{VP} \\ v_{TC} \\ v_{vélo} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0{,}0195 & -0{,}5581 & 6{,}5151 & 0{,}8902 \\ 0{,}0163 & -0{,}3857 & 3{,}8052 & 0{,}6485 \\ 0{,}0158 & -0{,}4245 & 3{,}8572 & 4{,}7539 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^3 \\ d^2 \\ d \\ 1 \end{pmatrix}$$

Centre de classe de distance (km)	Vitesse moyenne (km/h)		
	TC	Vélo	Voiture
0,5	2,5	6,6	4,0
1,5	5,5	9,6	9,5
2,5	8,0	12,0	14,0
4,0	10,7	14,4	19,3
6,0	13,1	16,0	24,1
8,0	14,8	16,5	27,3
10,5	16,9	16,7	30,3
13,5	21,8	18,3	35,1
16,5	31,6	23,8	44,0

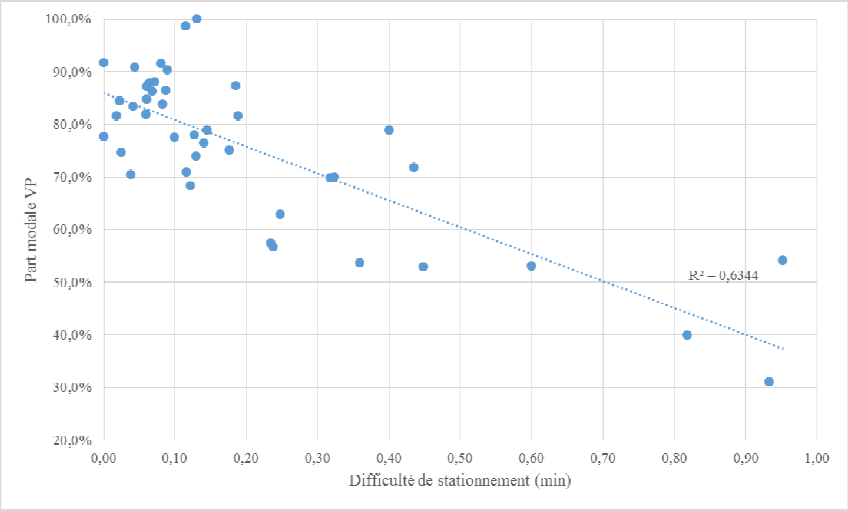
Tableau 12:Vitesses génériques moyennes par classe de distance et par mode.

V.4.2.2. Difficulté de stationnement

Lors du développement initial du modèle, il était envisagé de prendre le coût de stationnement à l'arrivée comme composante du coût d'usage de la voiture particulière. Cela aurait permis de pouvoir jouer sur ce coût pour simuler des politiques plus restrictives en matière d'accès aux zones centrales. De la même façon, un péage urbain pouvait être simulé. Il s'avère que ce choix présente plusieurs difficultés.

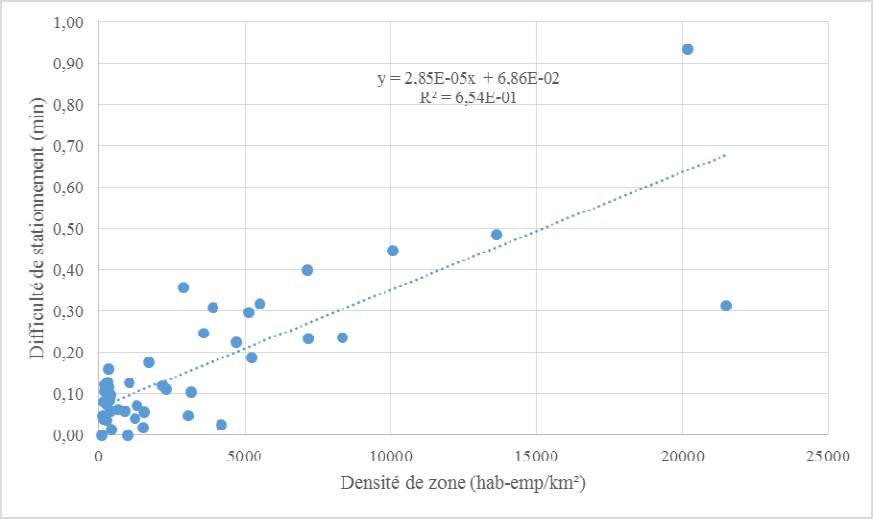
Tout d'abord, la taille relativement importante des zones rend assez délicat de considérer un seul et même coût de stationnement, en particulier pour des zones périphériques où il n'existe parfois un stationnement que dans des zones très limitées, par exemple les centres des bourgs. De plus, le manque d'informations sur la répartition entre parkings publics (en ouvrage, en surface, payant, gratuit, etc.) et stationnement privé empêche la génération d'une donnée correcte.

La difficulté de stationnement est donc représentée par la durée moyenne de recherche d'un lieu de stationnement. Cette donnée est fournie par l'EMD, sur la base des déclarations des individus interrogés, à savoir les utilisateurs de la voiture particulière pour un motif polarisé depuis le domicile. Pour valider le choix de cette variable, il est possible de procéder à une régression linéaire liant la part modale de la voiture particulière à la difficulté de stationnement.



Graphe 3: Corrélation entre difficulté de stationnement et part modale de la voiture particulière dans la zone d'arrivée. Sources : EMD

La littérature indique qu'il pourrait être envisageable d'utiliser la densité bâtie de la zone pour approcher cette valeur. Cela pourrait être intéressant dans le cas où l'on ne disposerait pas de données chiffrées. Cependant, en l'absence de données SIG relatives au bâti exploitables, il n'a pas été possible de générer une analyse systématique de la corrélation. Il a donc été décidé d'étudier la densité d'emplois et de population, qu'il est possible d'établir grâce aux données INSEE. Une régression linéaire permet de déterminer la corrélation entre la difficulté de stationnement et cette donnée.

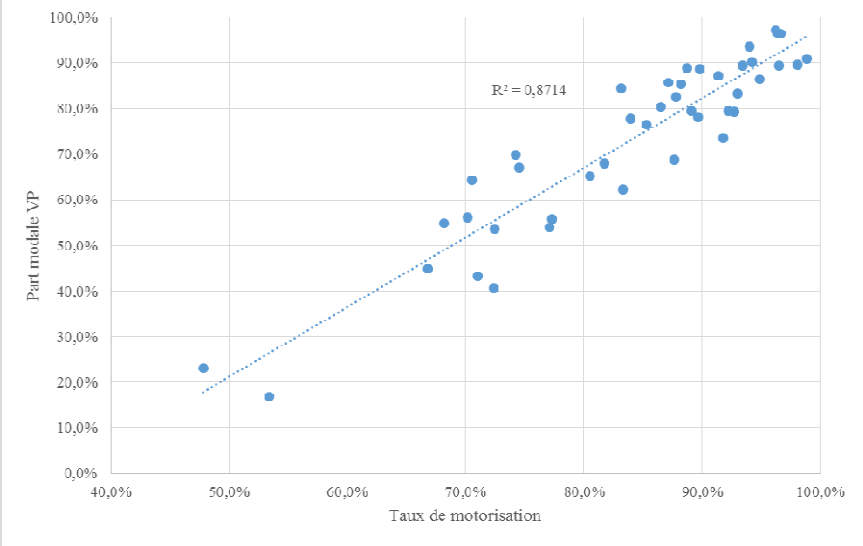


Graphe 4 : Corrélation entre densité de zone et difficulté de stationnement. Sources : EMD

V.4.2.3. Taux de motorisation

Le taux de motorisation tel que nous l'avons défini correspond à la part de ménages dotés d'une voiture particulière. Il se distingue de la définition usuelle en France, qui est le nombre moyen de voitures par ménage, en raison de sa significativité plus faible.

On constate une forte corrélation entre la part modale de la voiture particulière et le taux de motorisation de la zone agrégée de départ. La possession d'une voiture particulière est évidemment déterminante dans le choix du mode de transport. Il paraît trivial que le fait de ne pas être motorisé va compromettre l'utilisation de la voiture particulière. En revanche, un individu ayant un véhicule à disposition va être plus fortement incité de l'utiliser, bien que des alternatives modales puissent être disponibles et pertinentes.



Graphe 5: Corrélation entre taux de motorisation et part modale de la voiture particulière pour le motif domicile-travail. Sources : EMD.

V.4.2.4. Coût monétaire du transport

Le coût d'un déplacement est perçu de manière très différente selon le mode utilisé. La marche à pied sort bien évidemment de ce cadre, et le vélo ne représente pas un coût d'utilisation important pour l'usager, puisque les consommables sont, dans le cadre d'un usage sans incident majeur, limités à des articles de faible coût (pneumatiques, matériel de petites réparations, etc.). Le frein serait bien plus à chercher du côté des compétences techniques requises pour éviter la sollicitation de réparateurs monnayant leurs prestations.

La voiture particulière est sans doute le mode où la divergence entre coût perçu et coût réel est la plus importante. On se réfère trop souvent au coût marginal d'utilisation, autrement dit le carburant, pour évaluer celui du déplacement. Or un véhicule voit sa valeur se déprécier au fil des années, exige un entretien régulier nécessitant l'achat de consommables (pneus, pièces détachées, lubrifiants, etc.), et génère des frais relatifs à sa possession (assurance, frais financiers). Ces données sont généralement omises dans le raisonnement de l'automobiliste, ou tout du moins mal évaluées.

À titre d'illustration, en considérant un automobiliste moyen, les frais fixes représentent 86 % des dépenses, soit 47 centimes par kilomètre. Ainsi, le coût kilométrique marginal, constitué des seuls carburants, n'est que de 8 centimes d'euro[14].

La France est le pays d'Europe occidentale où le coût des transports est le plus faible[15]. Le financement des transports collectifs bénéficie en effet d'un important soutien des pouvoirs publics (34 %), tandis le versement transport en assure près de 45 %. La part payée en propre par l'usager ne représente en moyenne que 20 %[16]. Le prix du titre unitaire constitue donc une image tronquée du prix du déplacement. De plus, l'usager peut bénéficier d'offres d'abonnement adaptées à sa situation, qui réduisent sa perception du coût réel, puisqu'il y a découplage entre l'utilisation et le prix payé. Si l'on considère le cas du réseau de transports en commun de l'agglomération lyonnaise, la recette moyenne par voyage s'établit à 50 centimes d'euro, soit 7 centimes par kilomètre[17].

Il apparaît donc que les coûts marginaux des transports en commun et de la voiture particulière sont assez voisins. Dans ce cas, le calage du modèle ne pourra pas s'effectuer en prenant en compte ce paramètre car la compétition VP–TC n'y sera pas conditionnée dans l'expression du coût généralisé. Il est donc logique de se demander s'il est nécessaire de conserver ce paramètre. Du point de vue de la cohérence interne du modèle, cela ne semble pas pertinent, car la sensibilité au coût dans le cadre du choix modal est assez limitée. Toutefois, dans le cadre d'un modèle proposé aux collectivités locales, il s'avère nécessaire de mettre en avant cette faible influence du coût du transport pour orienter les politiques de déplacements vers d'autres solutions.

