



**HAL**  
open science

# Modélisation du trafic routier et calcul des temps de parcours sur un réseau de transports collectifs urbains

Charles Raux, Anahid Nabavi, Lény Grassot, Mirkan Geyik

► **To cite this version:**

Charles Raux, Anahid Nabavi, Lény Grassot, Mirkan Geyik. Modélisation du trafic routier et calcul des temps de parcours sur un réseau de transports collectifs urbains. [Rapport de recherche] FUI AAP 17, Contrat d'aide n° F1407056 Q, LAET (Lyon, France). 2018, pp.68. halshs-03109350

**HAL Id: halshs-03109350**

**<https://shs.hal.science/halshs-03109350v1>**

Submitted on 13 Jan 2021

**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.

## **SimDD**

### Simulation du Développement Durable

**Modélisation du trafic routier et calcul des temps de parcours sur un réseau de transports collectifs urbains**

FUI AAP 17, Contrat d'aide n° F1407056 Q

Juin 2018



LABORATOIRE  
AMÉNAGEMENT  
ÉCONOMIE  
TRANSPORTS

TRANSPORT  
URBAN PLANNING  
ECONOMICS  
LABORATORY

Auteur(s) :

Anahid NABAVI

Lény GRASSOT

Mirkan GEYIK

sous la direction de Charles RAUX

## SOMMAIRE

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>1 LA MODELISATION DES CONDITIONS DE TRAFIC ROUTIER.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Méthode.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2 Données.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3 Résultats .....</b>	<b>30</b>
<b>1.4 Validation.....</b>	<b>41</b>
<b>1.5 Conclusion.....</b>	<b>43</b>
<b>2 L’OFFRE DU RESEAU DE TRANSPORT EN COMMUN.....</b>	<b>44</b>
<b>2.1 Données.....</b>	<b>44</b>
<b>2.2 Hypothèses et méthode de calcul.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3 Résultats .....</b>	<b>46</b>
<b>2.4 Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>49</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>50</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>58</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>60</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>61</b>



## SYNTHESE

Le projet SimDD est un projet collaboratif dont le coordinateur est Energies-Demain. Dans le cadre de ce projet la contribution du LAET vise à développer un modèle de prévision des mobilités « du quotidien » (définies par leur ancrage sur le domicile) permettant des projections de long terme, sur différents territoires. Les différents modules de ce modèle doivent donc être robustes et transférables :

- robustes par rapport aux données disponibles, aux limites de celles-ci (et des enquêtes réalisées localement), et aux erreurs de mesure ;
- robustes dans le temps (passé, avenir) quant aux comportements observés (caractère stochastique des comportements d'une part, influences des évolutions socio-démographiques d'autre part) ;
- robustes par rapport à la variété des territoires d'application.

Le présent rapport propose une modélisation des conditions de trafic routier et une méthode de calcul des temps de parcours sur un réseau de transports collectifs.

Concernant la modélisation des conditions de trafic routier, nous proposons un modèle macroscopique de trafic routier, adapté aux objectifs fixés, sur la base de simplifications admissibles. A partir d'une série d'estimations sur la base de spécifications variées sur le cas de l'agglomération lyonnaise, nous avons sélectionné un modèle qui se révèle être robuste par rapport à la représentation du réseau routier et robuste par rapport au découpage spatial.

La méthode est aisément reproductible, notamment pour la validation du modèle sur d'autres territoires, moyennant trois types de données :

- les données du réseau de transport routier, issues de BDTOPO disponible sur tout le territoire français ;
- la charge du réseau (en équivalent uvp), à partir d'une enquête ménages déplacements locale, d'une enquête cordon et d'une simulation du transport de marchandises en ville (de type FRETURB)
- les temps de parcours à vide et en heure de pointe sur le réseau routier.

Concernant la représentation de l'offre en transports collectifs nous proposons une méthode également reproductible, sous condition de la disponibilité de données du réseau TC au format GTFS, standard qui tend à se généraliser. Le résultat de cette étape de calcul des temps de parcours TC est nécessaire pour nourrir l'étape de choix modal.



## INTRODUCTION

Le projet SimDD est un projet collaboratif dont le coordinateur est Energies-Demain. Dans le cadre de ce projet la contribution du LAET vise à développer un modèle de prévision des mobilités « du quotidien » (définies par leur ancrage sur le domicile) permettant des projections de long terme, sur différents territoires. Les différents modules de ce modèle doivent donc être robustes et transférables :

- robustes par rapport aux données disponibles, aux limites de celles-ci (et des enquêtes réalisées localement), et aux erreurs de mesure ;
- robustes dans le temps (passé, avenir) quant aux comportements observés (caractère stochastique des comportements d'une part, influences des évolutions socio-démographiques d'autre part) ;
- robustes par rapport à la variété des territoires d'application.

Le présent rapport propose une modélisation des conditions de trafic routier (section 1) et une méthode de calcul des temps de parcours sur un réseau de transports collectifs (section 2).

# 1 LA MODELISATION DES CONDITIONS DE TRAFIC ROUTIER

## 1.1 Méthode

### 1.1.1 Simulation et modèle d'affectation

Les modèles d'affectation permettent de reproduire la répartition d'une demande entre une origine et une destination sur les différents itinéraires possibles.

En situation statique sans variation de la demande, ni de l'offre, il y a des modèles disponibles comme DAVIS et EMM2. Lorsque la demande (ou l'offre) varie la situation devient dynamique et en conséquence il est nécessaire de calculer plusieurs optimums successifs.

En principe, il y a plusieurs types de données de trafic qui pourrait servir dans le modèle d'affectation :

- les données réelles (boucles, caméras, etc.) qui permettent d'identifier une situation réelle de fonctionnement du réseau
- les données imaginées pour construire la situation projetée
- les matrices origine-destination (dynamique ou statique)
- les données du réseau à vide et saturé

Il est toujours très difficile de se procurer des données de bonne qualité, en particulier pour la matrice OD dynamique.

Néanmoins la simulation est consommatrice de temps et d'argent. Il est donc toujours intéressant de trouver d'autres solutions qui existent, notamment les débits cumulés [2]. En outre, les modèles de simulation font des hypothèses simplificatrices sur la réalité au risque de les appauvrir

L'espace urbain présente plusieurs spécificités ainsi que des contraintes qui rendent à la fois nécessaire et possible l'utilisation de méthodes particulières d'estimation des temps de parcours. Nous nous sommes intéressés à développer un modèle qui appartient à la famille des modèles macroscopiques. Ils permettent une représentation agrégée des flux de déplacements, sur la base de variables spatiales et temporelles.

### 1.1.2 Courbes débit-vitesse

Les courbes débit-vitesse déterminent la manière dont un arc du réseau réagit en termes de conditions de circulation à la charge de trafic qu'il doit supporter. Cette étape est essentielle pour ensuite comprendre comment la congestion doit être modélisée.

En pratique, diverses méthodes permettent d'estimer la capacité d'une route. L'une d'entre elles consiste à déterminer le diagramme fondamental, représentation de la relation liant le débit à la concentration. La courbe est ainsi ajustée à partir de données expérimentales. La capacité de la route s'en déduit comme le maximum de cette courbe.

La congestion est l'ensemble de la gêne provoquée par une accumulation des véhicules en circulation sur une route. La congestion couvre des situations de gêne relativement légères jusqu'aux situations les plus dures, on distingue :

- La situation de **gêne ponctuelle** entre les véhicules apparaît quand les débits horaires dépassent 60 % de la capacité d'écoulement de la route, et devient forte quand les

débits dépassent 90 % de la capacité, la vitesse moyenne du flot restant toutefois supérieure à la vitesse à vide ;

- La situation de **saturation**, lorsque la demande instantanée dépasse la capacité, est la forme la plus dure de la congestion. Elle est caractérisée par la formation de file d'attente permanente sur une certaine durée et une forte baisse des vitesses moyennes qui deviennent alors inférieures à la vitesse à capacité.

Une évaluation analytique a été proposée dans le cadre de l'évaluation a priori de la mise en place de la gestion dynamique des voies. Cette évaluation analytique repose sur l'hypothèse d'une relation entre temps de parcours, le temps de parcours à vide et le degré de saturation des voies. Pour estimer cette relation, la méthode repose sur des formules BPR reliant le temps de parcours au débit et proposée par le Bureau of Public Roads en 1964 (Etats-Unis) [1] :

$$t_i = t_0 \left[ 1 + \alpha * \left( \frac{F_i}{C_i} \right)^\beta \right] \quad (1)$$

Où  $t_i$  est le temps de parcours moyen observé de l'arc  $i$ ,  $t_0$  est le temps de parcours à vide sur le même arc. La capacité de l'arc est représentée par  $C_i$  ;  $F_i$  est le flux concerné. Dans ce rapport le ratio de flux/capacité sera nommé FCR.

En France, les recherches sur ce thème ont été essentiellement entreprises à l'INRETS. Le SETRA a calé une courbe débit-vitesse sur les autoroutes interurbaines (2001) et a déterminé la capacité des autoroutes par la méthode des débits moyens par classes de vitesse après exclusion des périodes instables [12].

La forme de la courbe débit-vitesse classique de BPR a été retenue avec les valeurs de départ de paramètres ( $\alpha = 0.15$  et  $\beta = 4$ ) [5]. Pour des trafics faibles, aucun effet du trafic sur les temps de parcours n'entre en compte, tandis que l'effet devient exponentiel au-dessus du seuil de capacité.

La formule (1) affiche des limites conceptuelles. Dans un premier temps elle n'est pas fiable en cas de FCR proche de 1, ce qui signifie qu'il y a un haut niveau de congestion [5]. Au moment de la saturation du réseau jusqu'à sa capacité, le temps de parcours et le flux diminuent en même temps à cause de la formation du goulot d'étranglement à l'entrée de la route. Mis différemment, le BPR classique est non monotone lorsque la demande est élevée. C'est pour cela que les chercheurs ont proposé des alternatives à cette formule notamment dans les études de trafic urbain [6, 7].

En outre, l'application de ces formules reste limitée dans la mesure où elles exigent un niveau de détail trop important (longueur des axes, position des carrefours, nombre de voies, réglage des feux...). Ces données ne sont pas reproductibles à grande échelle. De plus, la relation fondamentale (BPR classique) entre la vitesse, la capacité et le flux est une équation simplifiée basée sur des observations expérimentales. La disponibilité de ces données reste limitée. On constate que la courbe classique débit-vitesse, avec notre objectif de construire un modèle générique et reproductible, ne nous apporte pas de valeurs satisfaisantes. Sachant qu'au niveau agrégé on cherche à introduire une méthode plutôt macroscopique pour le rendre applicable sur plusieurs territoires sans imposer la difficulté de reconstruire du réseau sur les périmètres très vastes comme les périmètres d'enquête ménage dans les aires urbaines françaises.

Dans ce contexte, nous nous sommes inspirés d'une méthode proposée dans l'article de Beziat et al. 2017 [16], évoquant le coût marginal de la congestion dans la région parisienne,

notamment sur la méthode empirique appliquée pour l'estimation des temps de parcours avec prise en compte de l'effet des flux et de la capacité du réseau routier. Il propose d'estimer le temps parcours avec une spécification log-log qui tient compte du temps à vide ainsi que de la charge et des caractéristiques de réseau sous forme de capacité. La formule suivante reprenant cette spécification, modélise le temps de parcours en véhicule particulier :

$$t_1 = At_0^{\mu_1} \left(\frac{F}{C}\right)^{\mu_2} \quad (2)$$

Le  $t_1$  représente le temps de parcours estimé d'une origine-destination. Le rapport  $F/C$  est le rapport du flux de véhicule par heure sur la capacité en veh/h (FCR) ;  $t_0$  est le temps de parcours minimum de la même origine-destination (temps à vide) où le trafic n'a pas d'influence sur le temps. Un temps de parcours à vide est calculé en fonction d'une vitesse à vide, de la distance parcourue et est indépendant de l'heure de la journée. Le flux varie selon l'attractivité des OD et selon la tranche horaire de la journée. La capacité évolue uniquement en fonction des caractéristiques du réseau.

Notre analyse empirique se concentre sur les déplacements effectués sur certaines grandes zones géographiques plutôt que sur les vitesses de circulation enregistrées sur des segments de route spécifiques. L'investigation des fonctions de congestion d'un point de vue macro est la norme pour les voyages de passagers [4].

Après transformation du format en log-log qui s'est présenté par la suite, la formule simplifiée sera la base de l'estimation des coefficients grâce à la régression linéaire.

$$\log(t_1) = \mu_0 + \mu_1 \log(t_0) + \mu_2 \log\left(\frac{F}{C}\right) + \varepsilon \quad (3)$$

Selon cette forme réduite, les paramètres d'entrées sont  $\mu_0$ ,  $\mu_1$  et  $\mu_2$  ; coefficients à estimer. Ils représentent le pourcentage par lequel sera modifié le temps de parcours de l'individu  $i$  si le temps de trajet minimal et le FCR des véhicules particuliers (où équivalent VP /PL) dans le trafic total augmentent respectivement de 1%. Plus il y a du flux sur le réseau plus le temps de parcours va augmenter. Par conséquent ces élasticités sont toutes suspectées d'être positives.

Finalement le  $\varepsilon$  correspond à l'erreur de spécification du modèle qui suit la loi normale avec comme paramètre une moyenne de zéro et une variance qui est constante. Ce bruit statistique est requis pour les estimations empiriques de l'équation (3) par des techniques économétriques standard, telles que les "moindres des carrés ordinaires" (MCO).

## 1.2 Données

Il va falloir deux catégories de données différentes pour arriver à nos objectifs. Dans un premier temps on va construire l'offre de capacité routière. Pour cela, on a besoin d'une base de données de réseau routier disponible sur tout le territoire français. Deuxièmement, il est nécessaire d'avoir la demande de transport en véhicule, ce qui va charger le réseau et nous servir notamment pour faire la simulation du temps de parcours en heure de pointe.

### 1.2.1 L'offre de capacité routière

#### 1.2.1.1 Réseau de transport routier

Le réseau routier devrait être construit pour nous permettre de calculer la capacité routière, la vitesse, le nombre de voies et de la longueur du tronçon. Dans ce but, la base de données de BD TOPO 2.1 de 2016 a été utilisée.

La BD TOPO comprend un ensemble de données de précision métrique avec la meilleure exhaustivité possible dans le cadre de la définition des objets. Avec les limites de communes, ces informations sont complétées par des données topographiques dont la précision géométrique peut être différente. Le réseau routier de la BD TOPO, comprend le réseau de voies de communication dans son intégralité pour la France entière.

a) Paramètre usuel pour chaque type de route

Dans un premier temps il fallait définir les attributs utilisés de la base de données BD TOPO. On a ciblé sur quatre attributs : la « NATURE », l'« IMPORTANCE », le nombre de voies et la longueur de route.

b) Nature

L'attribut NATURE permet de distinguer différentes natures de tronçon de route [12]. La variable comprend cinq modalités. Les données du territoire de l'EMD 2006 sont présentées dans le Tableau 1.

**Tableau 1 : Nombre de segment du réseau routier selon la Nature et l'Importance**

<b>NATURE</b>	<b>Importance de 1 à 2</b>	<b>Importance de 1 à 3</b>	<b>Importance de 1 à 4</b>	<b>Importance de 1 à 5</b>
<b>Autoroute</b>	1 469	1 472	1 472	1 472
<b>Bretelle</b>	1 249	2 632	2 944	3 704
<b>Quasi-autoroute</b>	358	358	358	358
<b>Route à 1 chaussée</b>	14 332	66 067	195 975	876 855
<b>Route à 2 chaussées</b>	3 794	8 603	10 827	11 477
<b>Total</b>	<b>21 202</b>	<b>79 132</b>	<b>211 576</b>	<b>893 866</b>

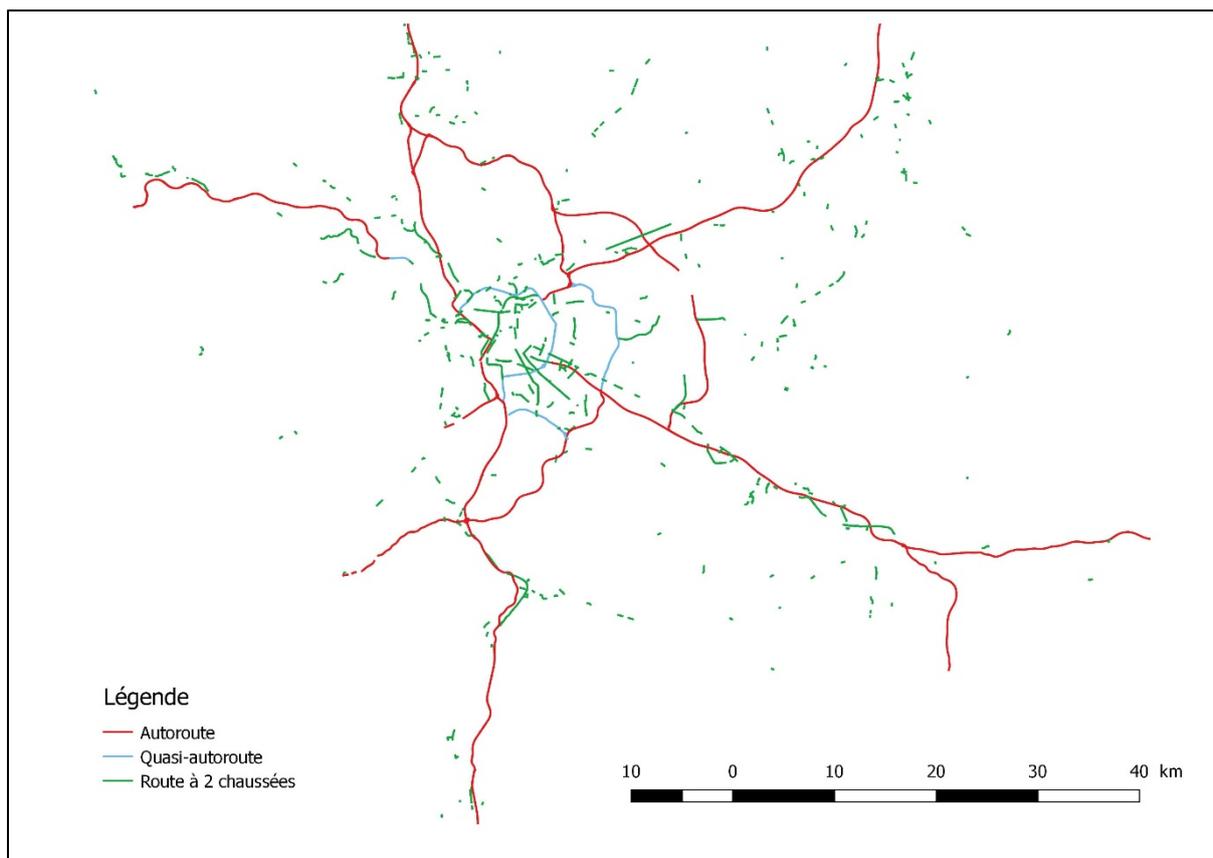
*Autoroute* : Routes sans croisement, accessibles seulement en des points aménagés à cet effet et réservées aux véhicules à propulsion mécanique. Le classement dans la catégorie des autoroutes est prononcé par décret du conseil d'état, pris après enquête publique.