[14] Automobile Club Association. *Le budget ACA de l'automobiliste*, juin 2014.
[15] GART–UTP, *Tarification des réseaux de transports urbains. État des lieux 2013–Rétrospective 2003-2013,* juin 2014.
[16] Faivre d'Arcier B., *La situation financière des transports publics urbains est-elle « durable » ?*, Les cahiers scientifiques du transport n°58, 2010, p. 3-28.
[17] SYTRAL. *Rapport financier annuel 2013*, juin 2014.

V.4.3. Formulation

La part modale du mode 1 parmi l'ensemble des modes *k* entre les zones *i* et *j* se détermine par l'intermédiaire d'un modèle logit selon la formulation suivante :

$$P(1) = \frac{e^{C_{g}^{1}{}_{ij}}}{\sum_k e^{C_{g}^{k}{}_{ij}}}$$

Une fois la part modale calculée, cette dernière va s'appliquer au volume de déplacement relevé entre l'origine et la destination considérées, ce qui permet de déterminer le nombre de déplacements par mode.

V.4.4. Résultats

Les résultats obtenus pour chaque modèle sont assez encourageants en ce qui concerne les parts modales à des niveaux supérieurs d'agrégation. À l'échelle de l'agglomération, les écarts absolus sont de l'ordre du point de pourcentage.

	Mulhouse	Strasbourg	Bordeaux
Moindres carrés absolus	2 991	16 579	15 060
Moindres carrés rapportés au nombre de déplacements	0,077	0,096	0,074

Tableau 13: Somme des moindres carrés absolue et relative du meilleur calage obtenu.

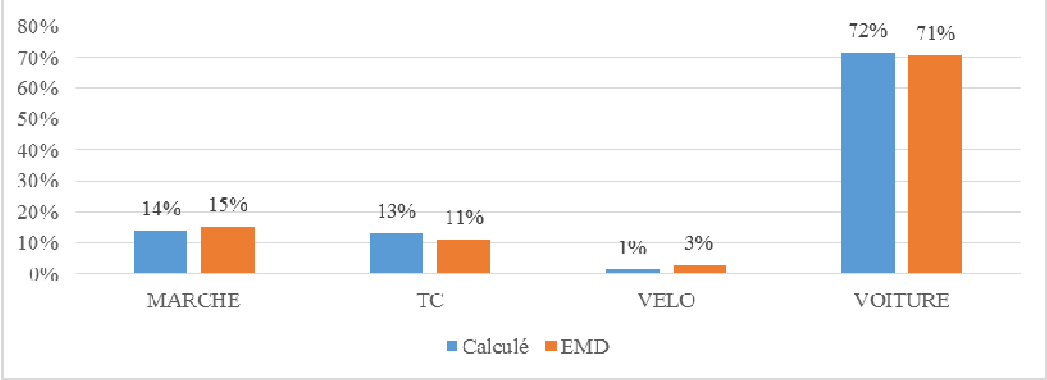
Sur chaque origine-destination, on relève cependant de forts écarts entre les données issues de l'EMD et les déterminations du modèle, de telle sorte qu'il devient inenvisageable d'effectuer des prévisions à cette échelle. Les agglomérations de Mulhouse et Strasbourg ont fourni les meilleurs résultats, qu'il s'agisse d'un niveau agrégé à l'échelle du périmètre, comme entre chaque zone.

L'agglomération de Bordeaux, en dépit d'un calage apparemment plus abouti, montre des disparités très importantes entre les données issues de l'EMD et celles déterminées par le modèle. Le peu de temps imparti pour le traitement des données relatives à cette étude n'a pas permis de mener à bien les tests et vérifications qui auraient pu permettre l'identification de la source de cette divergence, comme on a pu le mener dans le cas des autres agglomérations.

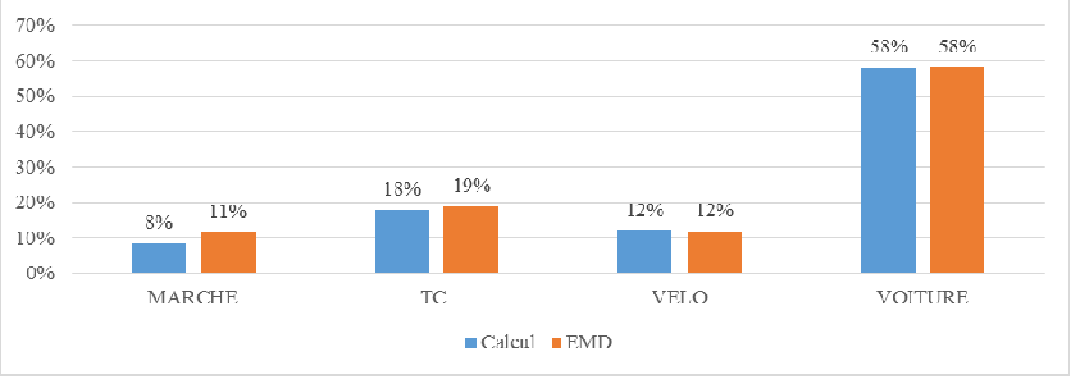
Il est possible que la structure géographique de l'agglomération, qui présente des points de traversée de la Garonne peu nombreux et congestionnés, avec des itinéraires routiers plus ou moins contraints d'emprunter la rocade et les boulevards, explique que les formulations en termes de distance s'avèrent inadaptées.

V.4.4.1. Niveau agglomération

Les agglomérations de Mulhouse et Strasbourg ont fourni de bons résultats à l'échelle du périmètre d'étude. Les parts modales estimées sont similaires à quelques points de pourcentage près. On notera une tendance à sous-estimer la marche à pied, notamment en raison des déplacements entre zones qui sont généralement éliminés par le modèle du fait du calcul des distances entre centroïdes, qui surestiment les distances de déplacements entre points proche des frontières de zones agrégées. Cela constitue une piste d'amélioration à étudier.

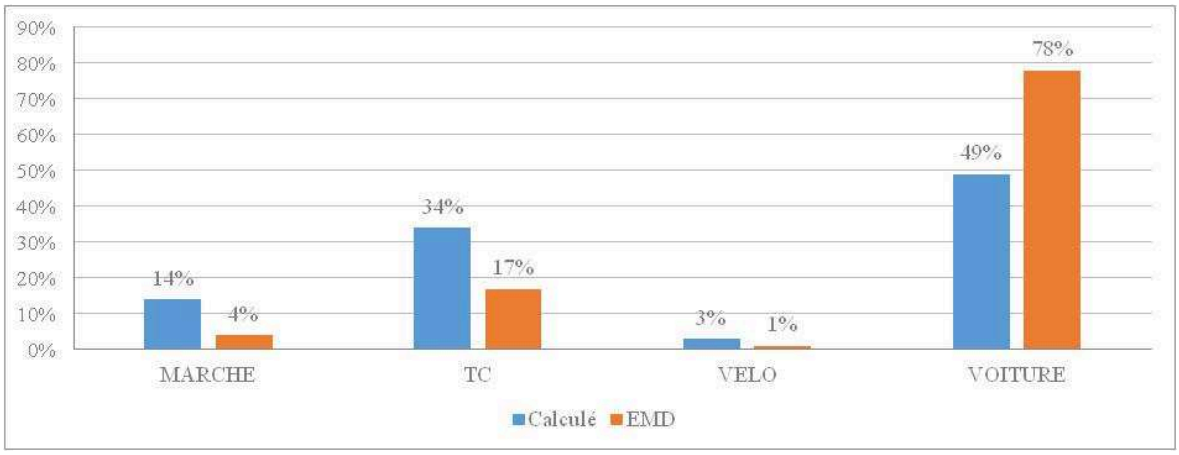


Graphe 6: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle pour l'ensemble de l'agglomération de Mulhouse, pour le motif domicile-travail polarisé.



Graphe 7: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle pour l'ensemble de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.

Comme dit précédemment, les résultats obtenus dans le cadre de l'agglomération de Bordeaux sont très insatisfaisants. On note une prépondérance des transports en commun dans le modèle, ce qui contraste avec ce qui avait pu être constaté au moment du calage des autres agglomérations, lors du développement du modèle, c'est-à-dire une hégémonie de la voiture au détriment des autres modes.

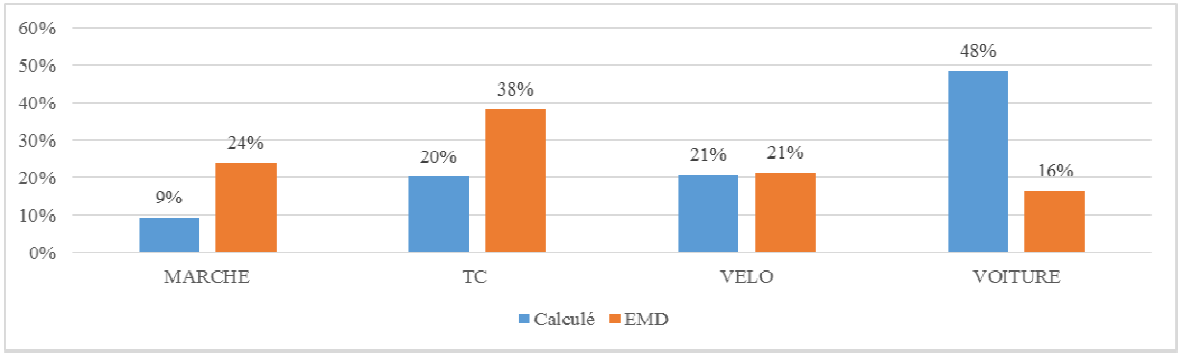


Graphe 8: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle pour l'ensemble de l'agglomération de Bordeaux, pour le motif domicile-travail polarisé.

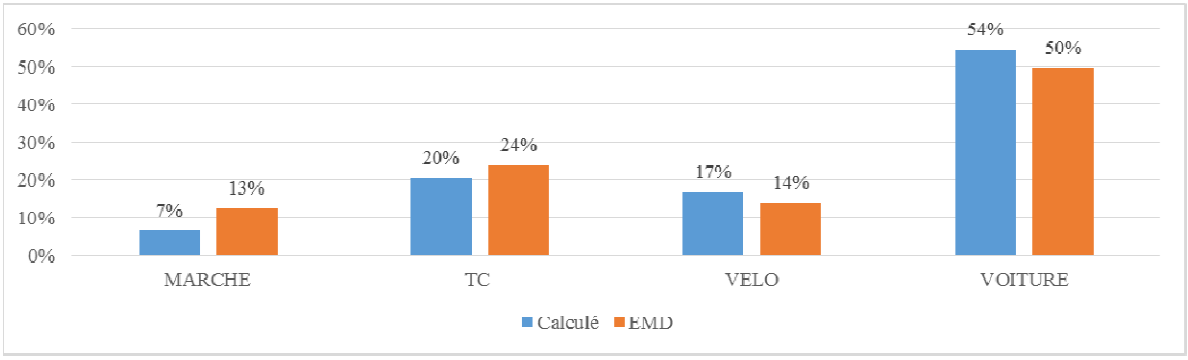
V.4.4.2. Niveau couronne

La structure en couronnes du zonage agrégé utilisé pour l'agglomération de Strasbourg permet d'éditer des résultats selon ce niveau d'agrégation, qui est intéressant pour distinguer les différentes typologies de structure urbaine :

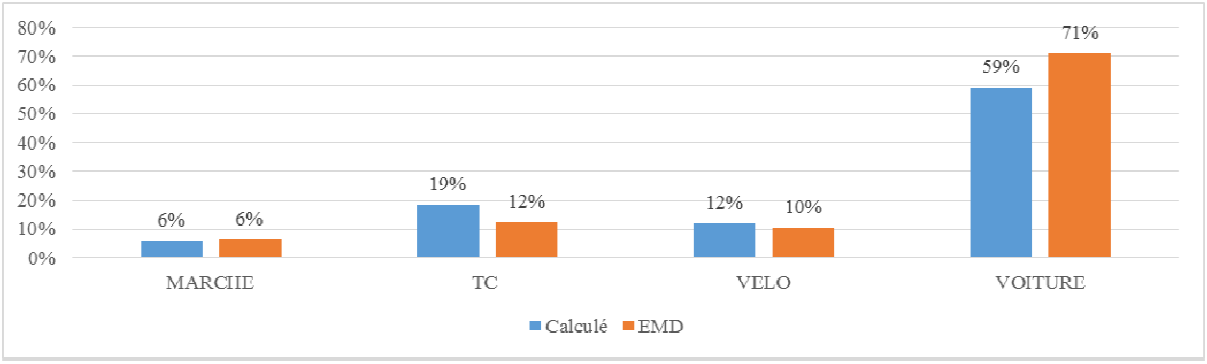
- la couronne 1 correspond à l'hypercentre (Grande Île) et des quartiers alentours ;
- la couronne 2 est constituée des faubourgs et de la proche banlieue ;
- la couronne 3 regroupe les communes restantes de la banlieue et de la périphérie dense ;
- la couronne 4 est une agrégation des communes du périurbain plus lâche ou rural.



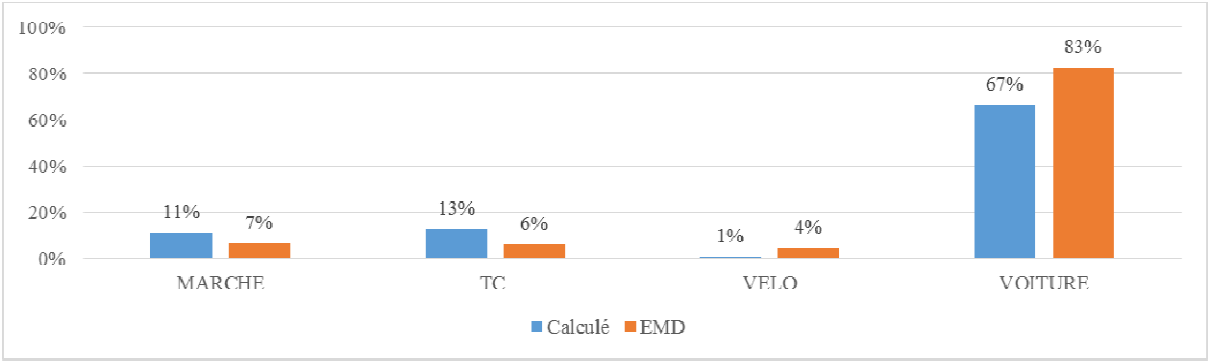
Graphe 9:Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 1 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.



Graphe 11: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 2 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.



Graphe 12: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 3 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.



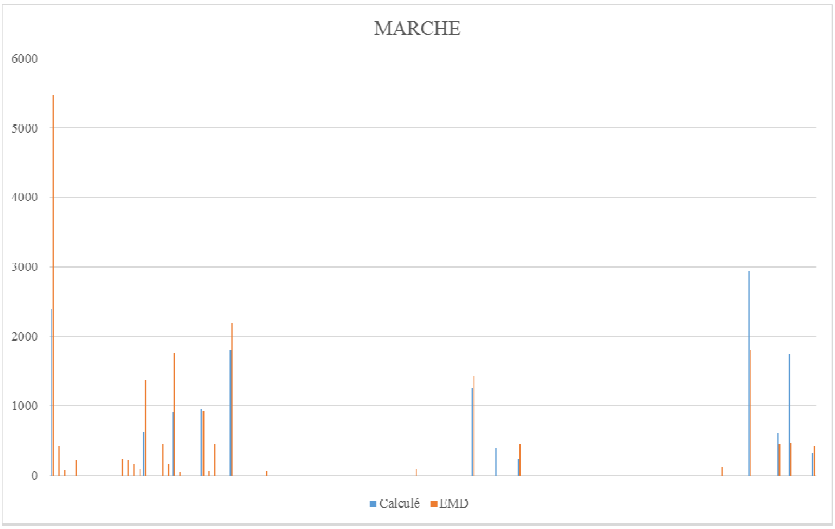
Graphe 10:Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 4 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.

On remarque que les parts modales au départ de l'hypercentre sont les moins fidèles à la réalité, notamment en raison de la difficile simulation de la très forte contrainte sur l'automobile au sein de ce secteur sauvegardé. Pour les autres couronnes, la part des transports collectifs est surestimée au détriment de la voiture.

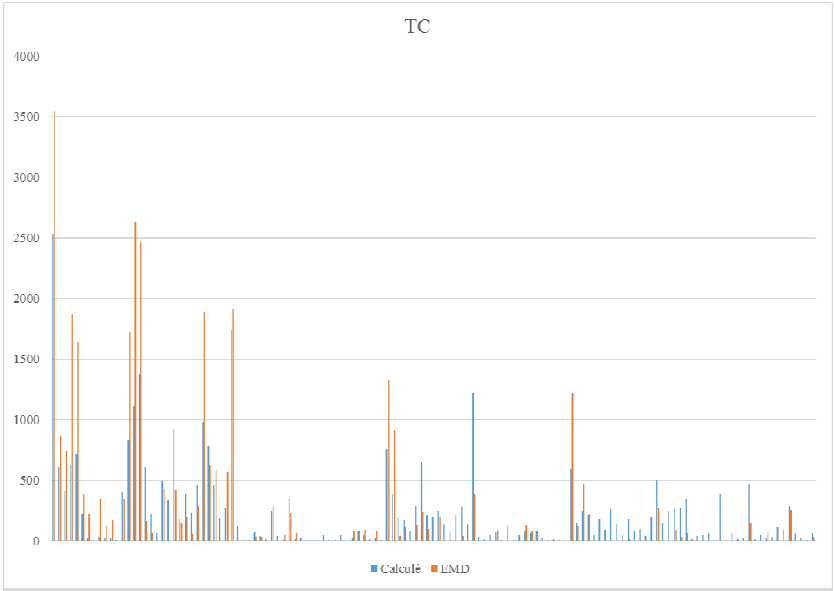
V.4.4.3. Origines-destinations

Afin de comparer les volumes de déplacements par origine-destination pour chacun des modes étudiés, entre valeurs réelles et calculées, on se base sur les chiffres issus de l'EMD, auxquels on applique les parts modales, ce qui permet une analyse toutes choses égales par ailleurs.

La voiture est le mode pour lequel les résultats sont les plus concluants, en raison de volumes importants quelle que soit l'origine-destination considérée, ce qui permet un calage général de bonne qualité. Les émissions polluantes étant majoritairement issues de l'automobile, on peut s'attendre à une évaluation convenable de ce point de vue.

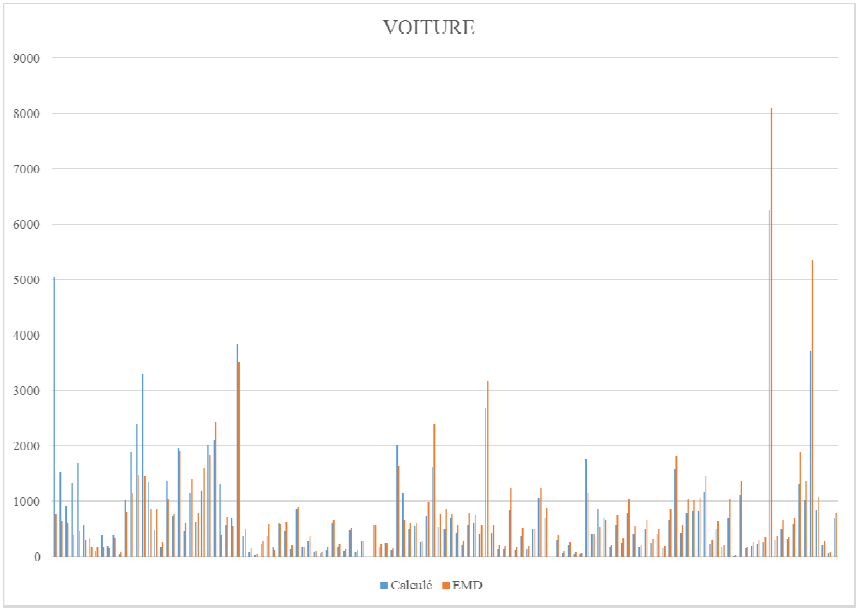


Graphe 14: Nombre de déplacements marche à pied mesurés et calculés par origine-destination pour l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.

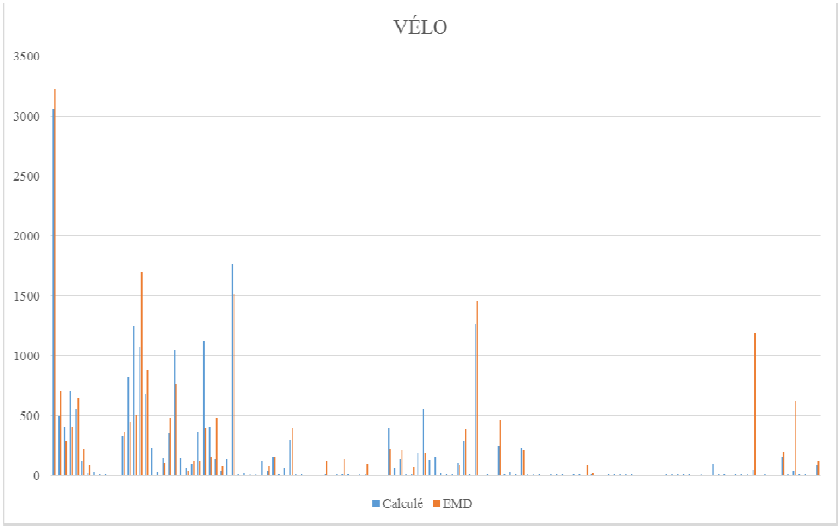


Graphe 13 : Nombre de déplacements transports en commun mesurés et calculés par origine-destination pour l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.