*Quasi-autoroute* : Routes de même définition que l'autoroute mais non classées officiellement dans cette catégorie. Ce sont des routes à chaussées séparées par un terre-plein central, qui ne possèdent pas de croisement à niveau avec le reste du réseau routier. Bretelle Bretelles de liaison (ou d'échangeur) ou voies d'accès à une Aire de Service ou de Repos.

*Route à 2 chaussées* : Routes comportant 2 chaussées séparées par un obstacle physique éventuellement ouvert aux carrefours. Elles possèdent donc des croisements à niveau, ce qui leur interdit d'être classées dans la catégorie Autoroute ou Quasi-autoroute.

*Route à 1 chaussée* : Se retrouvent dans cette classe toutes les routes goudronnées qui ne sont pas classées en : Autoroute, Quasi-autoroute ou Route à 2 chaussées.

La Figure 1 montre un exemple de réseau selon la « NATURE » définie par la BD TOPO. Le réseau complet comprend tous les attributs de la variable nature chargés, notamment les routes à 1 chaussée. Pour une question de visibilité, la figure 1 affiche uniquement les autoroutes, quasi-autoroutes et routes à 2 chaussées.



**Figure 1 : Réseau routier-distinction par la Nature ; territoire EMD Lyon 2006 - Source BD TOPO**

### c) Importance

L'IMPORTANCE est un attribut qui matérialise une hiérarchisation du réseau routier fondée, non pas sur un critère administratif, mais sur l'importance des tronçons de route pour le trafic routier. Ainsi, les valeurs "1", "2", "3", "4", "5" permettent un maillage de plus en plus dense du territoire. Le graphe des éléments appartient à un degré (autre que le plus bas) et aux niveaux supérieurs qui sont connexes [12].

Le réseau 1 assure les liaisons entre métropoles et compose l'essentiel du réseau européen. Il est composé en général d'autoroutes et quasi-autoroutes, parfois nationales.

Les liaisons entre départements sont définies par l'importance 2. Cette valeur représente une densification du maillage routier défini par les tronçons d'importance 1. Les liaisons d'importance 2 ont fonction :

- d'assurer les liaisons à fort trafic à caractère prioritaire entre agglomérations importantes,
- d'assurer les liaisons des agglomérations importantes au réseau d'importance 1,
- d'offrir une alternative à une autoroute si celle-ci est payante,
- de proposer des itinéraires de contournement des agglomérations,
- d'assurer la continuité, en agglomération, des liaisons interurbaines à fort trafic quand il n'y a pas de contournement possible.

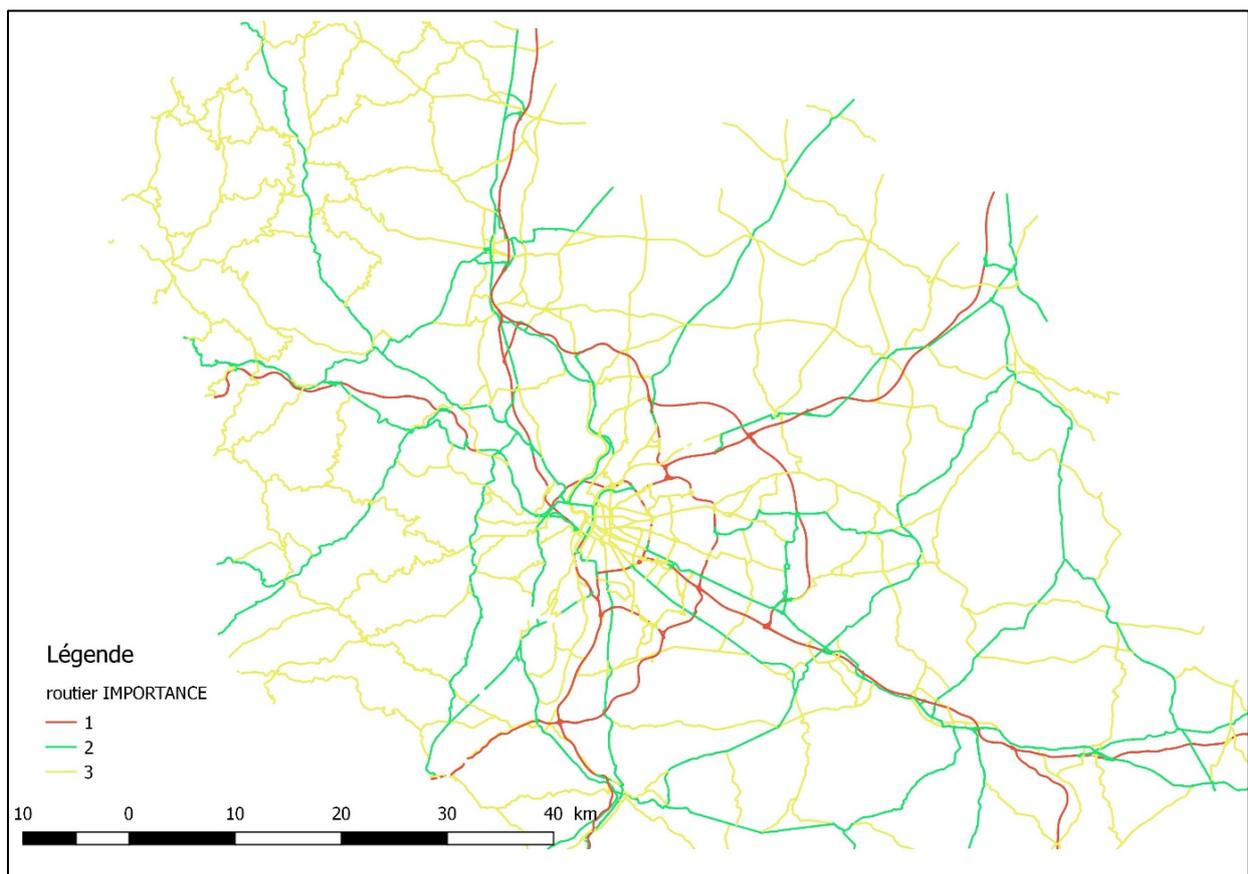
La liaison ville-ville à l'intérieur d'un département est représentée par l'importance 3. Ce niveau est majoritairement représenté par des routes départementales mais certaines

départementales peuvent avoir une importance 4 ou 5. Cette valeur représente une densification du maillage routier défini par les tronçons d'importance 2. Les liaisons d'importance 3 ont fonction :

- de relier les communes de moindre importance entre elles (les chefs-lieux de canton en particulier),
- de desservir les localités et sites touristiques importants, de desservir les points de passage des obstacles naturels quand ils sont peu nombreux (cols routiers, ponts),
- de desservir les agglomérations d'où partent des liaisons maritimes
- de structurer la circulation en agglomération.

Toutes les voies permettant de se déplacer rapidement à l'intérieur d'une commune et, dans les zones rurales, de relier le bourg aux hameaux proches ont importance 4. Cette valeur représente une densification du maillage routier défini par les tronçons d'importance 3. Les liaisons d'importance 4 ont fonction de structurer la circulation en agglomération.

La Figure 2 présente le réseau routier en distinguant l'importance 1, 2 et 3. Néanmoins les importances 4 et 5 sont prises en compte dans les calculs de l'offre routière afin d'avoir une meilleure représentation du réseau.



**Figure 2 : Réseau routier, distinction par l'importance ; territoire EMD Lyon 2006 - Source BD TOPO**

#### d) Nombre de voies

Le nombre de voies est un indicateur qui joue un rôle important dans le calcul de la capacité routière. Le nombre de voies d'une route, d'une rue ou d'une chaussée de route à chaussées séparées est défini dans la base de données. Lorsque les voies ne sont pas matérialisées, l'attribut indique le nombre maximum de voies de circulation effectivement utilisées dans des conditions normales de circulation [12].

#### e) Longueur de route

Finalement la longueur de route est bien calculée pour tous les tronçons du réseau routier grâce à méthode GIS et à R. Cet attribut est nécessaire pour tous les calculs de l'offre de transport routier. Les résultats finaux sont présentés dans la section de *Macro Zonage*.

### 1.2.1.2 Caractéristiques de l'offre de transport routier

#### a) Vitesse à vide par type de route

La vitesse à vide n'est pas disponible à l'échelle du réseau routier en France. C'est un paramètre indispensable qui permet de calculer le temps parcours à vide.

Selon le rapport de l'enquête cordon de l'agglomération de Lyon 2005 [12], des routes ont des caractéristiques géométriques (profil en travers, carrefours) variables :

- Les autoroutes : 2x2 voies, 2x3 voies ou 2x4 voies, limitation à 130 km/h (VL) ;
- Les 2x2 voies interurbaines : sous cette appellation se distinguent 2 types définis par le catalogue des types de routes en milieu interurbain (circulaire du 9/12/91) :

- Le type 1 "autoroute" mais à statut "route express" : elles ne sont pas plus étroites que les autoroutes mais leur vitesse est limitée à 110 km/h (code de la route) ;

- Le type 3 "artères interurbaines", à chaussées séparées mais non dénivelées (carrefour giratoires ou à feu); la vitesse est limitée en fonction du domaine d'emploi, la plupart du temps 90 km/h, exceptionnellement 110 km/h ;

- Les 2x2 en zone urbaine et périurbaine : caractéristiques très hétérogènes, limitations à 110, 90, 80, 70 km/h ;
- Les routes à grande circulation : 3 voies ou alternance 2 / 3voies, limitées à 90 km/h ;
- Les autres routes, limitées à 90 km/h, et à 50 km/h en agglomération.

Nous proposons une solution plutôt pratique pour avoir la vitesse à vide du réseau. Le Tableau 2 indique la vitesse à vide par la nature de route et l'importance (voir la définition de la BD TOPO). Cette estimation est inspirée du rapport technique du Sétra sur l'estimation des capacités et vitesses à vide des voies aux intersections [5], [12]. L'avantage de cette méthode est surtout sa simplicité pour sa mise en œuvre mais aussi pour la disponibilité des données sur toute la France grâce à la BD TOPO.

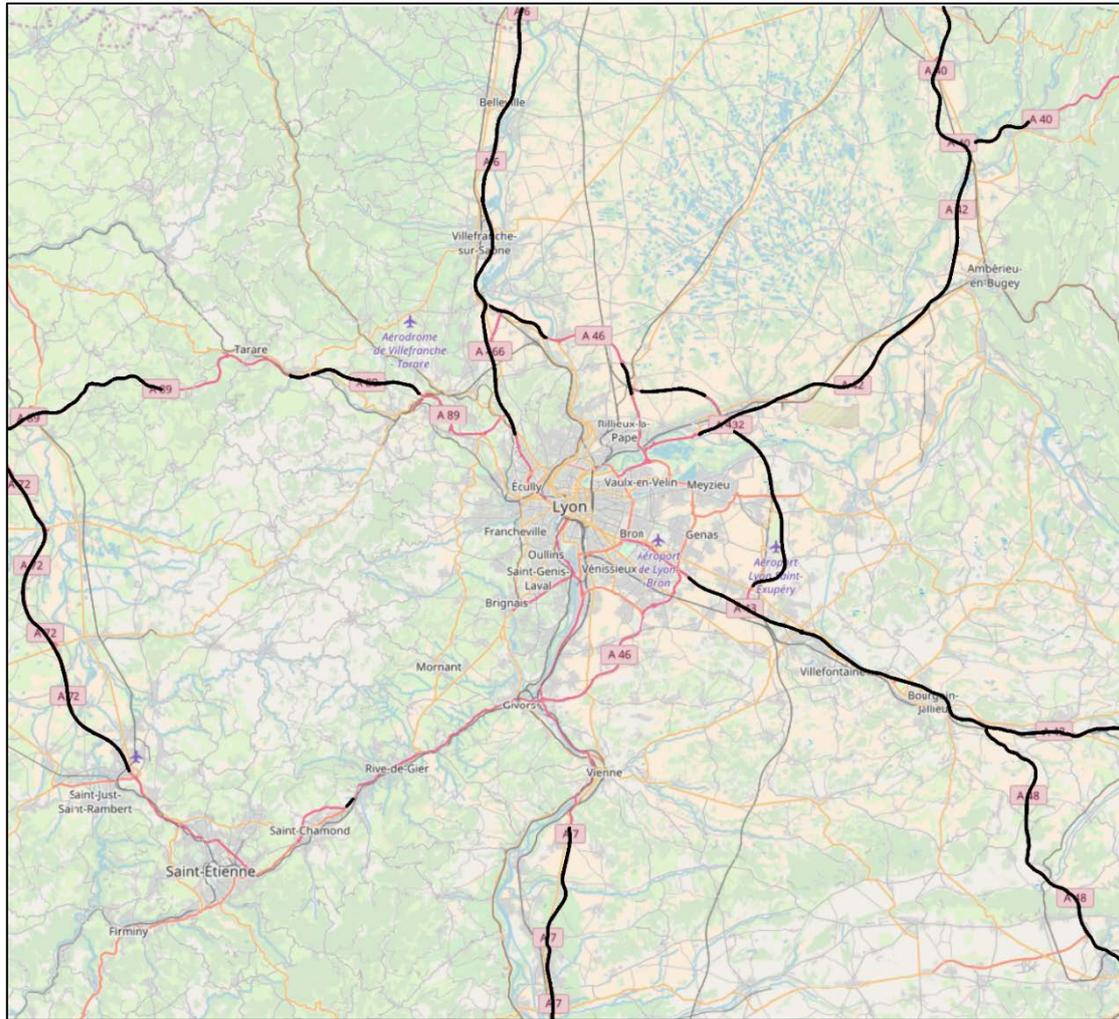
**Tableau 2 : Vitesse à vide selon la nature et l'importance de route**

		<b>IMP 1</b>	<b>IMP 2</b>	<b>IMP 3</b>	<b>IMP 4</b>	<b>IMP 5</b>
<b>NATURE</b>	Autoroute	130	130	110	110	90
	Quasi-autoroute	90	90	90	90	90
	Bretelle	30	30	50	50	50
	Route à 2 chaussées	70	50	50	50	50
	Route à 1 chaussée	70	50	50	60	60

Au sujet de l'amélioration de notre estimation de la vitesse à vide, ces valeurs sont modifiées notamment sur les grands axes et des voies rapides, là où les calculs pourraient être plus sensibles.

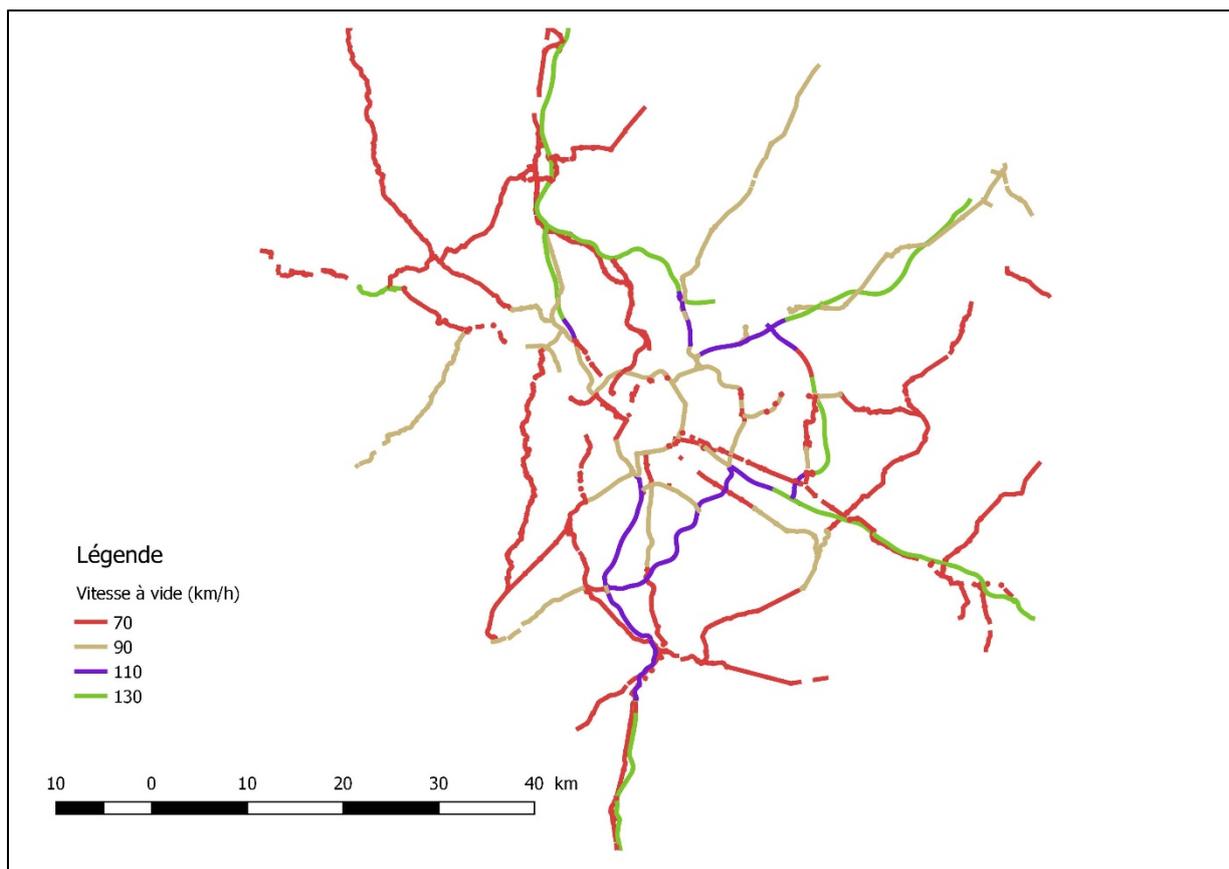
Les données utilisées pour ces modifications sont issues d'OpenStreetMap : les données ouvertes d'OSM pouvant être téléchargées puis traitées automatiquement. Les présents besoins s'appuient sur les variables de la partie réseau des objets linéaires. Ces dernières contiennent un champ optionnel qui indique la vitesse maximale autorisée des différents tronçons autoroutiers. La génération de cette information rend cette source peu exploitable à grande échelle mais l'ensemble des axes majeurs, et donc possiblement sujet à correction, est parfaitement complété.