On constate que les volumes de marche à pied sont plus faibles que ceux relevés dans l'EMD. Comme il a pu être dit, il s'agit de déplacements locaux, le plus souvent intrazones ou entre deux zones limitrophes. Ces derniers ne bénéficient pas d'un traitement séparé du point de vue de leur distance, contrairement aux déplacements intrazones où l'on applique un « budget » constant caractérisant un déplacement interne moyen.



Graphe 15:Nombre de déplacements voiture mesurés et calculés par origine-destination



Graphe 16:Nombre de déplacements vélo mesurés et calculés par origine-destination pour l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé.

VI. Critiques et perspectives

VI.1. Résultats

Les résultats présentés dans le cadre du modèle sont contrastés. Les étapes fournissent des résultats encourageants, mais qu'il est impératif d'affiner avant de considérer d'autres motifs. L'étape de génération montre encore des divergences notables avec la réalité pour certaines zones, ce qui est défavorable du point de vue du rassemblement final des trois étapes. Car il ne faut pas perdre de vue que l'enchaînement des étapes entraîne l'accumulation d'erreurs, qui à l'heure actuelle, au vu de leur importance, pourraient vraisemblablement générer des résultats de qualité très médiocre.

L'étape de distribution est à revoir, la fonction de dissuasion utilisée semblant inadaptée. L'utilisation d'un coût généralisé est une voie de recherche à privilégier, car il donne de bons résultats dans le cadre du choix modal. Sa mise en œuvre fera l'objet d'un travail ultérieur.

Le choix modal présente des résultats satisfaisants à des échelles d'agrégation supérieures, cela encourage à poursuivre dans cette voie pour l'extension du modèle aux autres motifs, tout en procédant à des analyses statistiques plus poussées des variables explicatives utilisées, ainsi que la structure des distances parcourues par mode, de manière à anticiper la phase de calcul des consommations énergétiques et émissions polluantes.

VI.2. Acquisition et traitement des données

La principale difficulté rencontrée lors du développement du modèle réside dans l'acquisition et le traitement des données.

L'opérationnalité du modèle passe par l'automatisation du traitement des données EMD. La première phase de jointure des tables déplacements, trajet et ménages se fait aisément au moyen d'un logiciel adapté et de la génération de codes spécifiques désignant chaque entrée. En revanche, et contrairement à ce que préconise le CERTU[18], les noms de variables présentes dans les diverses tables des EMD, et désignant les mêmes réalités, ne sont pas identiques. Bien dans l'ensemble qu'assez proches du point de vue de leur intitulé, elles compromettent toute extraction automatique des données qui s'avèrent nécessaires pour générer les variables explicatives.

Il faut donc élaborer manuellement une table de correspondance entre variables, à partir de la base de référence du CERTU, et leur associer un nom générique.

La collecte des informations géographiques a été également fastidieuse. Dans le cadre de l'EMD de Strasbourg, qui avait déjà bénéficié d'un travail approfondi de la part d'EIFER pour un autre projet, il

[18] CERTU, *L'enquête ménages déplacements « Standard CERTU »*, janvier 2008.

a été assez facile de disposer d'une cartographie des zones agrégées et de leur composition en termes d'IRIS. Les coordonnées des zones fines étaient également fournies, ce qui a permis une détermination des distances conformément à la méthodologie du CERTU présentée page 29. En revanche, cela a été nettement plus compliqué dans le cas de l'agglomération de Mulhouse, puisque les localisations des différents découpages de l'EMD n'étaient pas disponibles. En premier lieu, il a fallu reconstituer à la main la composition en IRIS des zones de tirage (DTIR), dans le but d'y affecter les informations statistiques de l'INSEE. Ainsi, à partir des coordonnées de centroïdes et des surfaces, en calculant un barycentre, les informations géographiques des DTIR ont été recalculées. Il y a donc eu perte de précision sur les données, puisque les distances ont été calculées avec la méthodologie CERTU sur la base du découpage DTIR.

La même méthodologie a été appliquée dans le cas de l'EMD de Bordeaux, pour laquelle aucune information n'était fournie avec les données brutes, à ceci près qu'il a fallu travailler à partir de cartographies de piètre qualité, issues d'un document électronique publié par la Communauté Urbaine, ce qui a été très fastidieux et chronophage.

Il paraît indispensable d'élargir les investigations à d'autres EMD pour conforter les tendances constatées, d'une part d'un point de vue comportemental, et d'autre part pour envisager la synthèse de ratios standardisés en vue d'une utilisation généralisée. On peut s'attendre à observer des différences en fonction de la taille des périmètres d'agglomérations considérés, ainsi que des variations d'ordre culturel.

VI.3. Offre de transport

L'indisponibilité des données relatives aux transports collectifs, à la fois en termes de géolocalisation comme de niveau d'offre, a contraint l'utilisation d'une méthode d'affectation binaire en fonction de la desserte par un TCSP de la zone agrégée, qui montre ses limites au sens où elle destine l'ensemble des individus d'une zone à un même mode de transport, ce qui amène à calculer deux coûts généralisés différenciés pour les modes T et B, et choisir entre les deux au moment du calcul des parts modales. Il pourrait être envisageable de calculer un coût composite en fonction de la qualité de la desserte de la zone par le TCSP. Cela peut être déterminé de deux manières, tout en sachant qu'il n'a pas été possible de le tester en conditions réelles :

- une analyse des chaînes de déplacements dans l'EMD, relativement complexe, permettrait de déterminer la part d'utilisateurs du mode T au départ de la zone parmi les transports en commun ;

- lorsque des données SIG sont disponibles au niveau du bâti (données carroyées INSEE ou base de données topographiques IGN), il serait possible de rapporter le nombre de bâtiments inclus dans la zone de chalandise du TCSP au nombre total de la zone. Le nombre de stations de TCSP étant généralement assez faible, une opération de positionnement et de traitement manuellement est envisageable. Cette méthode a cependant l'inconvénient d'affecter au mode B le reste du bâti de la zone, qui d'une part n'est pas forcément synonyme d'emplois ou de logements, et qui d'autre part ne préjuge pas de la présence ou non d'une desserte bus. Dans le cas où la géolocalisation de l'ensemble des arrêts du réseau serait disponible, il sera possible d'affiner en considérant la zone de chalandise de chaque mode, celle du TCSP étant prépondérante en cas de concurrence.

La description plus précise de l'offre de transports en commun permet une synthèse plus raffinée du coût généralise, par la détermination plus fine du temps d'accès au réseau de transports collectifs et du temps d'attente du véhicule.

VI.4. Segmentation des motifs

Au cours de ce stage, il a été choisi de ne se concentrer sur le motif domicile-travail pour les raisons que nous avons évoquées en page 26. Les autres motifs obéissent à des schémas de comportement différents et plus complexes à déterminer. Nous avons vu que dans le cas des déplacements domicile-études, il était possible de distinguer trois catégories en fonction de l'âge de l'individu. Cela constitue des pistes pour la création d'une nouvelle plateforme de test dédiée. Enfin il reste à explorer la piste du concept de budget temps global permettant de quantifier le temps dévolu aux autres déplacements. La détermination du volume temporel peut aboutir à sa transformation en distances, mais encore faut-il disposer des vitesses pratiquées, ou, mieux encore, du mode de transport. Or il s'agit là d'inconnues à déterminer tout autant. Il est donc envisageable d'étudier le degré d'homogénéité de cet ensemble composite sur l'ensemble des agglomérations pour lesquelles des données EMD sont à disposition, afin de pouvoir dégager des hypothèses quant à la structure modale et la distribution des déplacements correspondants.

Conclusion

Le modèle OPEM Transport, développé par EIFER, a pour vocation l'évaluation des consommations énergétiques et des émissions polluantes provenant de la mobilité, dans le cadre d'études commanditées par les collectivités locales.

Il s'agit d'un modèle de type quatre étapes, mais dans lequel on omet celle d'affectation, en l'absence de description fine des réseaux et de nécessité d'information sur les itinéraires empruntés. Les contraintes inhérentes aux équipes d'ingénierie responsables des études nécessite une pleine opérationnalité du modèle, qui a été le fil conducteur de cette étude.

Le développement de cet outil s'est déroulé avec en filigrane l'optimisation à la fois de l'intégration des données comme du temps d'exécution et de traitement. Cette exigence de compromis entre facilité de mise en œuvre et précision des résultats a conduit à examiner les différentes sources de données et leur segmentation, justifier les variables explicatives du modèle, et développer les formulations mises en œuvre.

L'étude a ainsi retenu le motif domicile-travail pour le développement des trois étapes pour des raisons tenant à la meilleure cohérence et explicabilité des comportements. Les résultats des différentes étapes, encore à ce jour considérées indépendamment, affichent une précision contrastée. Si l'étape de choix modal paraît cadrer avec les objectifs de précision à des niveaux d'agrégation supérieurs, il est nécessaire de poursuivre les investigations, notamment en ce qui concerne la distribution et la génération dans une moindre mesure, en introduisant de nouvelles spécifications.

Une fois l'amélioration des résultats obtenue, on envisagera l'extension du modèle à d'autres motifs de déplacements, pour lesquels une méthodologie similaire devra être suivie, avec une attention accrue sur la pertinence statistique des variables.

Bibliographie

Anselme T., Jacquot M., *Processus de construction d'un modèle de choix modal, P.C.I. Méthodes, Outils et Démarches pour la Modélisation et l'Organisation des Déplacements (MOD²)*, CERTU, décembre 2013.

Automobile Club Association, *Le budget ACA de l'automobiliste*, juin 2014.

Bonnafous A., *Les siècle des ténèbres de l'économie,* Economica, 1989.

Bonnel P., *Prévoir la demande de transport*, Presses de l'ENPC, 2004.

Bourgeois G., *MODECO-NSM – Quelles marges de manœuvre pour obtenir un transfert modal de la voiture particulière vers le transport en commun ?, in* Transport Public, juin 2014, n°1147, pp. 76-80.

CERTU, *Modélisation des déplacements urbains de voyageurs – Guide des pratiques*, 2003.

CERTU, *L'enquête ménages déplacements « standard CERTU »*, janvier 2008.

CERTU, *Calcul* a posteriori *des distances dans les enquêtes ménages déplacements,* janvier 2009.

CERTU, *La mobilité urbaine en France. Enseignements des années 2000-2010*, janvier 2012, p. 32.

Commissariat général au développement durable, *La Revue du CGDD. La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*, Service de l'observation et des statistiques, décembre 2010.

Commissariat général au développement durable, *Chiffres clés de l'énergie – Édition 2012*, Service de l'observation et des statistiques, décembre 2012.

Communauté urbaine de Bordeaux, *Enquête Ménages Déplacements réalisée dans l'agglomération bordelaise en 2008-2009 – Rapport d'analyse*, décembre 2009.

Crozet Y., *Le temps et les transports de voyageurs*, CEMT, juin 2003.

EIFER, *PEV – OPEM – Secteur transport de personnes – Note méthodologique et de capitalisation*. Document interne, ref. HN-41/13/002, mars 2013.

Faivre d'Arcier B., *La situation financière des transports publics urbains est-elle « durable » ?*, Les cahiers scientifiques du transport n°58, 2010, p. 3-28.

GART–UTP, *Tarification des réseaux de transports urbains. État des lieux 2013–Rétrospective 2003-2013,* juin 2014.

Groupe de travail pour le développement de l'usage du vélo, *Plan national vélo*, janvier 2012.

Keolis, *Keoscopie 2012*, 2012.

IAURIF, *Recherche sur le choix modal en milieu urbain – Rapport final*, juin 2000.

Rocquigny Q. (contribution de), *Valeurs du temps* in Tome 2 « L'évaluation socio-économique en période de transition », groupe de travail présidé par Émile Quinet, Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Rapports & Documents, avril 2013.

SYTRAL. *Rapport financier annuel 2013*, juin 2014.

Annexes

Zonage..... 57

Génération..... 60

Choix modal..... 61

Distribution..... 63

Zonage

Les exemples suivants correspondent respectivement à un découpage en zones agrégées réalisé à partir des DTIR (Strasbourg), en reprenant un découpage D30 (Bordeaux) ou D10 (Mulhouse) d'une EMD.

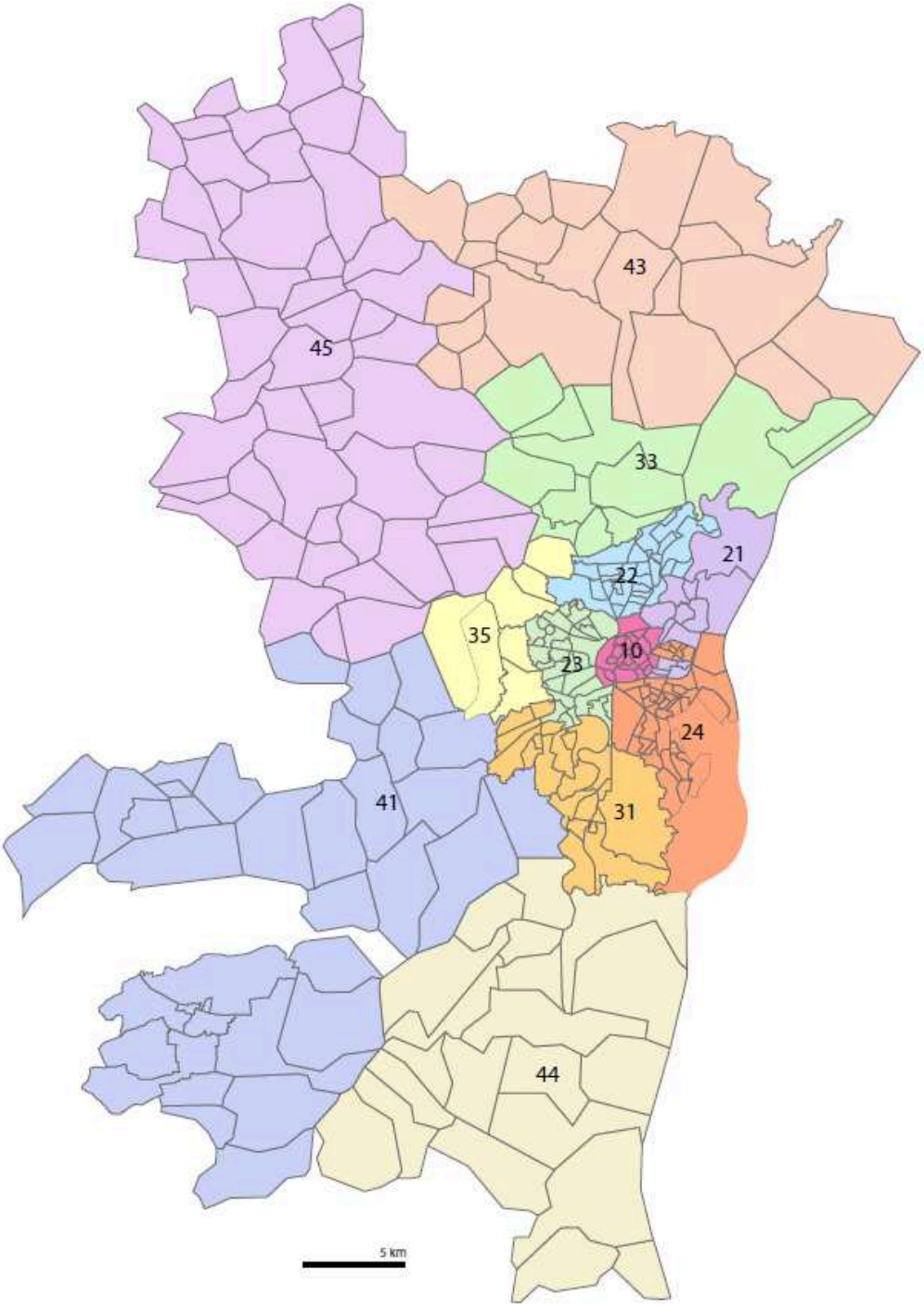


Figure 4 : Découpage en zones agrégées utilisé dans le modèle pour l'agglomération de Strasbourg.

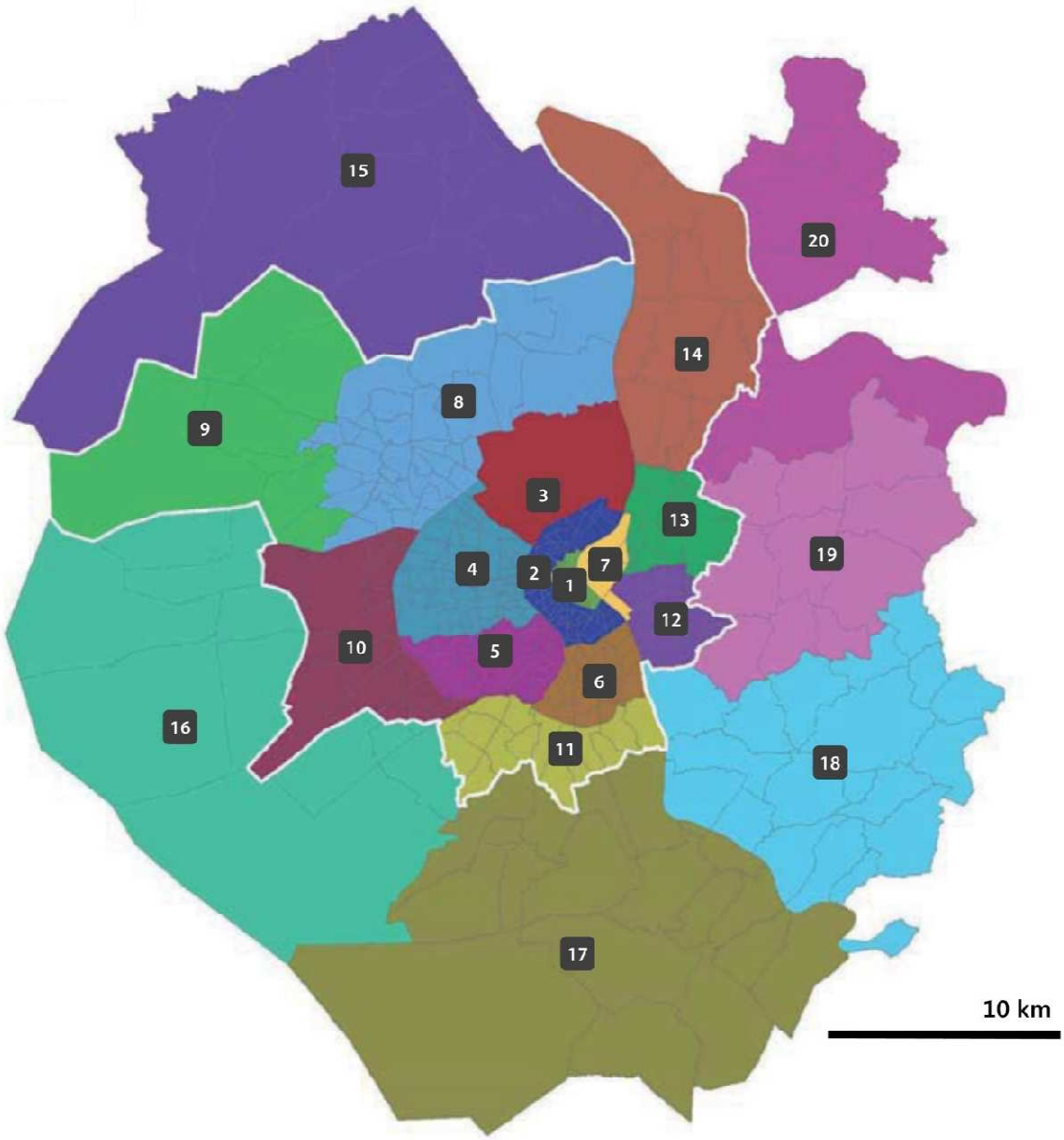


Figure 5: Découpage D30 de l'EMD de Bordeaux, utilisé dans le modèle. Source : CUB.