Un exemple d'une carte téléchargée de données ouvertes OSM est présenté par la Figure 3 qui affiche les tronçons d'autoroute avec une vitesse à vide de 130 km/h.



**Figure 3 : Tronçons autoroutiers avec une vitesse à vide de 130 km/h ; source données OSM**

Les vitesses sont corrigées quasi-manuellement avec ces infos d'OSM. La Figure 4 montre les tronçons avec 4 niveaux de vitesse à vide: 130 km/h, 110 km/h, 90 km/h et 70 km/h.



**Figure 4 : Carte de la vitesse à vide sur les grands axes (Autoroute et VRU)**

Les vitesses à vide sont calculées dans un premier temps, en perspective mesoscopique, avec les trois premières modalités d'importance, puis dans un second temps en incluant les données ayant les importances 4 et 5 pour avoir une meilleure estimation de la capacité et la vitesse sur la région Lyonnaise. Cela nous permet d'avoir la possibilité de comparer les résultats entre les différents niveaux d'importances avec un niveau de détails assez fin, ce qui pourrait améliorer la représentation de l'offre routière.

#### b) Capacité

On considère qu'une voie de 3,5 mètres a une capacité de 1800 veh/h/voie pour une voie de type autoroutier en France [10]. Le Tableau 3 montre l'estimation de la capacité de route par rapport au nombre de voie et selon type de route. On s'inspire de l'étude du Cerema [12] pour une estimation réaliste.

**Tableau 3 : Capacité routière selon le type de route et le nombre de voies - Source Cerema : guide du transport marchandises [12]**

Type	1 voie		3 voies		2*2 voies			2*3 voies
	6 m	7 m	9 m	10,5 m	Carrefour plan	Voie rapide urbaine	Autoroute	Autoroute
<b>Capacité (uvp/h/voie)</b>	1220	1350	1650	1830	3100	4000	3460	5200

A partir des valeurs de ce tableau, nous calculons une capacité par voie simplifiée en distinguant trois types de route ainsi que les bretelles qui existe dans la base BDTOPO en selon les modalités de la variable « Nature ».

**Tableau 4 : Capacité routière par voie selon l'attribut « Nature » (BDTOPO)**

NATURE BDTOPO	Bretelle	Route à 1 chaussée	Route à 2 chaussées	Quasi-autoroute	Autoroute
Capacité (uvp/h/voie)	750	1220	1550	1730	

### 1.2.1.3 Calculs de la capacité routière et de la vitesse à vide

La méthode de calcul des paramètres de réseau routier est appliquée principalement au niveau agrégé avec différents types de découpage.

Afin d'estimer la capacité totale au niveau de chaque macro zone, la formule suivante est appliquée en prenant en compte la longueur de tous les segments du réseau ainsi que le nombre de voie par les segments.

$$capacité\ total\ (u\vp.\ km/h) = \sum_i Capacit\acute{e}_i * Longueu\acute{r}_i * nb\ de\ voie_i \quad (4)$$

Où  $i$  représente un segment du réseau. La capacité totale est en unité de véhicule kilomètre par heure ce qui redresse la capacité au niveau des macros zones selon le découpage.

Les résultats de ce calcul se retrouvent dans la partie de découpage du territoire d'étude pour tous les découpages intégrés ainsi que tous les niveaux d'importances.

Dans le cas de restriction des données disponibles, afin de calculer la capacité totale des macros zones, il faut la capacité moyenne estimée au niveau des macros zones. Les tableaux présentés en annexe 0 contiennent les caractéristiques du réseau en détail notamment le nombre de voies en moyenne par zone, la longueur du réseau en kilomètre et la capacité routière en unité de véhicule particulier par heure par voie. Le produit des trois indicateurs donne finalement la capacité moyenne en véhicule kilomètre par heure. On suit la méthode issue de l'article de Beziat et al. (2017), qui confirme aussi la capacité totale calculée grâce à la formule (4).

En ce qui concerne la vitesse à vide au niveau des macros zones, on applique la même méthode pour redresser la vitesse simplement avec la longueur du segment. La formule suivante va pondérer les vitesses à vide de tous les segments du réseau à une vitesse moyenne en km/h :

$$vitesse\ \grave{a}\ vide\ moyenne\ (km/h) = \frac{\sum_i vitesse_i * Longueu\acute{r}_i}{\sum_i Longueu\acute{r}_i} \quad (5)$$

Où  $i$  représente le segment du réseau.

Cette démarche nous permet d'intégrer l'impact de longueur de segments sur la vitesse à vide ainsi que sur la capacité. Il donne une estimation plus fine en prenant en compte les caractéristiques de réseau dans les calculs afin de mieux représenter l'offre de réseau routier.

### 1.2.1.4 Temps de parcours observés en charge

La qualité et la quantité des données constituent très souvent la première difficulté qui se présente à celui qui veut analyser un réseau.

Malgré la multiplicité des sources, toutes ne sont pas pertinentes dans notre cas. Les capteurs autoroutiers par exemple sont le plus souvent insuffisants pour servir de base aux calculs de l'ensemble des temps de parcours sur un territoire : ils sont généralement placés sur des tronçons hors de tout carrefour, limitant l'équipement de l'ensemble des entrées et sorties – et donc des données de passage et de parcours. Une autre source, les données OpenStreetMap – via les outils OSRM –, rendent difficilement compte du trafic mais plus de l'infrastructure du réseau. Les temps de parcours proposés tendent alors à exprimer les temps à vide.

Pour pallier à cela, on s'appuie sur des résultats issus d'interrogation de différents outils en ligne de navigation GPS pour caractériser les conditions de trafic.

#### a) Sélection des OD

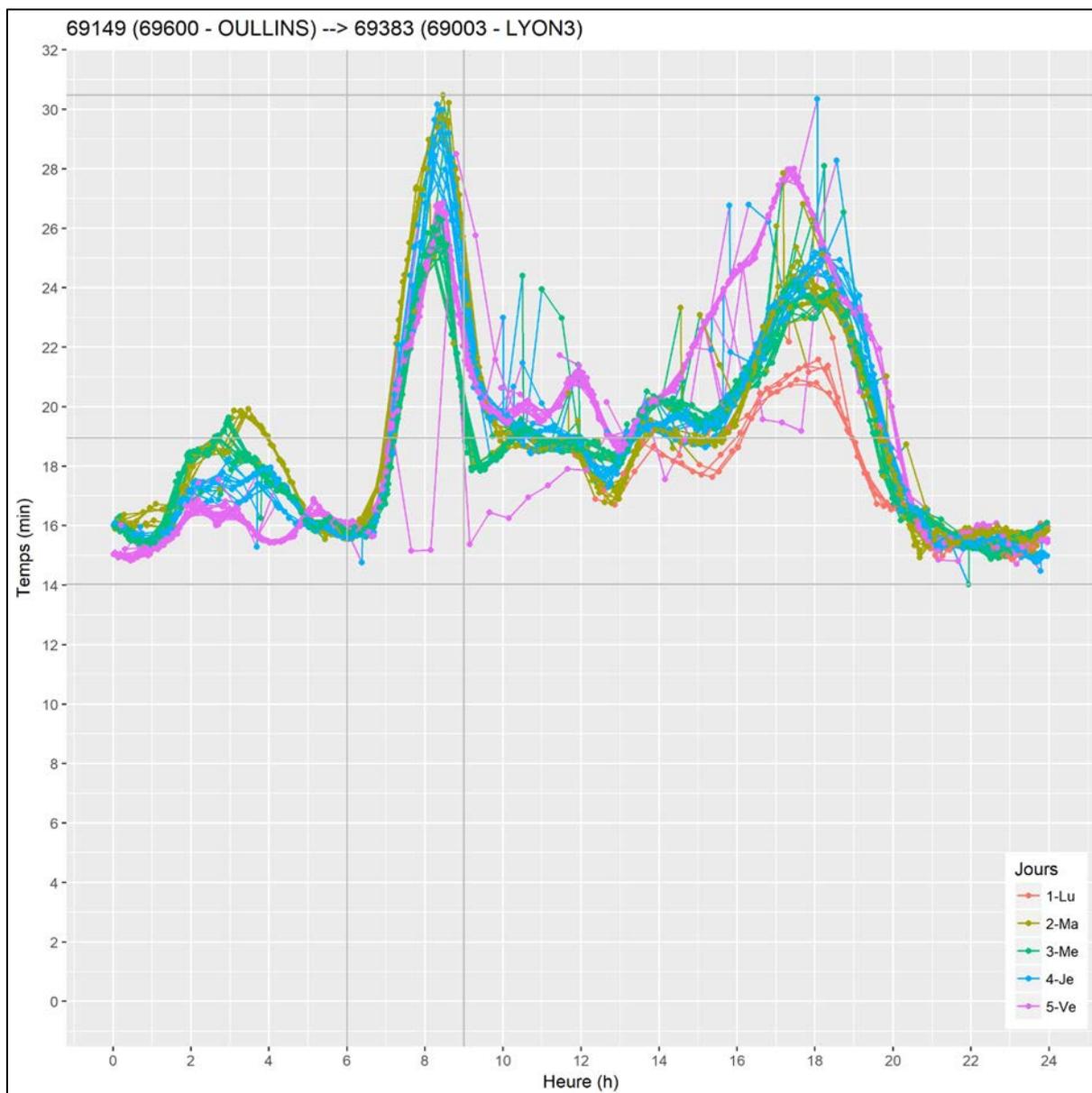
Pour limiter les interactions avec ces outils, une sélection de trajets a été définie à partir des Origine-Destination les plus fréquentes dans les EMD 2006 et 2015 de Lyon ainsi que le fichier des mobilités professionnelles 2013 de l'INSEE (MobPro). Chaque trajet relie deux communes distinctes ; et ces dernières sont ponctuellement localisées suivant le centroïde communal fournit par le fond de carte IGN GéoFla.

#### b) Temps de parcours Waze

Le premier outil utilisé est l'application mobile collaborative Waze (Waze Ltd. / Google Inc.). Son interface en ligne ([www.waze.com](http://www.waze.com)) permet de tester un trajet entre deux points et rend compte d'un temps de parcours ainsi qu'une distance.

Interrogée à plusieurs reprises, il a permis pour chaque OD, de proposer une série de variations journalières et infra-journalières du temps de parcours. Pour synthétiser ces multiples temps et proposer une unique durée empirique exploitable par trajet, a été retenue la moyenne des maximums en heure de pointe du matin de chaque série d'interrogation. On obtient ainsi pour chaque OD, une valeur indépendante des altérations journalières du trafic ou de l'outil d'interrogation.

Par la suite, la Figure 5 représente un exemple de la synthèse d'une série d'interrogation de lundi à vendredi entre Oullins et le 3eme arrondissement de Lyon sur 24h. L'axe  $x$  montre l'heure et l'axe  $y$  indique le temps de parcours en minutes. Le graphique nous montre bien la variation du temps de parcours de ce trajet à travers des jours et des heures ainsi que les pics à l'heure de pointe du matin et du soir. Finalement, le temps de parcours estimé à l'heure de pointe du matin est de 27 minutes, alors qu'en heure creuse il est de 15 minutes.



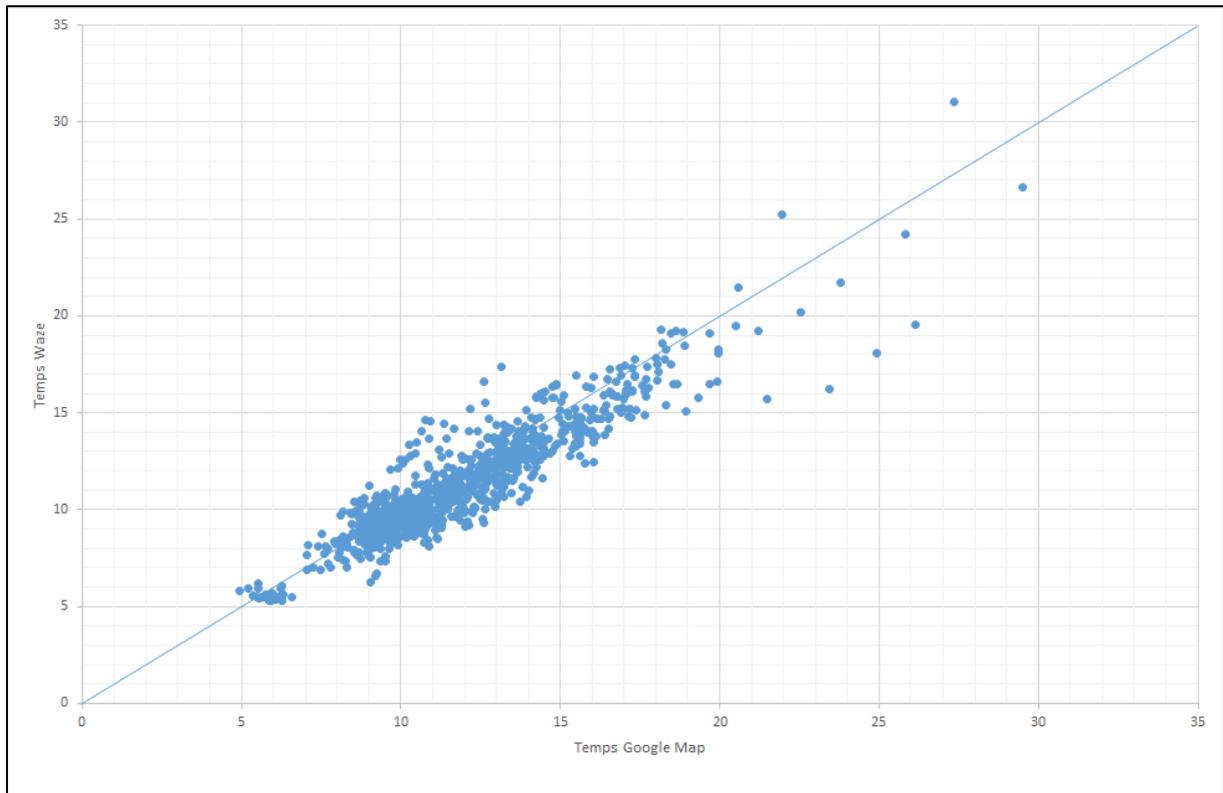
**Figure 5 : Synthèse des temps Waze sur 24h pour un OD**

### c) Comparaison avec les données de Google Maps

Pour valider ces temps de trajets, un second outil a été exploité : Google Maps (Google Inc.). A noter que malgré quelques essais, aucune autre source de données (e.g. Mappy, ViaMichelin, Baidu Maps, Bing Maps) n'a pu être interrogée de manière fiable tout en donnant suffisamment de résultats comparables dans l'optique de multiplier les valeurs de référence.

Google Maps, malgré les fortes limites d'interrogation, a pu être mis en parallèle de Waze pour un certain nombre de trajets et permettre d'éprouver les données de la première source : à différents instants, chaque outil a été interrogé en parallèle sur une même OD, *i.e.* sur un même couple de coordonnées GPS – pour limiter l'aléa de positionnement au sein d'une commune du point de référence par les différents outils. Les données récoltées ont été les temps de parcours.

La Figure 6 compare des temps de parcours entre Waze et Google Maps. Il y a une tendance de convergence autour de la diagonale qui est plutôt rassurante.



**Figure 6 : Comparaison des temps (minute) entre Waze et Google Maps**

Les comparaisons sur le graphique démontrent bien une proximité des résultats. Il existe évidemment une variation manifeste – qu’il n’est pas possible d’expliquer en l’absence de possibilité d’en apprendre davantage sur les méthodes, les algorithmes et les données exploitées par les différents outils – mais tout de même peu significative, rendant compte d’une relative fiabilité des données Waze.

### 1.2.2 Demande de déplacements via le réseau routier

Il est nécessaire de constituer une matrice origine-destination selon une certaine condition temporelle et pour les segments de demande à affecter sur le réseau de transport routier. La matrice OD contient les flux du véhicule léger ou équivalent.

On note que la valeur du coefficient d'équivalence VL/PL, valeur par défaut dans la table de typologie est  $E = 2,5$  ou  $3$  selon le rapport de Sétra sur le calage et validation des modèles de trafic [9]. En général il peut varier selon les infrastructures où l'écart entre les vitesses VL et PL est important. D'un point vu macroscopique, on fait la référence à VISUM 12 (Bases Théoriques issues de PTV Vision), pour un équivalent conventionnel de la voiture particulière qui intègre un coefficient égal à  $2$  pour les poids lourds.

#### 1.2.2.1 Flux OD

Concernant des données de mobilités, trois sources de données encadrent ce projet :

- EMD 2015

- Enquête CORDON 2005
- Transports de Marchandises en ville

L'enquête ménages de déplacements (EMD) est la source de donnée de la mobilité quotidienne des individus. Cette enquête se déroule dans plusieurs villes et agglomération en France avec un gap de 10 ans environ. Le modèle est basé sur les données de Lyon pour pouvoir intégrer les données de transports marchandises et du CORDON.

Concernant les flux OD de la voiture particulière, l'EMD de Lyon 2015 a été retenue pour avoir une d'homogénéité temporelle par rapport à d'autres données d'offre routière disponible. Le flux de voitures particulières est estimé à partir du nombre de déplacements redressé en mode VP.

#### 1.2.2.2 Enquête cordon

L'enquête cordon de 2005 (EC 2005) s'est déroulée du 6 au 22 septembre 2005 sur l'aire urbaine de Lyon (Figure 7). Le cordon permet en effet de connaître les flux qui entrent ou sortent d'un périmètre, situé entre les limites du Grand Lyon et celles du Scot de l'agglomération lyonnaise. L'Etat, les collectivités territoriales et les Autorités Organisatrices des transports de l'aire métropolitaine lyonnaise ont manifesté leur souhait de mesurer les flux routiers de transit et d'échange de l'agglomération lyonnaise en appréhendant notamment les trafics périurbains. En septembre 2005, la DDE du Rhône a interrogé environ 87 000 conducteurs de voitures (VL) ou de poids lourds (PL) sur 36 postes d'enquête en sortie de l'agglomération lyonnaise. Ces postes délimitent un « cordon » virtuel qui ceinture l'agglomération [11].