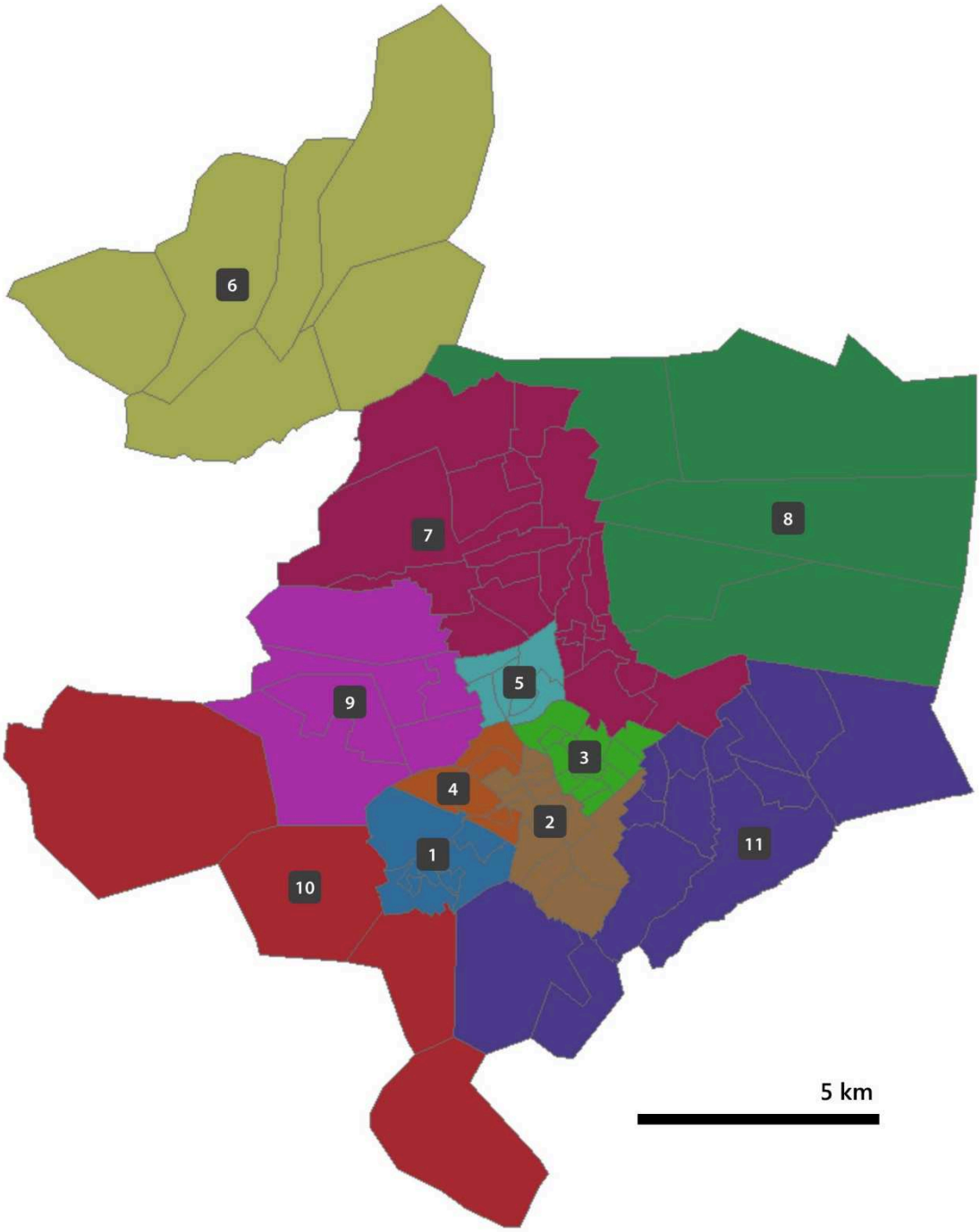


Figure 6: Découpage D10 de l'EMD de Mulhouse, utilisé dans le modèle. Source : M2A.

Génération

Les régressions linéaires permettent de calculer les émission et attractions à partir de la population et du nombre d'emplois de la zone agrégée :

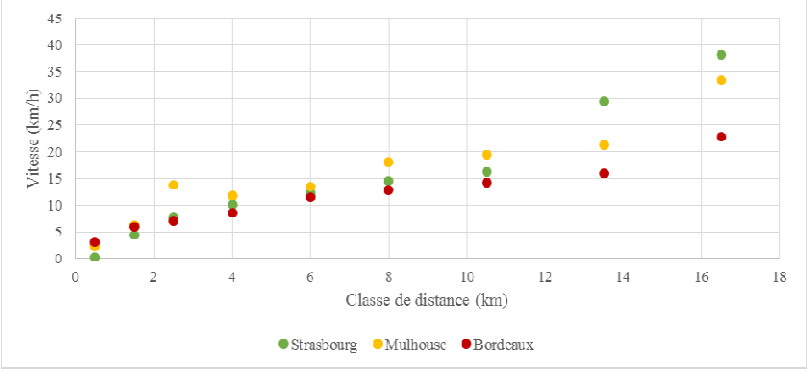
$$\begin{cases} E = 0{,}2619\,P - 799{,}84 \\ A = 0{,}4993\,J + 1328{,}6 \end{cases}$$

					Mesuré		Calcul		Écarts relatifs	
		P	J	P/J	E	A	E	A	E	A
Mulhouse	1	19681	9548	2,1	3369	4268	4355	6096	29,2%	42,8%
	2	35833	21289	1,7	4314	8037	8585	11958	99,0%	48,8%
	3	27689	9341	3,0	5770	4639	6452	5993	11,8%	29,2%
	4	14903	7326	2,0	4002	4172	3103	4986	-22,5%	19,5%
	5	11482	1612	7,1	1672	952	2207	2133	32,1%	124,0%
	6	13337	2717	4,9	1669	1078	2693	2685	61,3%	149,0%
	7	41569	15401	2,7	8223	6940	10087	9018	22,7%	29,9%
	8	11737	10134	1,2	2293	4709	2274	6389	-0,8%	35,7%
	9	18541	5632	3,3	2421	1494	4056	4141	67,5%	177,1%
	10	9604	1581	6,1	1280	546	1715	2118	34,0%	288,2%
	11	31422	6035	5,2	4665	2843	7430	4342	59,3%	52,8%
Strasbourg	10	59777	56352	1,1	25938	39591	14856	29465	-42,7%	-25,6%
	21	37812	19711	1,9	9156	13925	9103	11170	-0,6%	-19,8%
	22	63903	25310	2,5	15095	15098	15936	13966	5,6%	-7,5%
	23	76357	24455	3,1	19519	16333	19198	13539	-1,6%	-17,1%
	24	93150	42354	2,2	22600	27830	23596	22476	4,4%	-19,2%
	31	54556	21230	2,6	17928	15157	13488	11929	-24,8%	-21,3%
	33	32580	14990	2,2	7737	6612	7733	8813	0,0%	33,3%
	35	20357	6515	3,1	6315	4194	4532	4582	-28,2%	9,3%
	41	66573	65584	1,0	20951	19789	16636	34075	-20,6%	72,2%
	43	38928	21739	1,8	7419	5041	9395	12183	26,6%	141,7%
	44	41421	13329	3,1	14948	10075	10048	7984	-32,8%	-20,8%
	45	39536	5636	7,0	8507	2467	9555	4143	12,3%	67,9%
Bordeaux	1	38114	31751	1,2	7273	22420	9182	17182	26,3%	-23,4%
	2	119887	66489	1,8	30524	37098	30598	34527	0,2%	-6,9%
	3	49623	31915	1,6	10867	19116	12196	17264	12,2%	-9,7%
	4	120750	43137	2,8	27762	24768	30825	22867	11,0%	-7,7%
	5	82519	22584	3,7	18129	10154	20812	12605	14,8%	24,1%
	6	33744	12783	2,6	8124	7213	8038	7711	-1,1%	6,9%
	7	15019	9742	1,5	4528	5664	3134	6193	-30,8%	9,3%
	8	68279	20786	3,3	16609	14589	17082	11707	2,9%	-19,8%
	9	19844	3397	5,8	5221	3846	4397	3025	-15,8%	-21,3%
	10	27172	44204	0,6	7081	19106	6316	23400	-10,8%	22,5%
	11	37632	9948	3,8	11271	5862	9056	6296	-19,7%	7,4%
	12	19308	5345	3,6	4552	3454	4257	3997	-6,5%	15,7%
	13	49286	16172	3,0	11064	8725	12108	9403	9,4%	7,8%
	14	33032	4924	6,7	7890	6181	7851	3787	-0,5%	-38,7%
	15	28079	905	31,0	6464	3669	6554	1781	1,4%	-51,5%
	16	35655	9301	3,8	8269	6492	8538	5972	3,3%	-8,0%
	17	37127	1224	30,3	8722	5134	8924	1940	2,3%	-62,2%
	18	29377	904	32,5	4499	2113	6894	1780	53,2%	-15,7%
	19	27867	902	30,9	6718	2913	6499	1779	-3,3%	-38,9%
	20	37984	1476	25,7	8138	5187	9148	2066	12,4%	-60,2%

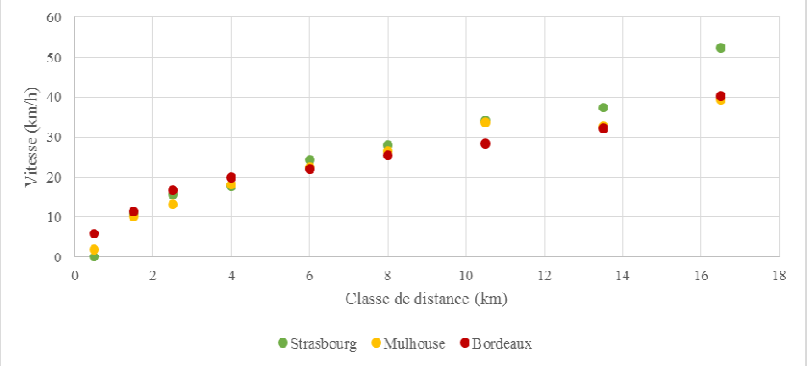
Tableau 14 : Résultats de l'étape de génération. Source : EMD

Vitesses par classes de distance

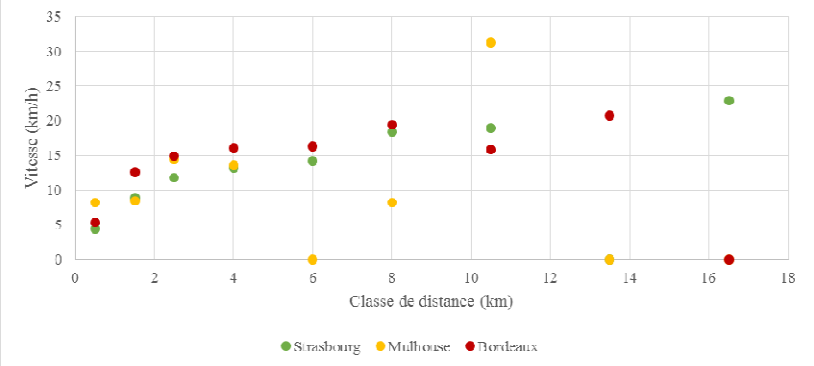
On consigne dans cette partie la distribution des vitesses par classe de distance et par mode de transport, dont on peut souligner l'homogénéité.