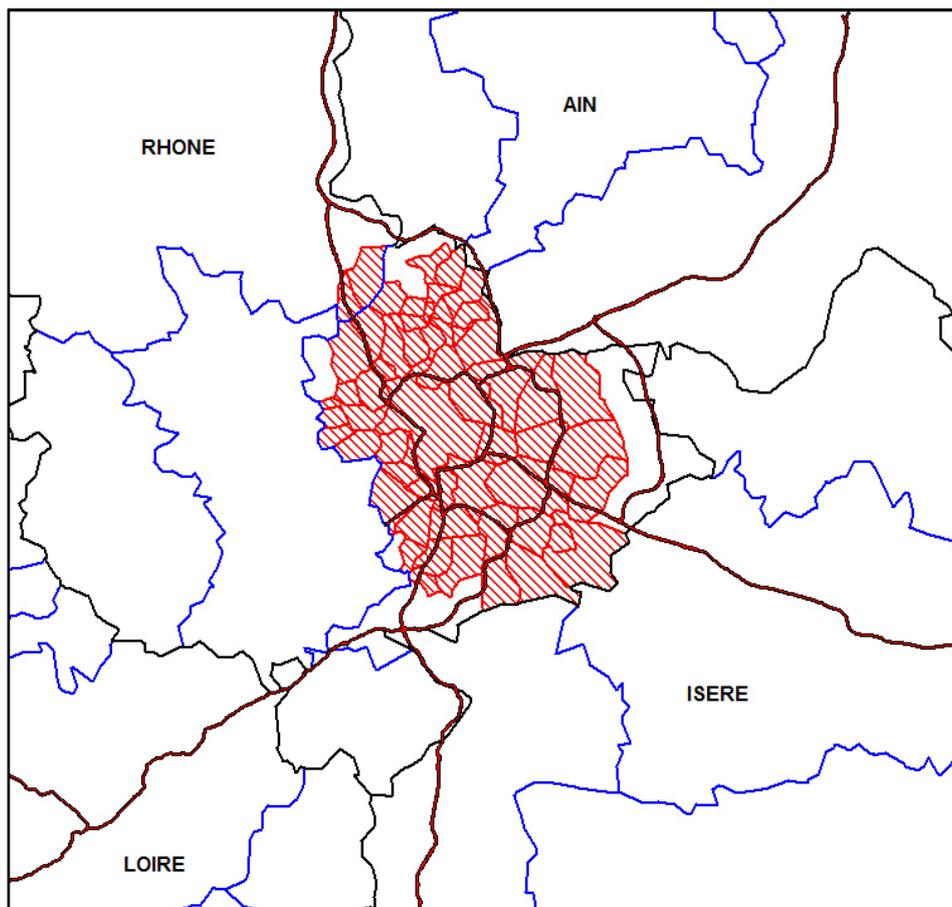
Deux types d'enquête ont été réalisés : une enquête par interviews après interception des véhicules, sur un réseau de 36 postes, afin de connaître précisément l'origine et la destination de ces véhicules ; un recensement des véhicules en deux catégories (VL et PL) par comptages manuels. Les interviews se sont déroulées les mardis ou les jeudis de 6h00 à 20h00 dans le sens sortant du cordon. Cette enquête a été complétée par 28 postes de comptages automatiques horaires pour tous les véhicules, avec une distinction pour les poids lourds, sur quinze jours consécutifs, sur tous les postes non situés sur un axe autoroutier (sur autoroutes, le flux peut être connu au niveau des barrières de péage). Ainsi 75 697 interviews ont été réalisées pour les VL et 11 522 interviews pour les poids lourds PL [14]. En 2005, un jour ouvrable moyen, 577.000 véhicules soit 511.000 VL et 66.000 PL entrent et sortent de l'agglomération parce qu'ils sont en relation avec l'agglomération (trafic d'échange : 89% des VL et 67% des PL) ou parce qu'ils la traversent (trafic de transit). En définitive, en dehors du trafic interne, 80.000 véhicules en transit et 497.100 en échange circulent dans l'agglomération.

Pour ne pas perdre le trafic de transit de l'enquête cordon qui s'effectue en dehors de notre périmètre d'étude, on s'est assigné un point d'entrée et un point de sortie comme référence dans le territoire de l'EMD 2006 selon leur origine et leur destination. Un indice d'équivalent de la voiture légère est appliqué sur les flux de poids lourds en considérant qu'un véhicule de poids lourds est égal à deux véhicules légers [21].

La dernière étape de la préparation de données CORDON est de le projeter à l'année de référence 2015. Pour cela, un taux d'augmentation annuel doit être estimé. On s'appuie sur le rapport du CETE de Lyon [15] qui étudie l'évolution du trafic et des conditions de circulation dans l'agglomération lyonnaise entre 2000 et 2010. Cinq zones d'études ont été retenues en fonction de leur emplacement géographique et des données disponibles. Leurs résultats indiquent que le trafic était en augmentation sur la plupart des axes entre 2000 et 2007, avec

une croissance annuelle moyenne autour de +1% par an. En 2008 et 2009, le trafic journalier moyen connaissait une baisse moyenne annuelle de l'ordre de -1,5%. Après deux années consécutives à la baisse, le trafic journalier moyen est orienté à la hausse avec une augmentation de +1,4% entre 2009 et 2010 sur les axes étudiés. Depuis 2000, le trafic est en augmentation moyenne annuelle de +0,7%.

On observe l'évolution des flux en VP entre l'année 2006 et 2015 à partir des enquêtes ménages-déplacements de Lyon. Cela nous donne un taux d'augmentation de 0.7% par an, ce qui est cohérent avec l'étude du CETE. Par conséquent, le taux annuel de 0.7% est appliqué en projection de flux de 2006 à 2015.



**Figure 7 : Aire délimitée par le cordon (lignes bleues = Limites des SCOT) – Source rapport de synthèse des résultats d'Enquête Cordon de l'agglomération lyonnaise [11]**

### 1.2.2.3 Transport de marchandises

Les trafics de marchandises sont estimés par le modèle FRETURB développé au LAET (Routhier et al., 2001 ; Toilier et al., 2005). Ce modèle diffère des modèles traditionnels en « 4 étapes ». Premièrement, il génère des mouvements de marchandises, selon la taille et le type d'activité des établissements (les « coefficients de génération »). Il génère ensuite des fonctions de distance, en fonction des types d'établissements ou de véhicules, de la distance du centre-ville, de l'opérateur de transport. Les voyages sont distribués en utilisant un algorithme du plus court chemin. La sortie est une matrice OD pour plusieurs périodes de

temps, en distinguant les véhicules légers (<3,5T en France, par exemple les camionnettes) et les véhicules lourds (les camions).

L'estimation réalisée par FRETURB est fondée sur les données d'établissements SIRENE 2005. Il faut donc ajuster ces résultats pour les projeter en 2015. Selon l'étude sur le transport de marchandises de la région lyonnaise (rapport du CETE en 2011), il y a une tendance positive de l'accroissement du fret de 0.66% en moyenne entre 2000 et 2010 [15]. Cette tendance s'est retrouvée aussi dans les déplacements VP précédemment. Un taux d'augmentation annuel de 0.7% est fixé pour le flux de transports marchandises pour la projection en 2015.

### 1.2.3 *Le territoire d'étude et son découpage*

#### 1.2.3.1 Graphe de matrice OD

Le territoire d'étude contient 455 communes, de trois départements : Ain, Isère et Rhône. Dans un premier temps un graphe complet de 455\*455 origines-destinations (OD) est construit. La distance retenue entre les communes est la distance à vol d'oiseau de centroïde à centroïde.

Le flux OD total de commune à commune est estimé grâce aux trois sources de données précédemment mentionnées ; elles comprennent les flux de véhicules particuliers ainsi que les flux de transports marchandises.

Pour traiter au mieux l'effet de la congestion, la journée est divisée en deux tranches horaires : heure de pointe du matin (8h à 9h) et heure creuse (le temps de parcours minimum sur 24h).

Le graphe reconstitue depuis les centroïdes de chaque commune (fournis par le fond de carte national « Route 500 », version 2.1 en date du 6 juillet 2016 par l'IGN) les liens inter-communaux.

Un traitement particulier est effectué pour ajouter les arrondissements de Lyon et ôter la coordonnée unique de la ville de Lyon entière : le centroïde de Lyon est retiré, et les 9 centroïdes des arrondissements sont calculés depuis la couche des communes françaises (fond de carte national « GéoFla », version 2.2 en date du 28 juin 2016 par l'IGN).

Les liens deux à deux de l'ensemble des centroïdes sont segmentés en fonction du découpage choisi dans le but de retrouver la part de chaque lien appartenant à chaque macro-zone du territoire : à chaque macro-zone, n'est affectée, des liens, que les segments qu'elle recouvre ; chaque passage d'une zone à une autre par un lien le scinde à ce même endroit.

Le calcul de la distance et l'opération de segmentation des liens permet de disposer au final, pour chaque couple de communes, de sa distance à vol d'oiseau et de la répartition de cette dernière en fonction des macro-zones.

Les déplacements intra-communaux, qui ne sont pas sujets à une partition entre macro-zones, sont donc entièrement et automatiquement affectés à la zone d'appartenance de la commune et leur distance est relative à la surface de la commune extraite de la couche des communes susmentionnées (« GéoFla ») : la moitié de la racine de la surface.

L'ensemble des distances sont calculées depuis la projection Lambert 93, soit en unité de mesure, le mètre.

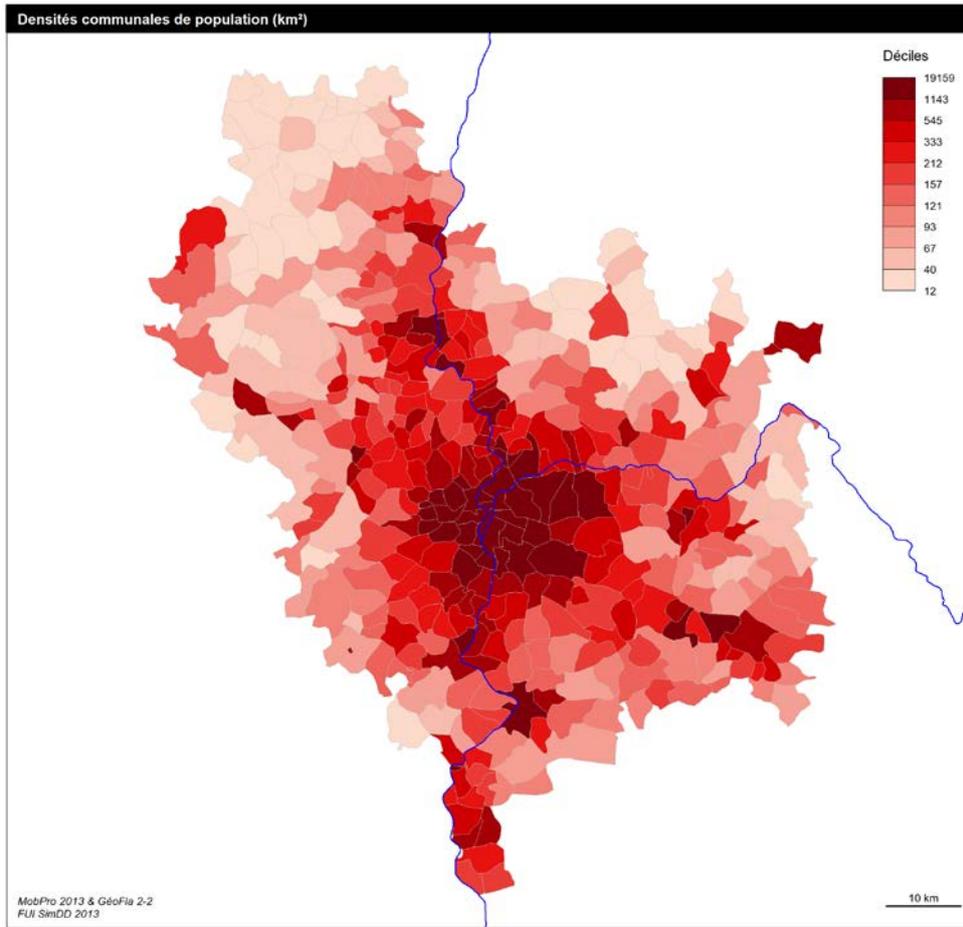
### 1.2.3.2 Découpage du territoire d'étude

La modélisation de la demande de déplacement amène préalablement à constituer un découpage zonal qui, tout en tenant compte des limites institutionnelles, s'en affranchit dans l'objectif d'étudier de manière fonctionnelle le territoire. La constitution du zonage initial est un compromis entre finesse (donc dans un certain sens une précision de l'affectation) et agrégation (facilité de traitement, robustesse des résultats). Ce compromis peut amener à de mauvais résultats d'affectation en imposant de "recréer" artificiellement des concurrences qui n'existent pas, car la zone pourrait être décomposée en sous-zones qui empruntent des itinéraires différents. Si globalement la majorité des modélisateurs donne une importance significative à l'affinement du zonage, cinq modélisateurs en interurbain sur onze n'y prêtent pas une attention élevée [9].

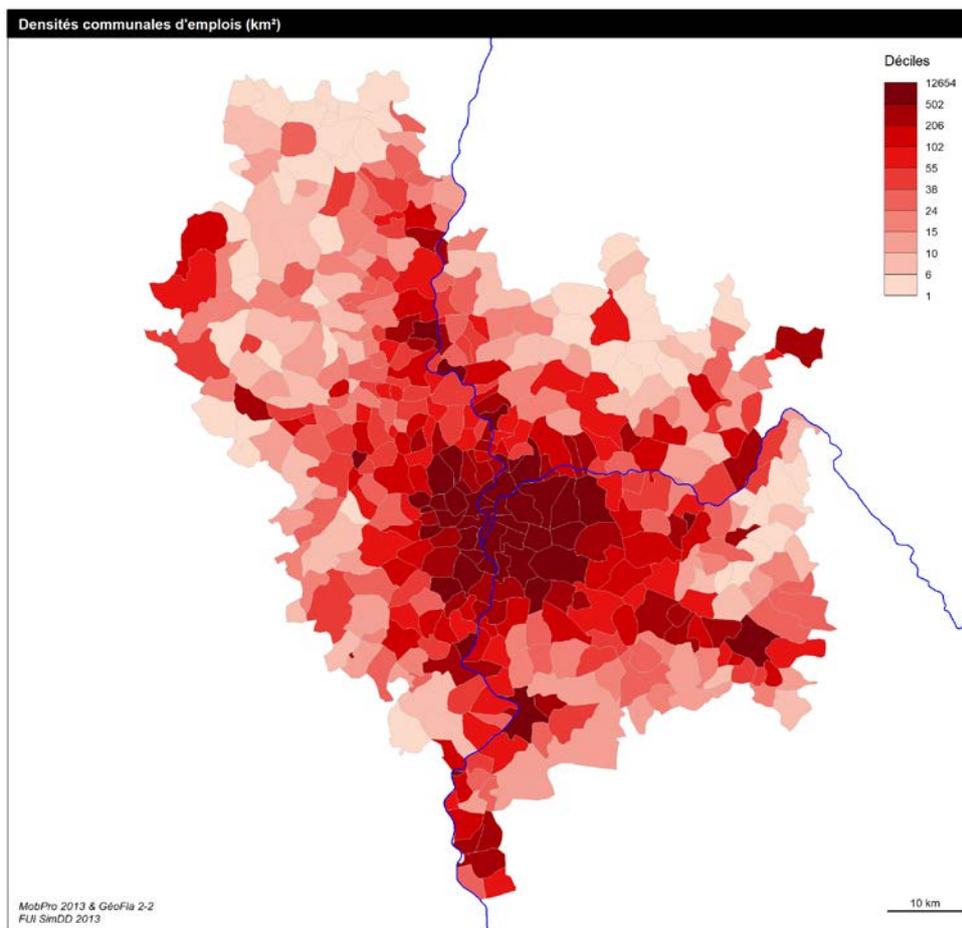
D'ailleurs la méthode de constitution de la demande de transport, via un traitement manuel des enquêtes OD, peut dissuader le modélisateur de découper une zone, au vu de la quantité de travail nécessaire pour estimer à nouveau les flux OD, alors que cela s'avère plus simple pour des modèles régionaux ou urbains, via la modélisation à 4 étapes, à condition de disposer des données socio-économiques. Pour que l'aire d'étude circoncrive l'ensemble des déplacements qui concernent le territoire un zonage externe est défini pour prendre en compte les flux d'échanges entre l'aire d'étude et son périmètre externe.

La modélisation d'un terrain géographique pour une étude des déplacements s'effectue en considérant, le plus souvent, deux facteurs propres à l'aire d'étude : les caractéristiques d'occupation des sols et de dessertes des territoires par les réseaux routiers et transports collectifs [17].

Typiquement les communes situées dans la partie centrale de l'agglomération, avec des densités importantes de populations et d'emplois seront découpées en plusieurs zones élémentaires. Dans la périphérie moins dense le découpage zonal peut épouser les limites des communes. En périphérie lointaine, plusieurs communes peuvent être regroupées en une seule zone de demande.



**Figure 8 : Densité communale de population – périmètre EMD2006**



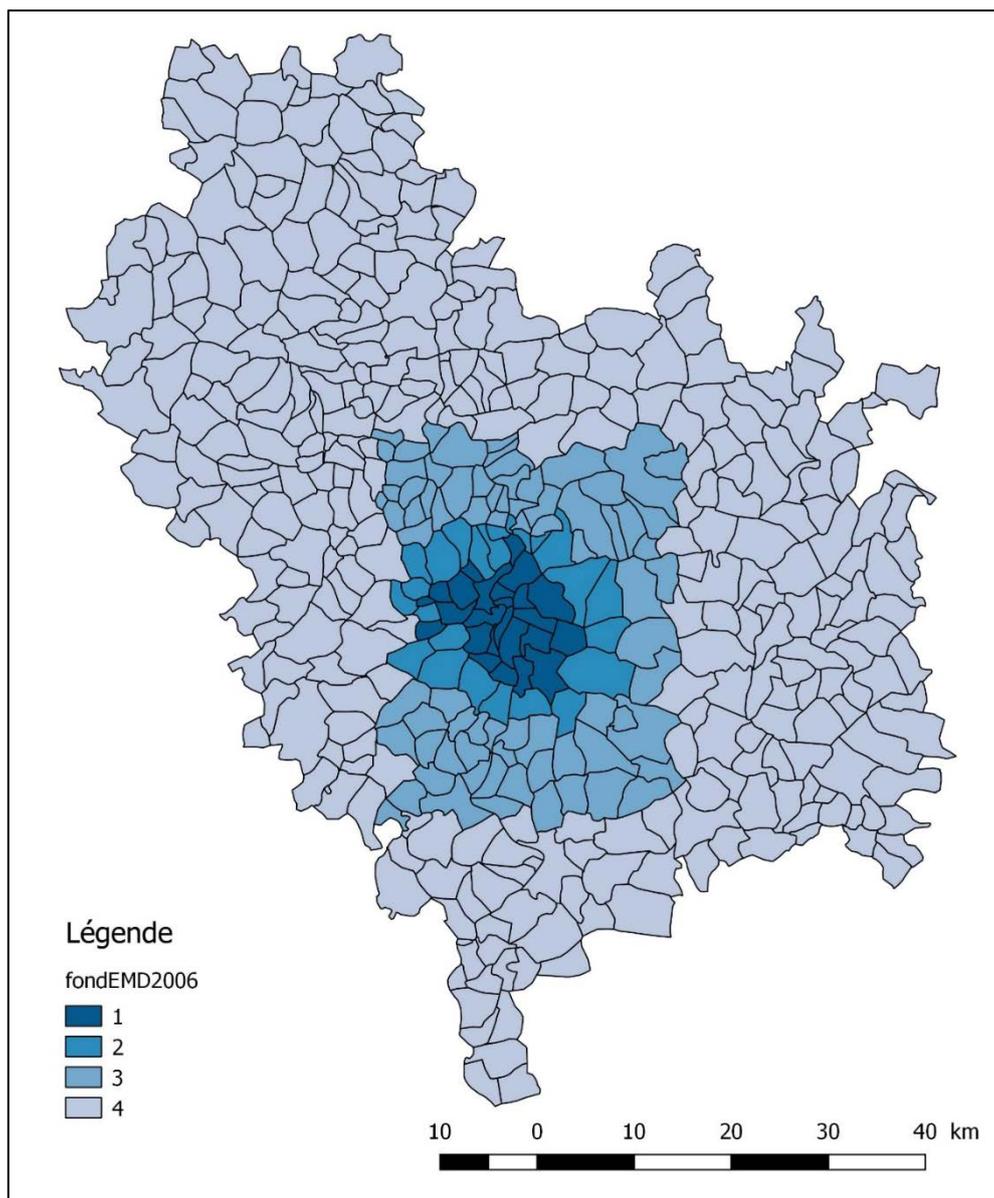
**Figure 9 : Densité communale d’emplois – périmètre EMD2006**

La population et l’emploi sont concentrés au centre de l’agglomération lyonnaise. La densité est globalement plus élevée sur Lyon et les alentours.

a) Macro zonage

Nous spécifions par la suite cinq découpages du territoire d’étude dans ce projet. Le but est de tester plusieurs découpages pour justifier la méthode ainsi que de la robustesse du modèle. Pour arriver à cet objectif, les découpages proposés sont bien différents (concentrique vs radial) et en même temps comparables. Il y a deux découpages qui se ressemblent sauf pour la zone en centre-ville qui est découpée en 7 petit zones.

Le premier découpage, V1C4 présenté sur la Figure 10, est composé de 4 zones concentriques. La première zone contient la ville de Lyon ainsi qu’un ensemble de 25 communes dont la densité de population est supérieure à 1143 nombre d’habitants par kilomètre-carré. La deuxième zone contient les 25 communes autour de la première zone dont la densité est supérieure à 545 nombre d’habitants par kilomètre-carré. La troisième zone contient les 76 communes formant le carré métropolitain. Le reste des communes fait partie de la quatrième zone. [21]



**Figure 10 : Découpage V1C4, concentrique sur le carré métropolitain de Lyon**

Le deuxième découpage qui s'appelle V2C4 est également concentrique et est composé de 4 zones (Figure 23 en annexe). Il s'agit d'un découpage classique avec un centre entouré par une première et deuxième couronne ainsi que le reste du périmètre.

Le troisième découpage, V3R5 est un découpage radial avec cinq zones qui se trouve sur la Figure 24. Le premier cercle est au centre de la ville de Lyon. Puis on a une division en quatre zones de la Nord-Est, Sud-Est, Sud-Ouest et Nord-Ouest.

Le quatrième découpage V4D10 est inspiré du découpage d'EMD et SimBAD D34. En agrégeant les zones, on arrive à un découpage de 10 zones au final (Figure 25).

Le cinquième découpage V5C10 est un extrait du premier découpage (V1C4), où la première zone en centre-ville était décomposée en 7 sous-zones comme présenté sur la Figure 26. On a pour objectif de tester l'effet propre des communes bien aménagées en agglomérations et plus amplement de voir s'il y a un impact dominant de cette finesse sur les résultats de modèle. D'ailleurs le découpage V1C4, V2C4 et V3R5 nous permet de comparer le zonage type radial

versus concentrique. Le découpage V4D10 apporte la particularité d'avoir une dispersion plus homogène du réseau sur le territoire d'étude en termes de caractéristiques du réseau routier.

Par la suite les Tableau 5, Tableau 6, Tableau 7, Tableau 8 et Tableau 9 montrent les caractéristiques du réseau routier, c'est-à-dire la capacité totale du réseau au niveau des macros zones.

**Tableau 5 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones –  
Découpage V1C4**

Zone	IMPORTANCE de 1 à 2	IMPORTANCE de 1 à 3	IMPORTANCE de 1 à 4	IMPORTANCE de 1 à 5
1	686 745	1 097 396	1 601 211	3 423 806
2	602 466	814 968	1 235 451	3 042 055
3	1 146 723	1 497 259	2 199 755	5 133 614
4	2 871 854	4 924 208	8 377 050	18 419 920
<b>Somme</b>	5 307 788	8 333 831	13 413 467	30 019 395

**Tableau 6 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones –  
Découpage V2C4**

Zone	IMPORTANCE de 1 à 2	IMPORTANCE de 1 à 3	IMPORTANCE de 1 à 4	IMPORTANCE de 1 à 5
1	693 227	1 102 489	1 622 227	3 510 316
2	602 460	819 787	1 243 120	3 019 186
3	927 950	1 222 904	1 813 084	4 279 515
4	3 081 282	5 184 844	8 729 383	19 206 829
<b>Somme</b>	5 304 919	8 330 024	13 407 814	30 015 846

**Tableau 7 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones –  
Découpage V3R5**

Zone	IMPORTANCE de 1 à 2	IMPORTANCE de 1 à 3	IMPORTANCE de 1 à 4	IMPORTANCE de 1 à 5
1	686 745	1 085 762	1 578 600	3 353 171
2	1 199 164	1 814 395	2 820 683	6 422 307
3	1 896 569	2 426 843	3 549 081	8 042 308
4	531 800	1 005 323	1 999 482	4 726 369
5	1 001 267	2 004 725	3 483 310	7 515 969
<b>Somme</b>	5 315 545	8 337 048	13 431 156	30 060 124

**Tableau 8 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones –  
Découpage V4D10**

Zone	IMPORTANTANCE de 1 à 2	IMPORTANTANCE de 1 à 3	IMPORTANTANCE de 1 à 4	IMPORTANTANCE de 1 à 5
1	198 112	368 859	571 813	1 148 295
2	335 545	527 903	726 064	1 580 696
3	419 508	576 451	861 286	2 047 090
4	344 786	460 958	764 923	1 827 866
5	726 168	1 151 166	1 862 268	4 222 181
6	783 791	1 066 740	1 588 860	3 709 835
7	536 893	735 426	1 163 775	2 931 069
8	651 360	877 339	1 410 561	3 002 524
9	416 370	696 103	1 366 548	3 006 182
10	891 147	1 853 148	3 081 153	6 533 712
<b>Somme</b>	5 303 680	8 314 093	13 397 251	30 009 450

**Tableau 9 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones –  
Découpage V5C10**

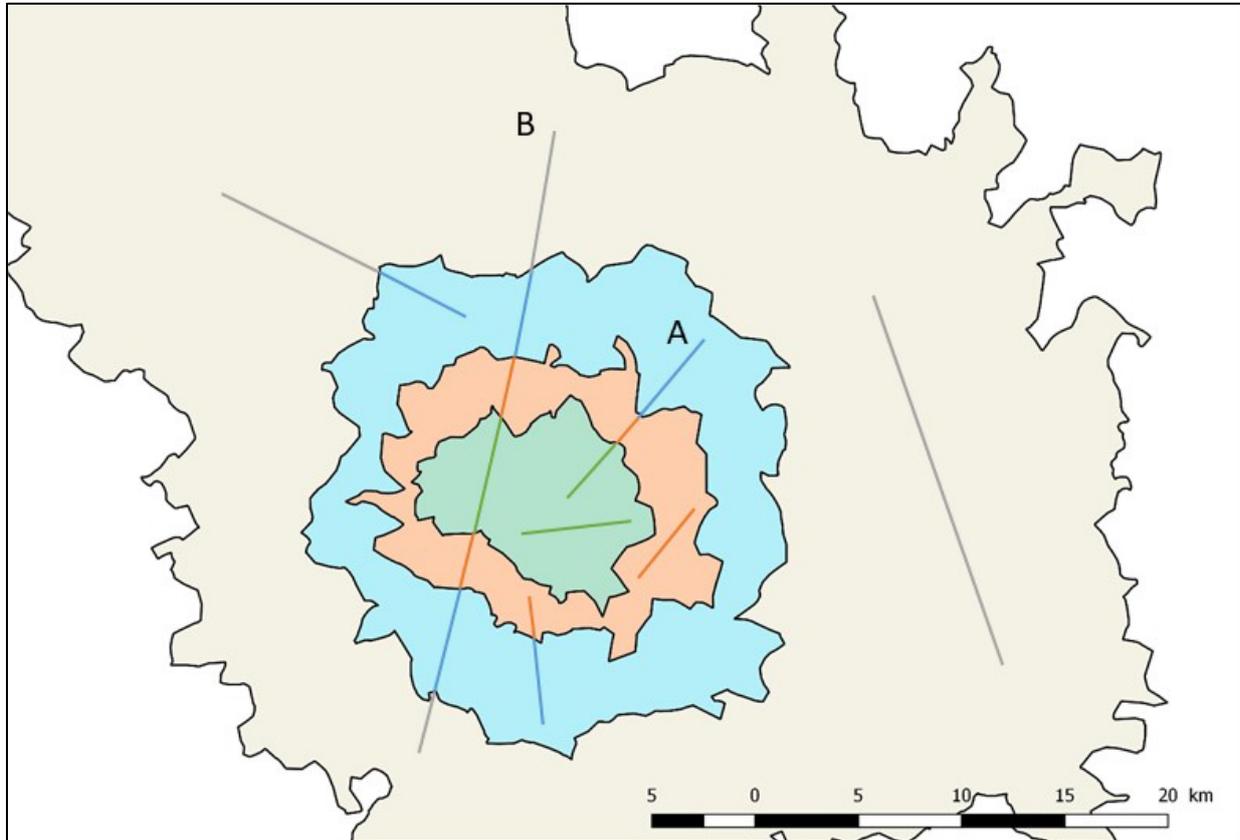
Zone	IMPORTANTANCE de 1 à 2	IMPORTANTANCE de 1 à 3	IMPORTANTANCE de 1 à 4	IMPORTANTANCE de 1 à 5
1	78 054	103 737	137 334	232 371
2	39 441	162 081	276 228	586 861
3	93 178	124 383	182 168	374 830
4	112 730	205 336	291 663	625 853
5	200 618	272 827	364 327	772 383
6	54 100	69 665	121 121	324 392
7	106 471	139 512	204 824	471 182
8	602 466	814 968	1 235 451	3 042 055
9	1 146 723	1 497 259	2 199 755	5 133 614
10	2 871 854	4 924 208	8 377 050	18 419 920
<b>Somme</b>	5 305 635	8 313 976	13 389 921	29 983 461

#### b) Pondération

L'objectif de cette phase est de produire le flux et la capacité du modèle. Pour cela on transforme les flux par arc de matrice OD en flux de macro zone. On prend l'exemple d'un individu qui se déplace entre 3 zones grâce à l'arc connecteur, qui rencontre tous les veh.km conduits sur ce trajet à l'intérieur de chacune des 3 zones.

Chaque arc, représentant une OD, est ensuite divisé à chaque intersection avec le contour de chaque zone contiguë. Chaque flux est ainsi décomposé en arcs plus petits, caractérisés par des gammes moyennes (en km), de sorte que le volume total de veh.km conduit à l'intérieur de chaque grande zone concentrique puisse être calculé (Figure 11). Sur la base de ces informations agrégées, le flux de trafic auquel est confronté l'individu pendant son voyage peut être estimé en pondérant la part de la distance totale parcourue dans chaque zone par le volume global de veh.km estimé pour ces zones, à cette période. Une procédure similaire est appliquée pour déterminer les capacités théoriques et la durée de voyage minimale rencontrées par les individus lors de leurs voyages.

Ici, nous proposons un exemple: le lien A, illustré sur la Figure 11, relie la zone 1 à la zone 3 de découpage V2C4 (concentrique). La distance euclidienne de ce lien est d'environ 17 km. Sur cette distance totale, 7,2 km sont situés à l'intérieur de la zone 1 (42,2%), 3,6 km dans la zone 2 (21,3%) et 6,2 km (36,5%) dans la zone 3.



**Figure 11 : Schéma de la répartition de l'offre/la demande en Macro Zone**

Nous savons à partir de l'ensemble de données de déplacements que 187 voitures particulières voyagent sur le lien "A" pendant l'heure de pointe entre 8h et 9h. Le nombre total de veh.km sur le lien "A" est donc de 3179 ( $187 * 17$ ), sous laquelle 1342 veh.km sont pilotés à l'intérieur de la zone 1 (42,2%). Puis 677 veh.km sont conduits à l'intérieur de la zone 2 (21,3%) et 1160 veh.km à l'intérieur de la zone 3 (36,5%).

Nous allons expliquer les enjeux de la matrice OD via la ligne B. Cette ligne montre une liaison entre deux communes qui sont situés à l'intérieur d'une même macro zone. On suppose que dans ce cas-là, la liaison pourrait traverser une ou plusieurs macro-zones selon le chemin le plus court. Il y a aussi des cas dans lesquels la liaison pourrait rester à l'intérieur de la même zone (e.g. les traits mono couleur en rouge, vert et le gris sur le graphique) en optimisant le trajet toujours en respectant le principe du plus court chemin.

Une fois que l'offre et la demande routière ont été calculées pour chaque macro zone (en dupliquant un processus similaire à celui décrit précédemment pour tous les liens  $A \neq A$ ), un individu voyageant sur le lien A ne rencontre que l'offre et la demande d'intérieure de la zone 1 de 42,2%, l'offre et la demande d'intérieure de la zone 2 de 21,3%, et l'offre et la demande d'intérieure de la zone 3 de 36,5%. Ainsi, l'offre et la demande rencontrées par chaque voyage individuel sont pondérées pour les différents arcs.

Ce calcul nous permet d'obtenir le flux et la capacité du réseau aux niveaux des macros zones selon les différents découpages. Enfin, la capacité totale a été pondérée aussi par la répartition de la distance en fonction des macro-zones grâce au graphe de matrice OD.

Les résultats finaux sont présentés par la suite. Le flux pondéré est en véhicule kilomètre, ainsi que la capacité totale par macro zone.

**Tableau 10 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) - Découpage V1C4**

Zone	Flux Pondéré	Capa_IMP1à2	Capa_IMP1à3	Capa_IMP1à4	Capa_IMP1à5
1	491 864	686 745	1 097 396	1 601 211	3 423 806
2	344 324	602 466	814 968	1 235 451	3 042 055
3	443 499	1 146 723	1 497 259	2 199 755	5 133 614
4	785 947	2 871 854	4 924 208	8 377 050	18 419 920
somme	2 065 634	5 307 788	8 333 831	13 413 467	30 019 395

**Tableau 11 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) - Découpage V2C4**

Zone	Flux Pondéré	Capa_IMP1à2	Capa_IMP1à3	Capa_IMP1à4	Capa_IMP1à5
1	500 229	693 227	1 102 489	1 622 227	3 510 316
2	339 966	602 460	819 787	1 243 120	3 019 186
3	383 753	927 950	1 222 904	1 813 084	4 279 515
4	841 687	3 081 282	5 184 844	8 729 383	19 206 829
somme	2 065 634	5 304 919	8 330 024	13 407 814	30 015 846

**Tableau 12 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) – Découpage V3R5**

Zone	Flux Pondéré	Capa_IMP1à2	Capa_IMP1à3	Capa_IMP1à4	Capa_IMP1à5
1	485 825	686 745	1 085 762	1 578 600	3 353 171
2	386 693	1 199 164	1 814 395	2 820 683	6 422 307
3	504 681	1 896 569	2 426 843	3 549 081	8 042 308
4	295 145	531 800	1 005 323	1 999 482	4 726 369
5	393 290	1 001 267	2 004 725	3 483 310	7 515 969
somme	2 065 634	5 315 545	8 337 048	13 431 156	30 060 124

**Tableau 13 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) - Découpage\_V4D10**

Zone	Flux Pondéré	Capa_IMP1à2	Capa_IMP1à3	Capa_IMP1à4	Capa_IMP1à5
1	220 666	198 112	368 859	571 813	1 148 295
2	195 087	335 545	527 903	726 064	1 580 696
3	236 457	419 508	576 451	861 286	2 047 090
4	158 750	344 786	460 958	764 923	1 827 866
5	190 357	726 168	1 151 166	1 862 268	4 222 181
6	326 790	783 791	1 066 740	1 588 860	3 709 835
7	164 860	536 893	735 426	1 163 775	2 931 069
8	124 450	651 360	877 339	1 410 561	3 002 524
9	163 888	416 370	696 103	1 366 548	3 006 182
10	284 331	891 147	1 853 148	3 081 153	6 533 712
<b>somme</b>	2 065 634	5 303 680	8 314 093	13 397 251	30 009 450

**Tableau 14 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) – Découpage V5C10**

Zone	Flux Pondéré	Capa_IMP1à2	Capa_IMP1à3	Capa_IMP1à4	Capa_IMP1à5
1	35 398	78 054	103 737	137 334	232 371
2	137 468	39 441	162 081	276 228	586 861
3	53 147	93 178	124 383	182 168	374 830
4	86 685	112 730	205 336	291 663	625 853
5	97 142	200 618	272 827	364 327	772 383
6	37 857	54 100	69 665	121 121	324 392
7	44 167	106 471	139 512	204 824	471 182
8	344 324	602 466	814 968	1 235 451	3 042 055
9	443 499	1 146 723	1 497 259	2 199 755	5 133 614
10	785 947	2 871 854	4 924 208	8 377 050	18 419 920
<b>somme</b>	2 065 634	5 305 635	8 313 976	13 389 921	29 983 461

Le Tableau 10 contient des données de découpage V1C4 qui représente le flux VP en veh.km/h à l'heure de pointe entre 8h et 9h et la capacité routière en veh.km/h. Le Tableau 11, Tableau 12, Tableau 13 et Tableau 14 présentent des données à partir des découpages V2C4, V3R5, V4D10 et V5C10 respectivement. La somme du flux reste stable mais selon le découpage, la capacité pondérée varie légèrement.