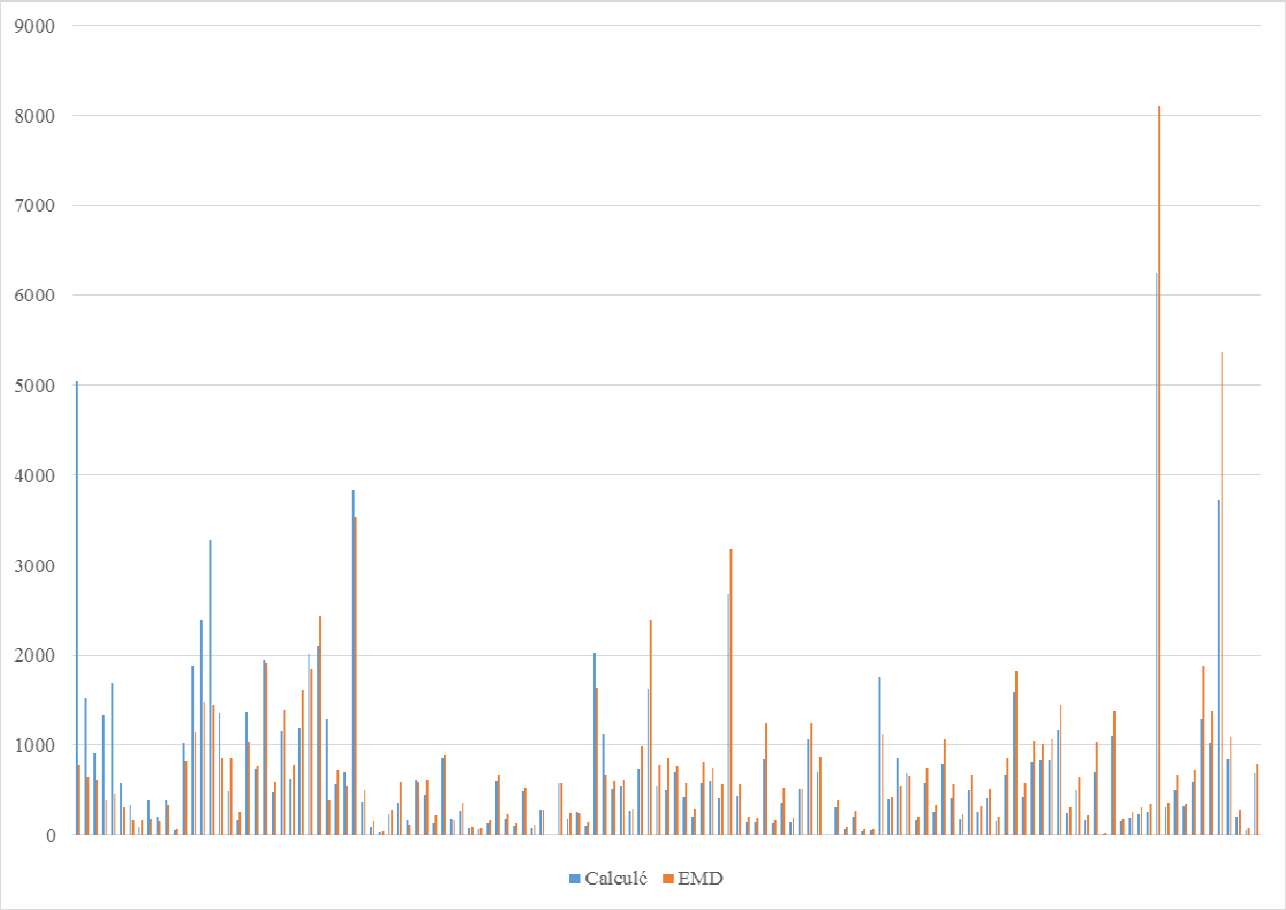
Graphe 17: Vitesse moyenne des déplacements en transports en commun par classes de distance. Sources : EMD



Graphe 18:Vitesse moyenne des déplacements en voiture particulière par classes de distance. Sources : EMD



Graphe 19:Vitesse moyenne des déplacements en vélo par classes de distance. Sources : EMD



Graphe 20: Volumes de déplacements en voiture particulière, par origine-destination, sur la base de l'EMD de Strasbourg, mesurées et calculées.

Distribution

Fonction de dissuasion

Afin de tester et caler un modèle de distribution en vue d'une utilisation au sein d'OPEM Transport, il a été décidé d'opérer une distribution à partir des émissions et attractions réellement constatées, de manière à évaluer la pertinence de ce mode opératoire. Le calage est effectué au moyen d'une méthode des moindres carrés sur les écarts relatifs entre « matrice réelle » (issue de l'EMD), et « matrice calculée », sortie du modèle, pondérés par les flux de déplacement de l'origine-destination considérée.

Les émissions-attractions relevées dans la matrice origine-destination initiale, ainsi que les coordonnées et surfaces des zones agrégées considérées sont de la forme suivante : **Erreur ! Liaison incorrecte.**La distance considérée entre chaque zone est celle entre centroïdes, les déplacements internes étant déterminés à partir du rayon moyen. Après calage, la fonction de dissuasion obtenue est de la forme :

$$f(d) = d^{-\xi} e^{-\lambda d} \text{ avec } \begin{cases} \lambda = 0{,}0307 \\ \xi = 1{,}0667 \end{cases}$$

Méthode de Furness

Une fois la matrice calculée initiale obtenue, on procède à la méthode de Furness, décrite page 35.

Matrice réelle

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	E_i
1	874	373	221	498	210	201	218	201	385	590	274	3369
2	487	980	620	478	313	238	292	338	312	376	776	4314
3	439	943	1629	594	762	377	569	625	451	411	964	5770
4	752	552	452	1129	480	276	369	305	560	465	383	4002
5	120	137	219	182	519	143	298	181	205	127	150	1672
6	28	25	26	25	34	448	99	88	61	52	37	1669
7	320	329	421	358	767	1060	1289	1042	736	449	459	8223
8	51	65	80	51	80	163	179	439	77	71	135	2293
9	196	122	116	189	183	228	255	155	440	307	128	2421
10	109	53	38	57	41	71	57	52	112	227	56	1280
11	223	484	396	207	215	219	255	436	204	248	712	4665
A_j	3369	4314	5770	4002	1672	1669	8223	2293	2421	1280	4665	

Matrice calculée initiale

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	$\sum_j T_{ij}$	E_i	F_i
1	874	373	221	498	210	201	218	201	385	590	274	4043	3369	0,83
2	487	980	620	478	313	238	292	338	312	376	776	5210	4314	0,83
3	439	943	1629	594	762	377	569	625	451	411	964	7764	5770	0,74
4	752	552	452	1129	480	276	369	305	560	465	383	5724	4002	0,70
5	120	137	219	182	519	143	298	181	205	127	150	2282	1672	0,73
6	28	25	26	25	34	448	99	88	61	52	37	923	1669	1,81
7	320	329	421	358	767	1060	1289	1042	736	449	459	7231	8223	1,14
8	51	65	80	51	80	163	179	439	77	71	135	1391	2293	1,65
9	196	122	116	189	183	228	255	155	440	307	128	2319	2421	1,04
10	109	53	38	57	41	71	57	52	112	227	56	874	1280	1,47
11	223	484	396	207	215	219	255	436	204	248	712	3599	4665	1,30
$\sum_i T_{ij}$	3599	4062	4218	3768	3604	3425	3880	3862	3544	3324	4074			
A_j	3369	4314	5770	4002	1672	1669	8223	2293	2421	1280	4665			
F_j	0,94	1,06	1,37	1,06	0,46	0,49	2,12	0,59	0,68	0,39	1,15			

Itération I

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	$\sum_j T_{ij}$	E_i	F_i
1	728	310	184	415	175	167	182	167	321	492	228	3369	3369	**1,00**
2	403	812	514	396	259	197	242	280	258	311	642	4314	4314	**1,00**
3	326	700	1210	441	567	280	423	464	335	305	717	5770	5770	**1,00**
4	526	386	316	790	336	193	258	213	391	325	268	4002	4002	**1,00**
5	88	100	161	133	380	105	218	133	150	93	110	1672	1672	**1,00**
6	50	45	47	45	62	811	178	160	111	94	66	1669	1669	**1,00**
7	364	374	479	408	872	1205	1466	1185	837	511	522	8223	8223	**1,00**
8	84	108	131	84	132	269	296	723	127	116	223	2293	2293	**1,00**
9	205	127	121	197	191	238	267	162	459	321	133	2421	2421	**1,00**
10	160	78	56	84	60	104	83	76	164	332	83	1280	1280	**1,00**
11	289	627	513	268	278	284	330	566	265	321	922	4665	4665	**1,00**
$\sum_i T_{ij}$	3224	3668	3733	3260	3312	3854	3943	4129	3419	3223	3915			
A_j	3369	4314	5770	4002	1672	1669	8223	2293	2421	1280	4665			
F_j	1,05	1,18	1,55	1,23	0,50	0,43	2,09	0,56	0,71	0,40	1,19			

Itération II

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	$\sum_j T_{ij}$	E_i	F_i
1	761	365	285	509	88	73	379	93	227	195	272	3247	3369	1,04
2	422	955	794	486	131	85	505	155	183	124	766	4605	4314	0,94
3	341	824	1871	542	286	121	883	258	237	121	854	6339	5770	0,91
4	550	454	489	969	170	84	537	118	277	129	319	4096	4002	0,98
5	92	118	248	163	192	45	455	74	106	37	131	1663	1672	1,01
6	52	53	73	56	31	351	372	89	78	37	79	1271	1669	1,31
7	381	440	741	500	440	522	3058	658	593	203	622	8157	8223	1,01
8	87	127	203	103	67	117	616	401	90	46	266	2123	2293	1,08
9	214	149	187	242	96	103	556	90	325	127	159	2249	2421	1,08
10	168	92	87	103	31	45	173	42	116	132	98	1086	1280	1,18
11	302	738	794	329	140	123	689	314	188	128	1099	4844	4665	0,96
$\sum_i T_{ij}$	3369	4314	5770	4002	1672	1669	8223	2293	2421	1280	4665			
A_j	3369	4314	5770	4002	1672	1669	8223	2293	2421	1280	4665			
F_j	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**			

Matrice finale ***(après six itérations)***

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	$\sum_j T_{ij}$	E_i	F_i
1	785	389	306	533	92	70	385	95	231	198	288	3371	3369	**1,00**
2	389	911	763	455	122	73	460	142	166	112	725	4319	4314	**1,00**
3	306	763	1744	493	259	101	781	228	210	107	786	5777	5770	**1,00**
4	533	454	492	952	166	76	514	113	264	123	317	4004	4002	**1,00**
5	92	122	258	166	194	42	449	73	105	36	135	1671	1672	**1,00**
6	69	73	101	75	42	437	490	117	103	49	109	1665	1669	**1,00**
7	384	459	778	512	449	491	3047	657	590	201	645	8213	8223	**1,00**
8	94	141	228	113	73	117	657	428	96	49	294	2291	2293	**1,00**
9	231	166	209	264	105	104	591	96	345	135	176	2419	2421	**1,00**
10	197	112	106	123	36	49	201	49	135	152	119	1280	1280	**1,00**
11	288	725	785	317	135	109	647	295	176	119	1073	4669	4665	**1,00**
$\sum_i T_{ij}$	3369	4314	5770	4002	1672	1669	8223	2293	2421	1280	4665			
A_j	3369	4314	5770	4002	1672	1669	8223	2293	2421	1280	4665			
F_j	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**	**1,00**			