Une fois que l'offre de transport routier, la demande VP et les données de temps de parcours sont établies, on passe à l'étape de la modélisation et l'analyse des résultats.

### 1.3 Résultats

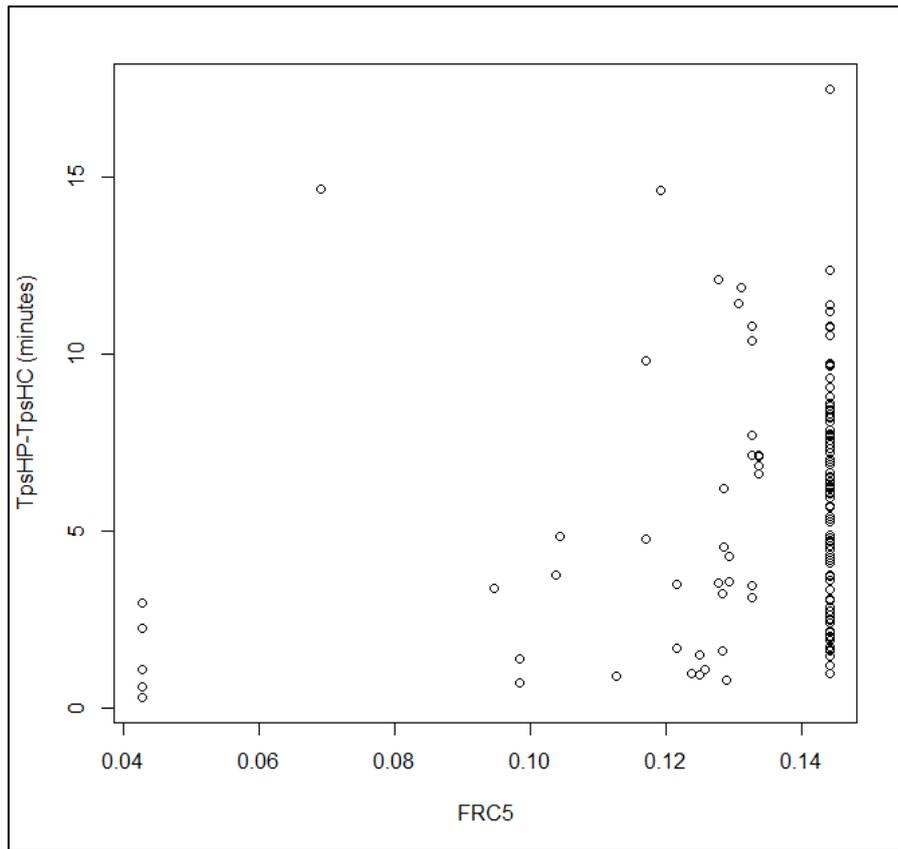
#### 1.3.1 Description des données

Les statistiques descriptives des données des 133 OD sont présentées dans le Tableau 15 pour le découpage V1C4. Les deux premières colonnes sont les temps de parcours en minute à l'heure de pointe (HP) ainsi qu'à l'heure creuse (HC). Ensuite le flux pondéré et la capacité en 4 niveaux de la finesse du réseau sont présentés toujours à l'unité de véhicule-kilomètre par heure.

**Tableau 15 : Statistiques descriptives des données de 133 OD – Découpage V1C4**

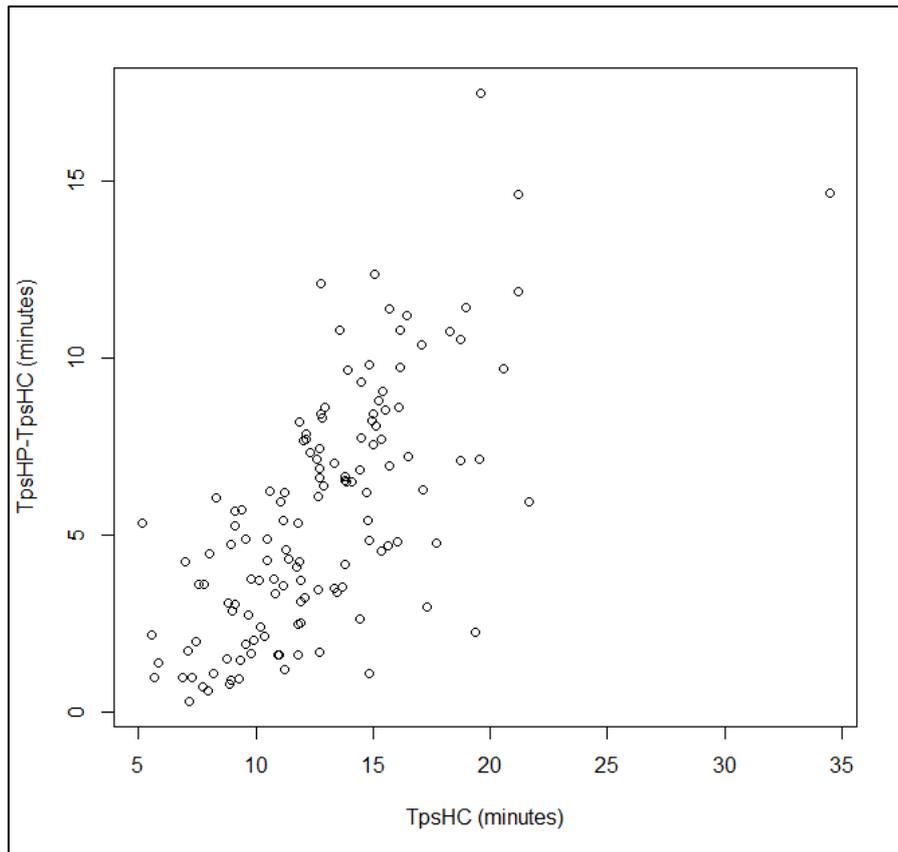
	HC ( $t_0$ )	HP ( $t_1$ )	Flux Pondéré	Capacité IMP1à2	Capacité IMP1à3	Capacité IMP1à4	Capacité IMP1à5
<b>Minimum</b>	5,1	6,7	344 324	608 298	821 076	1 244 574	3 057 499
<b>1st Quintile</b>	9,8	13,4	439 107	691 005	1 088 001	1 590 775	3 413 449
<b>Médian</b>	12,6	17,2	491 864	691 005	1 088 001	1 590 775	3 413 449
<b>Moyen</b>	12,7	18,3	481 175	806 036	1 208 788	1 820 338	3 987 681
<b>3rd Quintile</b>	15,0	22,5	491 864	691 005	1 088 001	1 590 775	3 413 449
<b>Maximum</b>	34,5	49,1	785 947	3 680 974	4 931 363	8 387 407	18 436 233

La Figure 12 présente l'écart entre le temps de parcours en heure de pointe et temps de parcours à vide (en ordonnées) en fonction du FCR (en abscisses). Malgré la limite des données utilisées (uniquement 133 OD) pour calibrer le modèle, on observe une variation du FCR. Cela nous permet finalement d'estimer l'impact du FCR sur le temps de parcours à l'heure de pointe.



**Figure 12 : Graphique de l'écart entre le temps de parcours en heure de pointe et à vide en fonction du FCR - découpage VIC4 en niveau d'importance 5**

Ensuite on illustre la relation entre d'une part l'écart entre le temps de parcours à l'heure de pointe et le temps de parcours à vide, d'autre part le temps de parcours à vide (cf. Figure 13). On constate que l'écart augmente avec le temps de parcours à vide.



**Figure 13 : Graphique de l'écart entre le temps de parcours en heure de pointe et à vide en fonction du temps de parcours à vide - découpage V1C4 en niveau d'importance 5**

### 1.3.2 Les modèles de régression

Le modèle de régression (3) est estimé pour les cinq découpages en prenant en compte les quatre niveaux d'importance qui indiquent les différents niveaux de la densité de l'offre routière. Il y a 12 scénarios réalisés pour chaque découpage soit 60 scénarios au total (3 spécifications de modèle \* 4 niveaux d'importance \* 5 découpages).

Les résultats démontrent qu'à travers n'importe quel découpage, la méthode est fiable et cohérente. On arrive à avoir un  $R^2$  autour de 0,9 avec présence du temps de parcours à vide et du rapport de la charge sur la capacité comme variables explicatives. Les résultats de tous les scénarios sont présentés dans les tableaux 15 à 19. Chaque tableau est dédié à un découpage et contient 3 types de spécification de modèle appliqué à 4 niveaux d'importance.

**Tableau 16 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V1C4**

	imp2	imp3	imp4	imp5	imp2-1	imp3-1	imp4-1	imp5-1	imp2-2	imp3-2	imp4-2	imp5-2
(Intercept)	0,11	0,23	0,29	0,48	0,25	-0,06	1,25	2,09	-3,49	-5,85	-4,74	-2,62
		*	**	***	*			*	**	***	**	*
log(HCMin)	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,13	1,14	1,14	1,13	1,13	1,13	1,13
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
log(FCR)	0,23	0,25	0,23	0,23	0,84	-0,30	1,49	1,60				
	***	***	***	***	**			*				
log(FCR)^2					0,36	-0,22	0,37	0,28				
								*				
log(Fp)									0,61	0,98	0,78	0,54
									***	***	***	***
log(Kp)									-0,34	-0,50	-0,38	-0,29
									***	***	***	***
R2 ajusté	0,89	0,88	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89

**Tableau 17 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V2C4**

	imp2	imp3	imp4	imp5	imp2-1	imp3-1	imp4-1	imp5-1	imp2-2	imp3-2	imp4-2	imp5-2
(Intercept)	0,13	0,22	0,29	0,48	0,29	0,29	1,40	2,44	-2,31	-4,65	-4,20	-2,22
		*	**	***	*			**	*	***	**	*
log(HCMin)	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,13	1,14	1,14	1,13	1,14	1,14	1,13
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
log(FCR)	0,29	0,26	0,23	0,23	1,03	0,38	1,66	1,89				
	***	***	***	***	**			*				
log(FCR)^2					0,51	0,05	0,42	0,33				
								*				
log(Fp)									0,58	0,86	0,76	0,52
									***	***	***	***
log(Kp)									-0,40	-0,47	-0,40	-0,30
									***	***	***	***
R2 ajusté	0,89	0,88	0,88	0,89	0,89	0,88	0,88	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89

**Tableau 18 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V3R5**

	imp2	imp3	imp4	imp5	imp2-1	imp3-1	imp4-1	imp5-1	imp2-2	imp3-2	imp4-2	imp5-2
(Intercept)	0,08	0,25	0,16	0,41	0,04	-0,12	-0,02	-0,59	-2,45	0,59	1,58	1,82
		*		***								
log(HCMin)	1,14	1,14	1,14	1,14	1,13	1,13	1,13	1,13	1,13	1,14	1,14	1,14
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
log(FCR)	0,15	0,23	0,21	0,20	-0,09	-0,49	-0,20	-0,72				
	***	***	***	***								
log(FCR)^2					-0,17	-0,35	-0,14	-0,20				
log(Fp)									0,35	0,25	0,06	0,10
									*			
log(Kp)									-0,15	-0,28	-0,17	-0,21
									***	***	***	***
R2 ajusté	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89

**Tableau 19 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V4D10**

	imp 2	imp 3	imp 4	imp 5	imp2- 1	imp3- 1	imp4- 1	imp5- 1	imp2- 2	imp3- 2	imp4- 2	imp5- 2
(Intercept)	0,07	0,22	0,33	0,47	0,07	0,32	0,70	0,85	-0,38	-0,28	-0,59	-0,72
		*	***	***		*	***	**				
log(HCMin)	1,13	1,15	1,14	1,14	1,14	1,15	1,14	1,14	1,13	1,15	1,14	1,14
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
log(FCR)	0,18	0,27	0,28	0,24	0,25	0,58	0,87	0,61				
	***	***	***	***	***	*	**	*				
log(FCR)^2					0,04	0,14	0,21	0,09				
							*					
log(Fp)									0,23	0,35	0,37	0,34
									*	***	***	***
log(Kp)									-0,20	-0,31	-0,30	-0,24
									***	***	***	***
R2 ajusté	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

**Tableau 20 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V5C10**

	imp2	imp3	imp4	imp5	imp2-1	imp3-1	imp4-1	imp5-1	imp2-2	imp3-2	imp4-2	imp5-2
(Intercept)	-0,03	0,13	0,24	0,38	0,03	0,13	0,36	0,56	0,56	0,58	0,54	0,46
			**	***			**	**	*	**	*	*
log(HCMin)	1,15	1,14	1,14	1,14	1,13	1,14	1,14	1,14	1,15	1,14	1,14	1,14
	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***	***
log(FCR)	0,10	0,21	0,21	0,20	0,11	0,23	0,43	0,39				
	***	***	***	***	***	*	**	*				
log(FCR)^2					-0,04	0,01	0,08	0,04				
					*							
log(Fp)									0,04	0,14	0,16	0,18
									**	**	***	
log(Kp)									-0,09	-0,18	-0,19	-0,19
									***	***	***	***
R2 ajusté	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

Notre étude a testé trois spécifications du modèle empirique. Le premier modèle est expliqué dans la section « méthode » qui prend en compte le temps de parcours à vide et le ratio FCR.

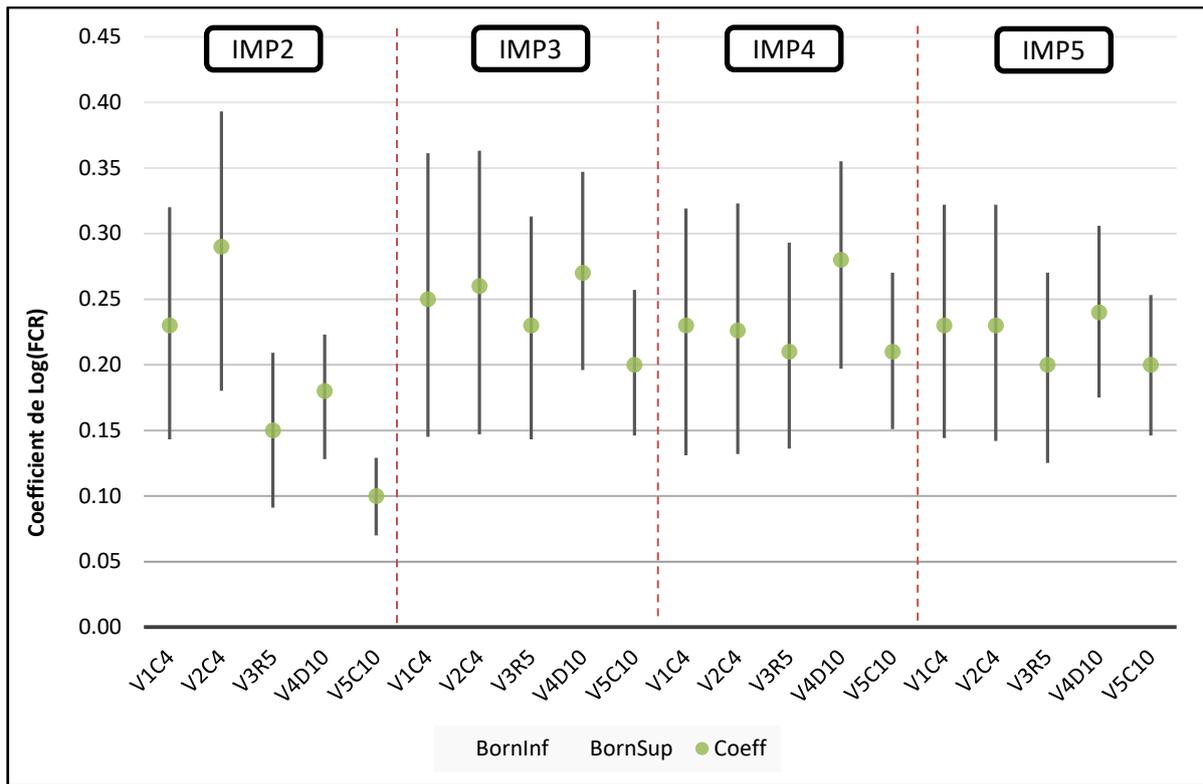
Dans la seconde spécification on a ajouté le carré de FCR aux variables explicatives. Mais cette variable est non significative. Ce modèle semble donc peu intéressant.

Pour la troisième spécification la charge et la capacité sont proposés indépendamment. Il y a trois variables explicatives introduites dans ce type de modèle. Les coefficients de ces variables nous montrent que le modèle se comporte différemment selon le découpage. Dans la plupart des cas, les trois variables sont significatives avec des signes attendus y compris sur les découpages V1C4, V2C4, V4D10 et V5C10 sauf pour le niveau d'importance 2. Mais pour le découpage V3R5 qui est un découpage plutôt radial, le flux n'a pas l'impact dans le modèle. D'ailleurs la valeur de la constante n'est pas très cohérente (la valeur de l'exponentielle est entre 0 et 1, ce qui donnerait des temps  $t_1$  diminuant avec le FCR). En plus alors que les signes restent corrects, il existe une divergence des coefficients sachant qu'ils ne sont pas dans le même ordre de grandeur.

En se concentrant désormais uniquement sur la première spécification du modèle (*i.e.* F/C) et en comparant les différents niveaux d'importance sur l'ensemble des découpages utilisés, on met en lumière les différences liées au zonage du périmètre. Elle rend compte que pour l'ensemble des résultats, toutes les variables sont significatives avec des signes attendus.

### 1.3.3 Test de la robustesse

La Figure 14 compare les intervalles de confiance des coefficients de rapport de la charge sur la capacité (en log) sur les différents découpages spatiaux, regroupés par niveau d'importance pour tester sa robustesse aux découpages.