Les résultats présentés correspondent au meilleur calage effectué sur l'agglomération de Mulhouse, au moyen d'une fonction de résistance exponentielle-puissance. Les différents tons de couleurs permettent de représenter la part relative de chaque origine-destination.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1128	612	436	441	0	27	93	229	18	91	293
2	143	1592	639	305	0	63	828	274	81	0	389
3	346	1441	1634	534	88	23	458	518	275	51	403
4	603	883	221	804	151	72	577	370	75	63	182
5	33	226	113	308	253	18	214	368	89	0	50
6	85	142	154	61	19	501	381	256	11	0	59
7	543	1364	627	782	179	252	2784	1200	336	62	94
8	185	366	91	65	23	0	553	810	49	0	150
9	344	262	114	309	110	100	430	327	376	49	0
10	292	304	47	109	11	23	64	42	73	230	85
11	565	845	562	454	119	0	556	316	112	0	1135

Tableau 15 : Matrice OD constatée pour le motif domicile-travail polarisé. Source : EMD de Mulhouse.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	785	389	306	533	92	70	385	95	231	198	288
2	389	911	763	455	122	73	460	142	166	112	725
3	306	763	1744	493	259	101	781	228	210	107	786
4	533	454	492	952	166	76	514	113	264	123	317
5	92	122	258	166	194	42	449	73	105	36	135
6	69	73	101	75	42	437	490	117	103	49	109
7	384	459	778	512	449	491	3047	657	590	201	645
8	94	141	228	113	73	117	657	428	96	49	294
9	231	166	209	264	105	104	591	96	345	135	176
10	197	112	106	123	36	49	201	49	135	152	119
11	288	725	785	317	135	109	647	295	176	119	1073

Tableau 16 : Matrice OD calculée pour le motif domicile-travail polarisé. Source : EMD de Mulhouse.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-30%	-36%	-30%	21%	-	156%	313%	-59%	1156%	117%	-2%
2	173%	-43%	19%	49%	-	17%	-44%	-48%	107%	-	86%
3	-12%	-47%	7%	-8%	195%	335%	71%	-56%	-24%	109%	95%
4	-12%	-49%	122%	18%	9%	5%	-11%	-69%	253%	95%	74%
5	177%	-46%	129%	-46%	-24%	138%	110%	-80%	18%	-	167%
6	-19%	-49%	-35%	24%	127%	-13%	28%	-54%	825%	-	83%
7	-29%	-66%	24%	-34%	151%	95%	9%	-45%	75%	224%	586%
8	-49%	-61%	149%	75%	210%	-	19%	-47%	95%	-	96%
9	-33%	-37%	83%	-15%	-5%	4%	37%	-71%	-8%	174%	
10	-32%	-63%	128%	12%	241%	115%	214%	16%	85%	-34%	39%
11	-49%	-14%	40%	-30%	14%	-	16%	-6%	57%	-	-6%

Tableau 17: Écarts relatifs entre déplacements constatés et calculés pour le motif domicile-travail polarisé, les nuances de couleur représentant le volume de déplacements correspondant, sur la base des données de l'EMD.

Table des matières

Sommaire **6**

Introduction **7**

I. Contexte et enjeux **8**

I.1. Enjeux énergie-climat de la mobilité 8

I.2. Enjeux pour la modélisation 9

I.3. État des lieux de la mobilité locale 10

I.3.1. Utilisation de l'automobile 10

I.3.2. Transports collectifs 11

I.3.3. Modes actifs et espaces urbains 11

II. Problématique **12**

III. Modèle à quatre étapes **14**

III.1. Étapes du modèle 14

III.2. Modèle agrégé vs modèle désagrégé 15

IV. Développement du modèle **16**

IV.1. Spécifications 16

IV.2. Données disponibles 16

IV.2.1. Enquête ménages déplacements 17

IV.2.1.1. Présentation de l'enquête 17

IV.2.1.2. Composition des données EMD 18

IV.2.2. Autres données 18

IV.3. Méthodologie 19

IV.3.1. Dimension temporelle 19

IV.3.1.1. Horizon de prospective 19

IV.3.1.2. Périmètre temporel 20

IV.3.2. Dimension géographique 21

IV.3.2.1. Périmètre d'étude 21

IV.3.2.2. Zonage 22

IV.3.3. Choix des modes de transport 23
IV.3.3.1. Sélection des modes 23
IV.3.3.2. Définition de l'offre 25
IV.3.4. Choix des motifs 26
IV.3.4.1. Domicile-travail 27
IV.3.4.2. Autres motifs 28
IV.3.5. Calcul des distances 29
V. Étapes du modèle 32
V.1. Introduction 32
V.1.1. Choix modal 32
V.1.2. Génération 32
V.1.3. Distribution 32
V.2. Étape de génération 33
V.2.1. Déplacements domicile-travail 33
V.2.2. Évaluation des émissions-attractions 33
V.3. Étape de distribution 34
V.3.1. Modèle gravitaire 34
V.3.2. Méthode de Furness 35
V.4. Étape de choix modal 36
V.4.1. Coût généralisé 36
V.4.1.1. Définition 36
V.4.1.2. Composition 36
V.4.2. Justification des variables utilisées 38
V.4.2.1. Vitesse des modes 38
V.4.2.2. Difficulté de stationnement 40
V.4.2.3. Taux de motorisation 42
V.4.2.4. Coût monétaire du transport 42
V.4.3. Formulation 44
V.4.4. Résultats 44
V.4.4.1. Niveau agglomération 45
V.4.4.2. Niveau couronne 46

V.4.4.3. Origines-destinations 48
VI. Critiques et perspectives 50
VI.1. Résultats 50
VI.2. Acquisition et traitement des données 50
VI.3. Offre de transport 51
VI.4. Segmentation des motifs 52
Conclusion 53
Bibliographie 54
Annexes 56
Zonage 57
Génération 60
Choix modal 61
Vitesses par classes de distance 61
Parts modales 62
Distribution 63
Fonction de dissuasion 63
Méthode de Furness 63
Résultats 65
Liste des tableaux 70
Liste des figures 70
Liste des graphes 70
Table des abréviations 72

Liste des tableaux

Tableau 1 : Mobilités individuelles. 20
Tableau 2: Caractéristiques comparées des déplacements entre jours de semaine et week-end. 20
Tableau 3: Part des déplacements réalisés au sein du périmètre d'enquête..... 21
Tableau 4: Comparaison des parts modales dans les agglomérations étudiées. 23
Tableau 5: Comparaison des consommations énergétiques des modes de transport. 24
Tableau 6: Part des déplacements effectués en TCSP parmi l'ensemble des transports collectifs urbains..... 25
Tableau 7: Répartition des motifs de déplacement par agglomération..... 26
Tableau 8 : Durée quotidienne totale de déplacement par personne mobile 27
Tableau 9: Part des déplacements domicile-travail parmi ceux liés au travail principal..... 28
Tableau 10 : Part de la population universitaire par EPCI. 28
Tableau 11: Durée moyenne des déplacements intra-zones. 31
Tableau 12:Vitesses génériques moyennes par classe de distance et par mode. 40
Tableau 13: Somme des moindres carrés absolue et relative du meilleur calage obtenu. 44
Tableau 14 : Résultats de l'étape de génération. 60
Tableau 15 : Matrice OD constatée pour le motif domicile-travail polarisé. 65
Tableau 16 : Matrice OD calculée pour le motif domicile-travail polarisé. 65
Tableau 17: Écarts relatifs entre déplacements constatés et calculés pour le motif domicile-travail polarisé 66

Liste des figures

Figure 1: Positionnement du modèle selon les échelles et les objectifs. 8
Figure 2: Schématisation du modèle à quatre étapes..... 15
Figure 3: Schématisation des déplacements domicile-travail..... 27
Figure 4 : Découpage en zones agrégées utilisé dans le modèle pour l'agglomération de Strasbourg 57
Figure 5: Découpage D30 de l'EMD de Bordeaux, utilisé dans le modèle 58
Figure 6: Découpage D10 de l'EMD de Mulhouse, utilisé dans le modèle. 59

Liste des graphes

Graphe 1: Vitesse moyenne des déplacements en transports en commun par classes de distance. 39
Graphe 2: Régressions polynomiales au troisième ordre des vitesses moyennes observées par mode et par classe de distance. 39
Graphe 3: Corrélation entre difficulté de stationnement et part modale de la voiture particulière dans la zone d'arrivée. 41
Graphe 4 : Corrélation entre densité de zone et difficulté de stationnement. 41
Graphe 5: Corrélation entre taux de motorisation et part modale de la voiture particulière pour le motif domicile-travail.. 42

Graphe 6: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle pour l'ensemble de l'agglomération de Mulhouse, pour le motif domicile-travail polarisé. 45
Graphe 7: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle pour l'ensemble de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 45
Graphe 8: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle pour l'ensemble de l'agglomération de Bordeaux, pour le motif domicile-travail polarisé. 46
Graphe 9: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 1 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 46
Graphe 10:Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 4 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 47
Graphe 11: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 2 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 47
Graphe 12: Parts modales de l'EMD et calculées par le modèle, au départ de la couronne 3 de l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 47
Graphe 13 : Nombre de déplacements transports en commun mesurés et calculés par origine-destination pour l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 48
Graphe 14: Nombre de déplacements marche à pied mesurés et calculés par origine-destination pour l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 48
Graphe 15:Nombre de déplacements voiture mesurés et calculés par origine-destination 49
Graphe 16: Nombre de déplacements vélo mesurés et calculés par origine-destination pour l'agglomération de Strasbourg, pour le motif domicile-travail polarisé. 49
Graphe 17: Vitesse moyenne des déplacements en transports en commun par classes de distance. 61
Graphe 18:Vitesse moyenne des déplacements en voiture particulière par classes de distance. 61
Graphe 19:Vitesse moyenne des déplacements en vélo par classes de distance. 61
Graphe 20: Volumes de déplacements en voiture particulière, par origine-destination, sur la base de l'EMD de Strasbourg, mesurées et calculées. 62

Table des abréviations

CERTU	Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
DT	Domicile-travail
DTIR	Découpage du territoire en zones de tirage
EIFER	European Institute for Energy Research
EMD	Enquête ménage déplacements
ENTD	Enquête nationale transports déplacements
IAURIF	Institut d'aménagement et d'urbanisme de la Région Île-de-France
IGN	Institut géographique national
INSEE	Institut national de la statistique et des études économiques
IRIS	Îlots regroupés pour l'information statistique
MARS	Metropolitan Activity Relocation Simulator
Pax	Passager
PCET	Plan Climat Énergie Territorial
PDU	Plan de déplacements urbains
OPEM	Outil de Prospective Énergétique Multisectoriel
SIG	Système d'information géographique
TC	Transports en commun
TCSP	Transport en commun en site propre
VLS	Vélo en libre-service
VP	Voiture particulière