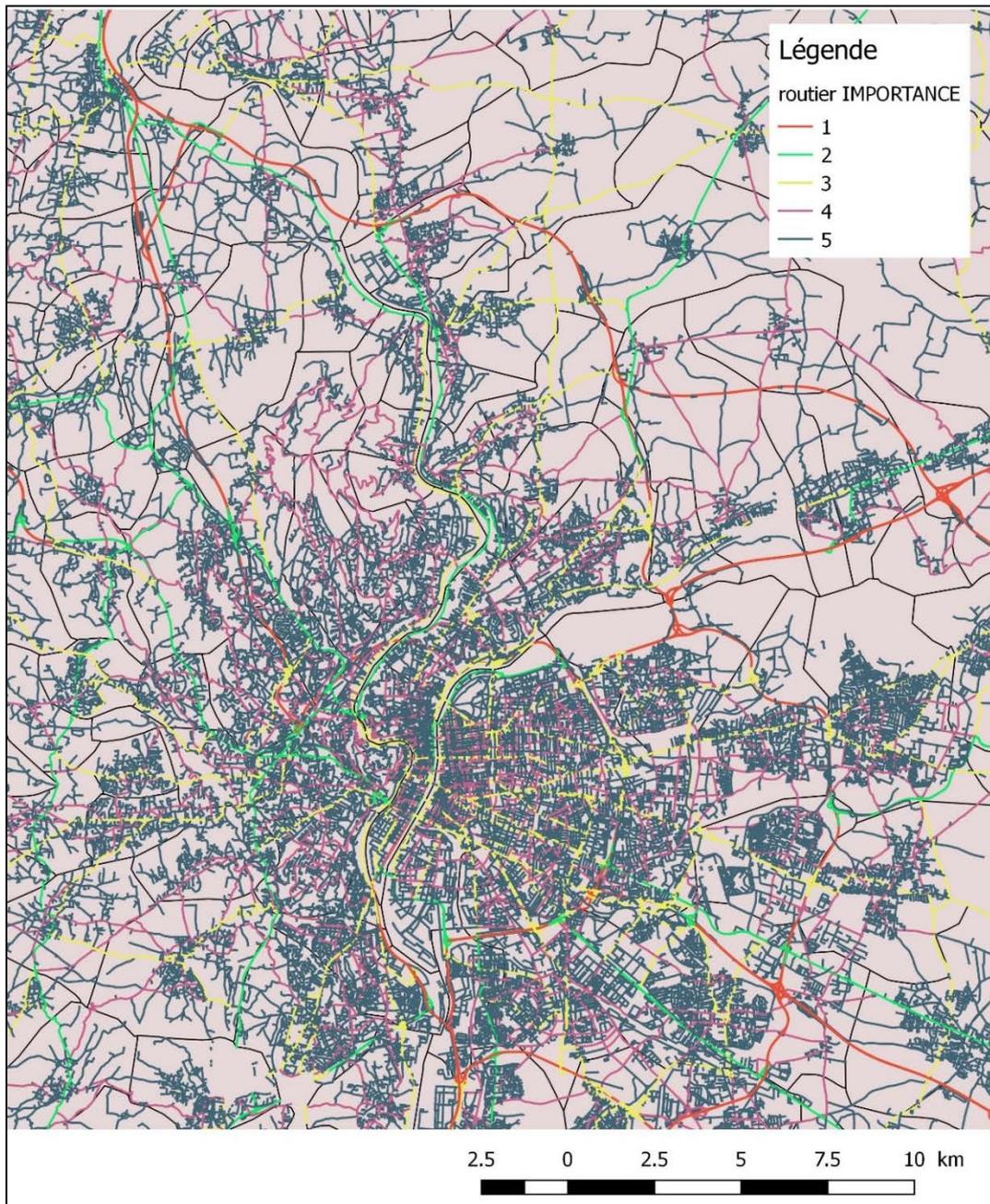


**Figure 14 : Intervalles de confiance des coefficients de FCR selon différents découpages**

Elle montre bien qu'au niveau de l'importance 2, on observe la diversification par rapport à l'ordre de grandeur du coefficient de FCR à travers des différents découpages. Il y a une convergence en passant du niveau d'importance 3 à 5, degré où le réseau est représenté le plus finement. De plus, la différence entre le maximum et le minimum du coefficient de FCR au niveau d'importance 5 est égale à la moitié des niveaux d'importance 3 et 4, ce qui montre l'amélioration de notre résultat.

On peut conclure sur le fait que plus on augmente la finesse de réseau viaire, plus les intervalles de confiance convergent. On peut également en déduire que l'impact du découpage est limité.

La Figure 15 présente un exemple de schéma du réseau avec les niveaux d'importance 1 à 5. On voit bien que la densité du réseau viaire est au maximum à ce niveau-là.



**Figure 15 : Schéma du réseau routier en centre de l'agglomération lyonnaise – tous niveaux d'importances**

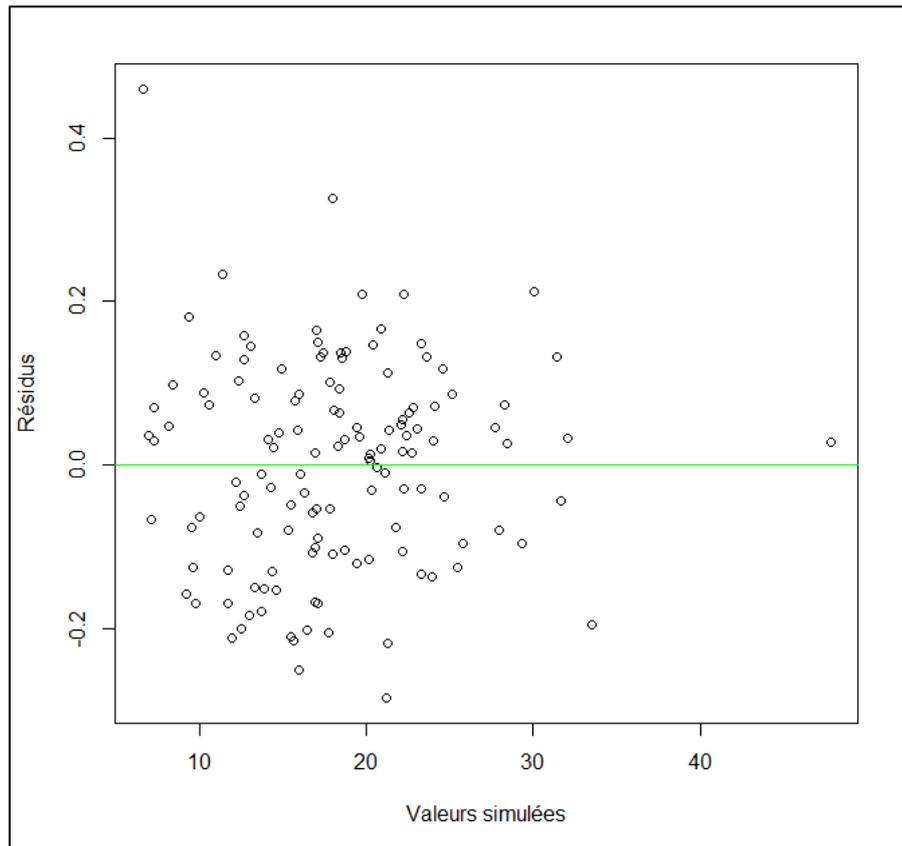
#### 1.3.4 Analyse des résidus

Les propriétés (biais, convergence) et l'inférence statistique (test de significativité, intervalle de confiance) reposent en grande partie sur des hypothèses sur les erreurs. Il faut s'assurer de la conformité aux hypothèses.

Afin de vérifier les hypothèses indiquées par la suite, il faut étudier le graphique des résidus ainsi que le QQplot.

- les erreurs sont non-corrélés ( $E(\varepsilon_i, \varepsilon_j) = 0$ )
- en moyenne le modèle est bien spécifié ( $E(\varepsilon) = 0$ )
- la variance de l'erreur est constante ( $E(\varepsilon^2) = \sigma_\varepsilon^2$ )

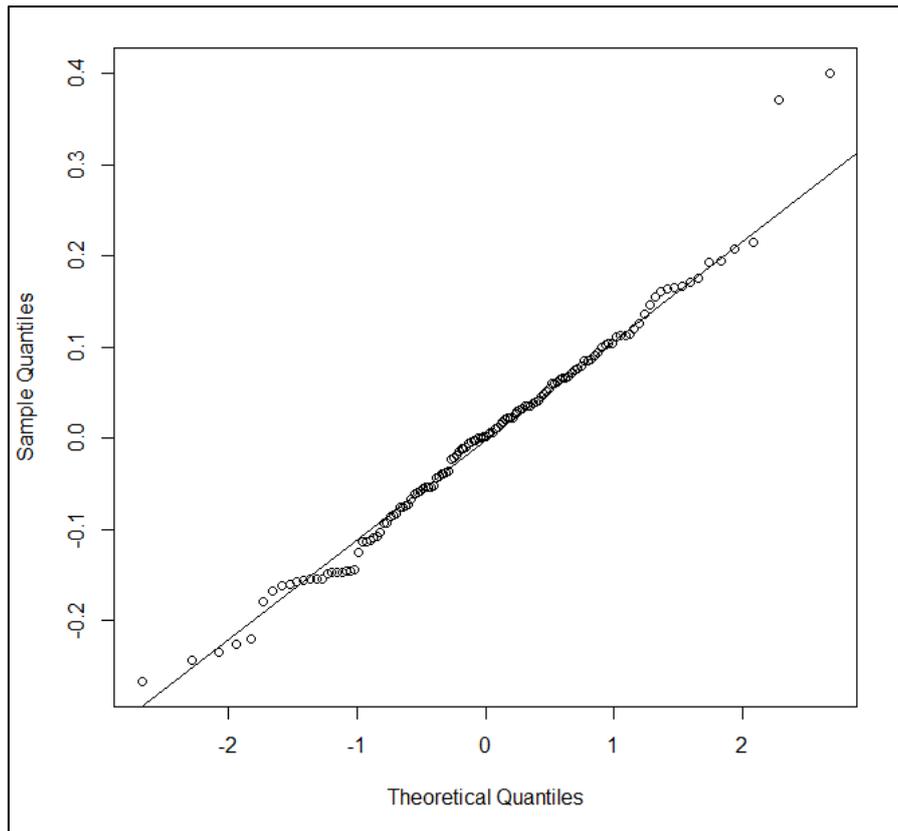
- $\varepsilon \equiv \text{Normale}(0, \sigma_\varepsilon^2)$



**Figure 16 : Graphique des résidus**

La Figure 16 représente les résidus du modèle portés en ordonnée et les valeurs simulées (les temps de parcours estimés grâce au modèle) en abscisse. Elle s'assure que les erreurs sont non corrélées. On observe le caractère aléatoire des résidus. On en déduit donc que le modèle est bien spécifié parce qu'il évite toute forme de régularité dans les résidus.

Afin de tester la normalité des résidus on utilise le graphique Q-Q plot pour vérifier la compatibilité avec la loi normale.

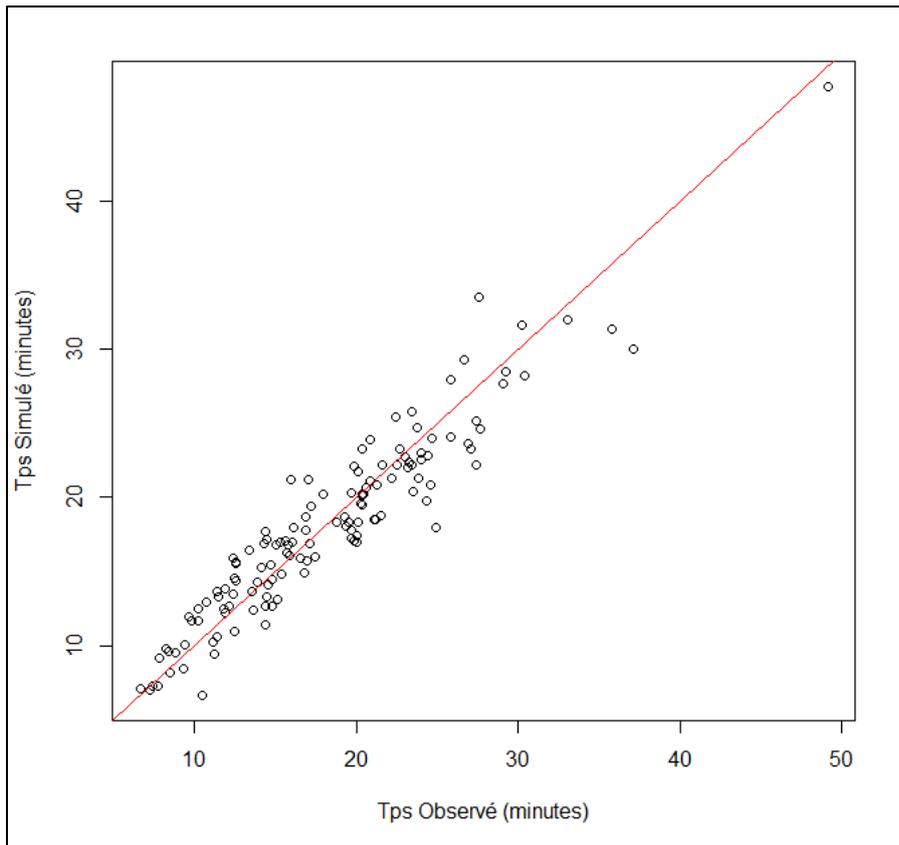


**Figure 17 : Q-Q plot**

La Figure 17 confronte les quantiles de 2 distributions (la loi normale et les résidus) dans un graphique X-Y : le Q-Q plot. On cherche de trouver la compatibilité à travers de cette comparaison entre les deux distributions pour prouver la similarité. On voit que dans ce graphique les points forment plus ou moins une droite donc on peut constater que la similarité est satisfaisante. Cela confirme la normalité des résidus.

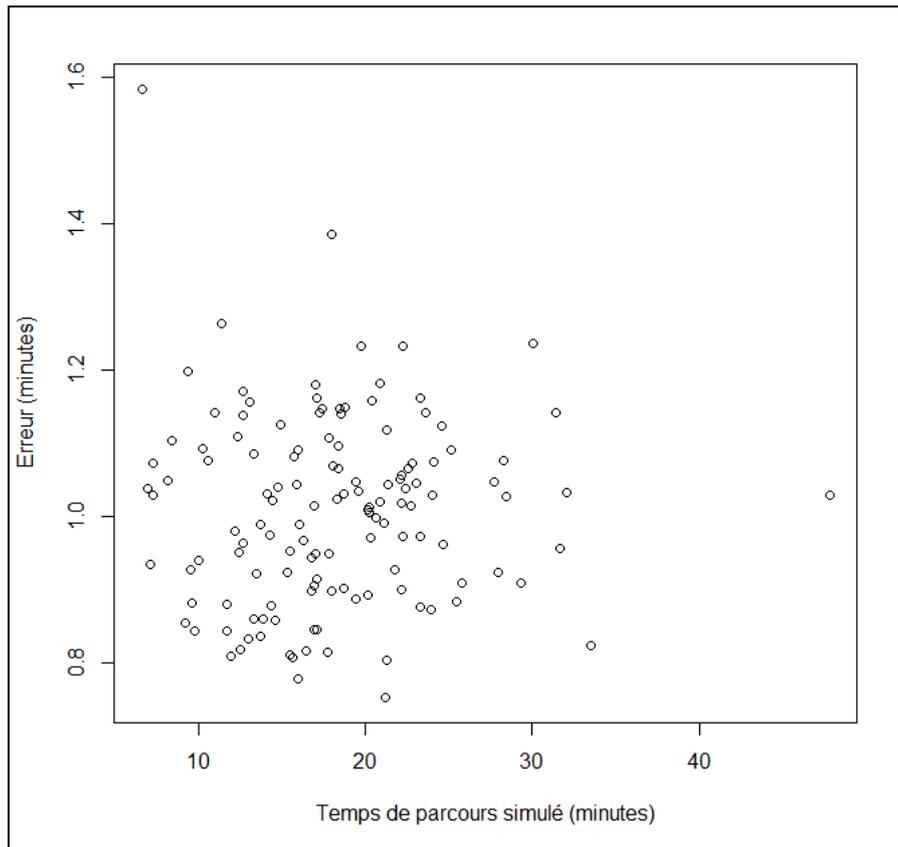
### 1.3.5 Analyse des résultats

La Figure 18 nous permet de comparer le temps de parcours estimé (en ordonnées) et le temps de parcours observé (en abscisses). Il y a une forte concentration autour de la ligne diagonale en rouge qui prouve que le modèle est capable d'estimer des valeurs proche des valeurs observées.



**Figure 18 : Graphique du temps de parcours observées vs du temps de parcours estimées en minutes – découpage V1C4 en niveau d’importance 5**

La Figure 19 montre l’erreur de modèle (en ordonnées) en fonction du temps de parcours simulé (en abscisse) en minutes pour le découpage V1C4. On voit que la majorité des erreurs reste entre 0.8 et 1.2 minutes. Cela nous rassure sur la qualité de l’estimation par le modèle macroscopique.



**Figure 19 : Graphique des erreurs du modèle vs le temps de parcours simulés vs en minutes – découpage V1C4 en niveau d’importance 5**

#### 1.4 Validation

La validation a pour objectif de déterminer dans quelle mesure le modèle obtenu est crédible et consiste à s’assurer que le modèle réagit correctement à des variations des données d’entrée et qu’il est apte à fonctionner en projection.

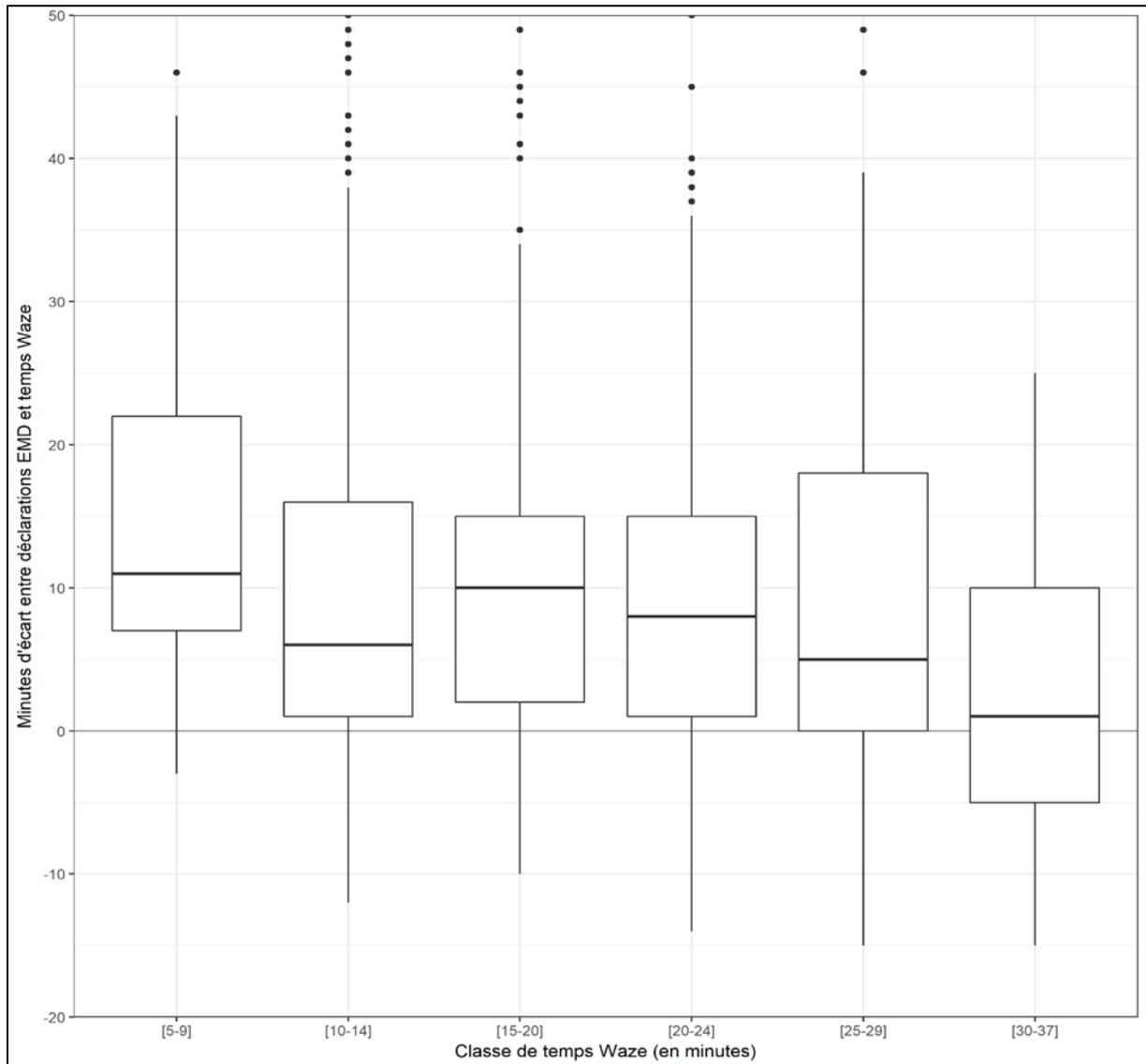
Idéalement, le modélisateur dispose pour cette étape d’un jeu de données d’observations qui n’ont pas servi lors du calage. Il est alors en mesure de les utiliser pour valider le fonctionnement du modèle. Il peut s’agir par exemple de deux années différentes d’observation, avec un réseau qui a évolué entre ces deux années. En pratique, le modélisateur ne dispose pas, la plupart du temps, de suffisamment de données pour procéder de la sorte, aussi ce guide proposera-t-il quelques recommandations pour s’assurer dans la mesure du possible de la qualité du modèle sans pour autant procéder à une validation complète [9].

Différentes options sont possibles, en fonction du contexte et des données disponibles. Il est cependant rare de pouvoir effectuer une véritable validation sur un jeu de données complètement différent de celui utilisé pour les phases précédentes. Dans ce cas, la validation est plutôt constituée par des tests de robustesse. Ces derniers font l’objet de la synthèse précédente sur les 60 scénarios en fonction à la fois de la spécification du modèle, du découpage du territoire ainsi que du niveau de densité du réseau.

En complément de cette phase on a comparé les données modélisées avec des données observées, celles de l’EMD Lyon. Pour chaque trajet, nous avons comparé les temps Waze

avec les temps déclarés issus de l'EMD. La Figure 20 présente la dispersion de l'écart entre le temps EMD (en ordonnée) et le temps Waze (en abscisse).

On observe une variabilité des temps EMD parce que c'est du déclaratif.



**Figure 20 : Dispersion de l'écart entre le temps EMD et le temps Waze**

Plus globalement, dans l'ensemble des classes et au total, il y a une surestimation des déclarations EMD que l'on peut expliquer par le fait que la déclaration rend compte du temps porte-à-porte alors que le temps Waze correspond à un point à point sur le réseau viaire.

On voit que l'écart médian est globalement entre 5 et 10 minutes et n'augmente pas selon les classes de temps Waze (qui vont de 5-9 minutes jusqu'à 25-29 minutes, l'écart médian étant quasi nul pour la plage 30-37 minutes). Cette observation nous permet de postuler que cet écart quasi-constant de 5 à 10 minutes en ordre de grandeur correspond au temps d'accès au véhicule et au réseau routier à l'origine du déplacement ainsi qu'à la destination finale. Cela valide par conséquent notre démarche d'utilisation de ces temps Waze pour représenter la

qualité de l'offre routière du point de vue de l'utilisateur, à une constante près qui est ce temps d'accès.

## 1.5 Conclusion

La qualité et surtout la quantité de données disponibles ont été des obstacles non négligeables tout au long de ce travail de modélisation. Ces limites biaisent notre compréhension du fonctionnement du réseau. Conscient de ces limites, nous avons développé un outil sur la base de simplifications admissibles aux regards des objectifs fixés. Les premiers résultats obtenus sont cohérents avec les effets attendus.

On propose un modèle macroscopique de trafic routier qui est non seulement robuste à la représentation du réseau routier mais aussi robuste au découpage spatial. Ce modèle de déplacements pourrait finalement être utilisé en projection. Puisque l'impact du découpage spatial est limité, le planificateur pourrait utiliser ce modèle sur d'autres territoires sans se préoccuper du découpage zonal du périmètre d'étude.

Enfin, on suggère de tester ce modèle sur un autre territoire afin de solidifier le résultat et valider la méthode proposée dans ce projet. Pour cela il faut trois types de données :

- les données du réseau de transport routier ; issue de BDTOPO disponible sur tout le territoire français ;
- la charge du réseau (en uvp), à partir d'une enquête ménages déplacements locale, d'une enquête cordon et d'une simulation du transport de marchandises en ville (de type FRETURB)
- les temps de parcours à vide et en heure de pointe sur le réseau routier.

## 2 L'OFFRE DU RESEAU DE TRANSPORT EN COMMUN

La description du réseau de transports en commun est de nature différente de celle du réseau viaire. Un réseau de transports en commun est composé de lignes et le passage d'une ligne à une autre (ce qui s'appelle la correspondance) génère un coût ou temps supplémentaire qui n'a pas d'équivalent pour la voiture.

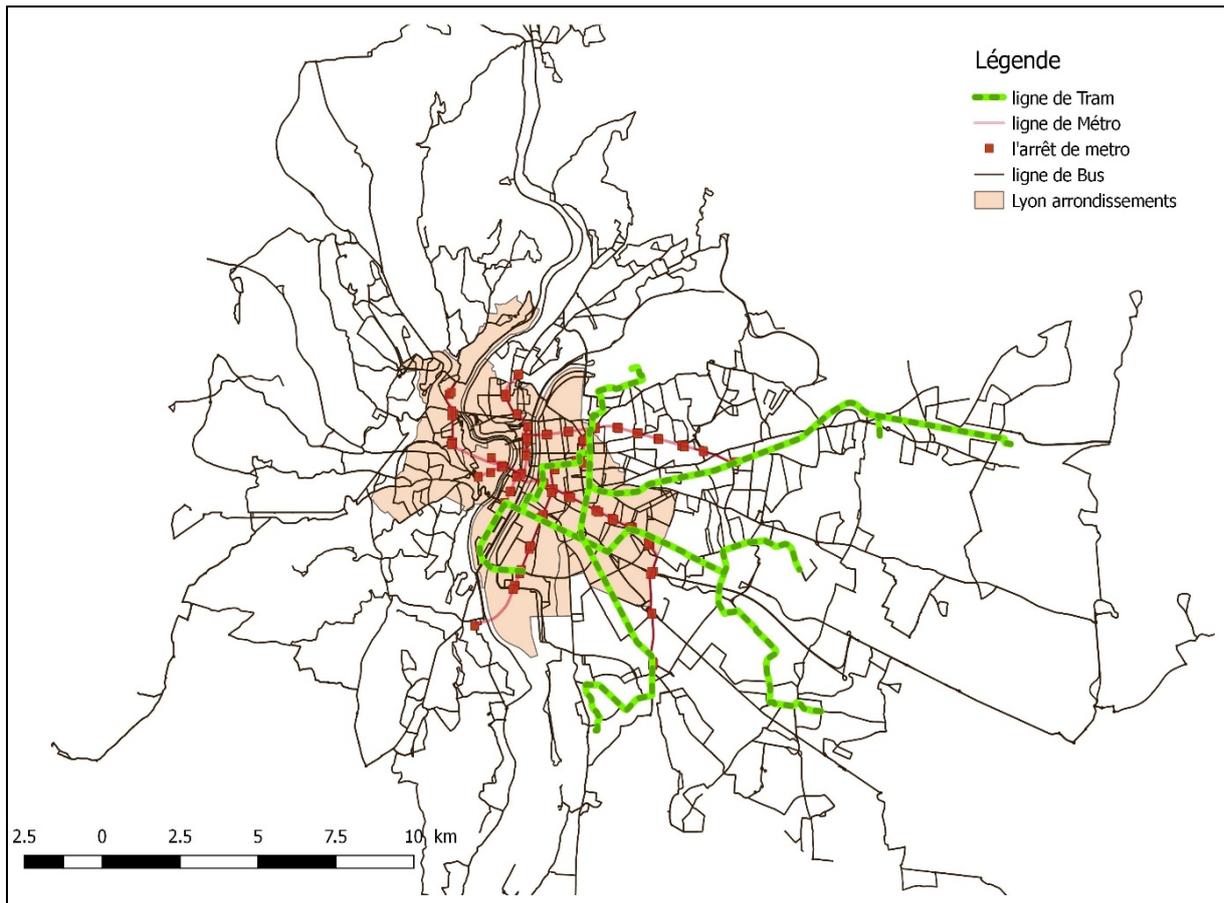
Il est donc nécessaire de superposer au graphe du réseau support une description des lignes de transports en commun. Pour chaque ligne, cette description consiste en une succession de nœuds de réseau correspondant à des possibilités de monter ou descendre de la ligne [14]. Les horaires des TC (e.g. des lignes de bus, métro et tram) nous permettent de calculer le temps de parcours en transport en commun en prenant compte des hypothèses retenues.

Par la suite nous présentons très brièvement les principales étapes de ce travail compris des données nécessaires ainsi que la méthode de calcul et les hypothèses détaillées dans le rapport technique disponible sur les scripts par ailleurs.

### 2.1 Données

L'offre de réseau de transport en commun, ici l'offre du réseau TCL – Transport en Commun Lyonnais (e.g. la Figure 21) – est extraite des données GTFS disponibles sur les sites nationaux et locaux des données ouvertes ([data.gouv.fr](http://data.gouv.fr) & [data.grandlyon.com](http://data.grandlyon.com)).

Le *General Transit Feed Specification* (GTFS) est un format standardisé, pour les horaires et l'information géographique associée, des réseaux de transport (public) ([developers.google.com/transit/gtfs/](http://developers.google.com/transit/gtfs/)). Il est composé d'une série de fichiers texte délimités – au format csv – où chacun renseigne d'un aspect du réseau : arrêts, routes, voyages, horaires, etc.



**Figure 21 : Schéma du réseau de transport en commun d'agglomération Lyonnaise – Source (Data.GrandLyon.com)**

Ce standard, initialement développé par TriMet et Google sur Portland, tend désormais à se généraliser de par le monde, grâce notamment à sa structure hiérarchique et ordonnée, à son exploitation facilitée et à son interopérabilité. Ainsi, au-delà du réseau TCL, plusieurs réseaux de transport français sont d'ores et déjà disponibles sur les serveurs de données ouvertes d'agglomérations ou d'opérateurs au premier desquels la SNCF.

## 2.2 Hypothèses et méthode de calcul

Les données GTFS proposant l'intégralité des horaires du réseau à chaque arrêt et durant une période pouvant s'étaler sur plusieurs mois, il convient de définir les limites temporelles de l'analyse. Pour ce faire, on sélectionne une période précise : un créneau de 2 heures – correspondant aux bornes de l'heure de pointe du matin – un jour de semaine « normale » – en prenant ainsi soin d'éviter les jours dans ou à proximité des vacances scolaires et des jours fériés. Ainsi, pour les données TCL, il s'agit du mardi 19 mai 2016, entre 7 et 9h.

Dès lors, on travaille l'ensemble des données horaires à l'instar d'un graphe que l'on parcourt pour trouver le plus court chemin – en temps – reliant deux nœuds – arrêts – du réseau.

Pour proposer un modèle cohérent d'utilisation d'un réseau de transport en commun, on limite le nombre de correspondances à 2. Dès lors, tous les arrêts ne sont pas nécessairement reliés à l'ensemble des autres arrêts.

Pour réévaluer les bons temps de parcours à partir des seuls temps de trajet en véhicule, on intègre des temps d'attente et de correspondance :

Le premier est intégré à l'arrêt initial, il correspond à la moitié du temps moyen à l'arrêt entre deux bus de la ligne que l'on va emprunter. Par convention, on l'a borné à 5 minutes maximum.

$$\text{Temps d'attente (en min.)} = \frac{\text{Temps de la période}}{\text{Fréquence au départ sur la période}} / 2 \quad (5)$$

Le second est intégré, lorsqu'elles se présentent, à chaque correspondance et rend compte du temps de stationnarité entre la descente et la montée dans un second véhicule. Il correspond à la moitié du temps moyen à l'arrêt entre deux bus. On prend la vision pessimiste en retenant en entrée la fréquence minimum entre la ligne avant ou après la correspondance : le bus le moins régulier contraint plus l'horaire pris pour l'autre bus. Enfin, dans les deux cas, ce temps est borné à 10 minutes maximum.

$$\text{Temps de correspondance} = \frac{\text{Temps de la période}}{\text{minimum} \left( \begin{array}{l} \text{Fréquence au départ sur la période} \\ \text{Fréquence à l'arrivée sur la période} \end{array} \right)} / 2 \quad (6)$$

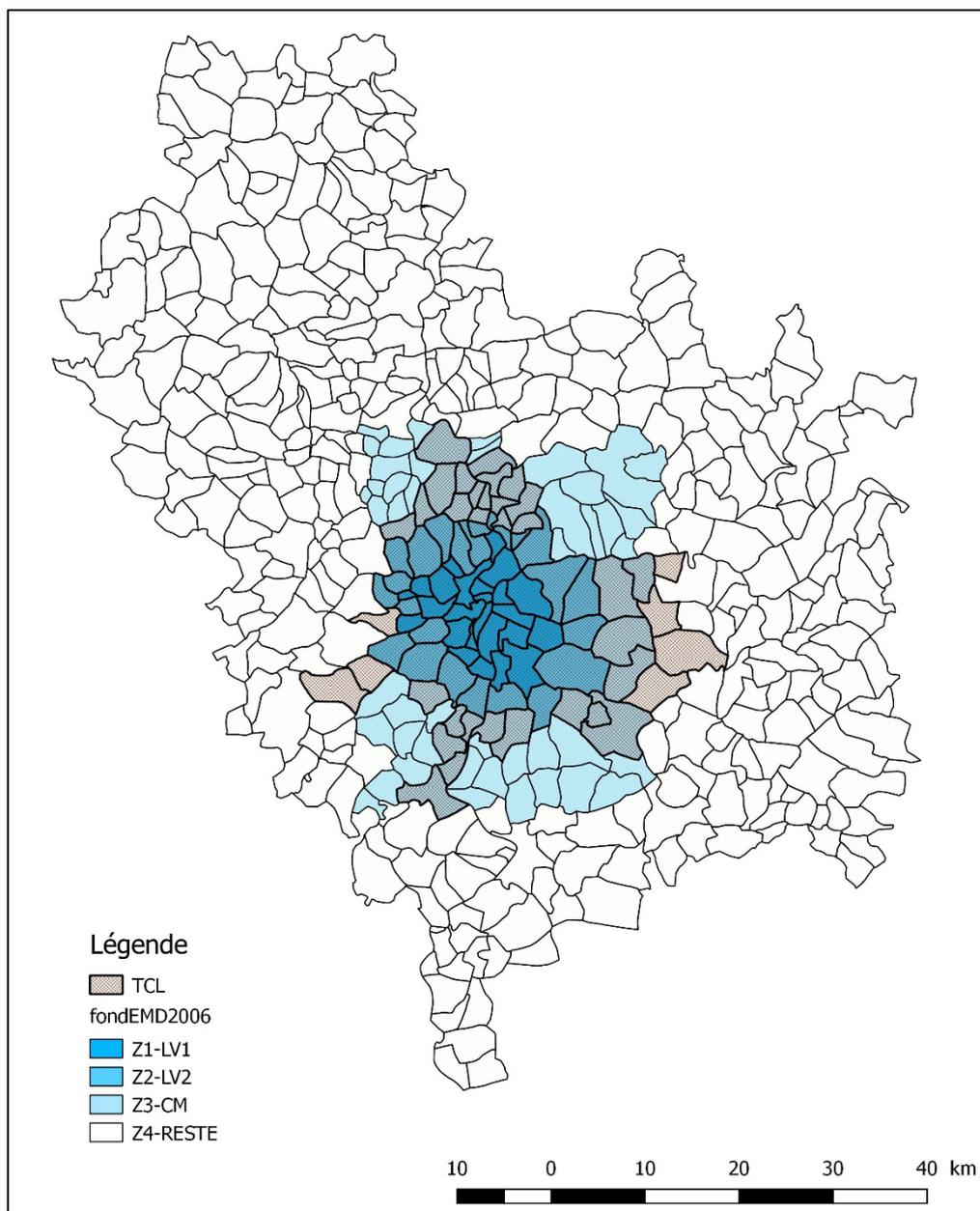
Enfin, pour éviter les parcours de proximité les plus improbables en transport en commun, on a mis en place la possibilité d'effectuer le début ou la fin du trajet TCL en marche à pied : parcourir la distance entre deux arrêts de bus à pied dans le but d'optimiser son temps de parcours total. Le temps de marche à pied retenu est 4 km/h.

Dès lors, on parcourt le graphe pour détecter le chemin le plus rapide entre deux arrêts, puis, ramenés à la commune, sur des temps moyens de parcours entre deux communes.

La méthode retenue pour le lien entre la commune A et la commune B est de prendre la moyenne des temps de parcours de l'ensemble des liaisons possible d'arrêts de A à arrêts de B.

### 2.3 Résultats

Les données nous renvoient des temps moyens de parcours inter communal en TC. La Figure 22 présente le périmètre TCL projeté sur le territoire EMD Lyon 2006. Le réseau TCL couvre 86 communes parmi les 455 communes de notre périmètre d'étude.



**Figure 22 : Périmètre TCL sur le territoire EMD2006**

Afin de montrer le temps de parcours TC calculées grâce à la méthode détaillée précédemment, on a choisi un échantillon de données finaux. Le Tableau 21 représente les temps de parcours TC calculées en minutes pour les OD dont les flux sont suffisamment significatifs (seuil de 600) selon des données MobPro Lyon 2013.

**Tableau 21 : Temps de parcours en TC**

Origine	Destination	Flux total	Temps TCL (minutes)
Villeurbanne	Lyon 3e Arrondissement	2 570	22
Villeurbanne	Lyon 6e Arrondissement	1 223	21
Lyon 3e Arrondissement	Villeurbanne	1 208	22
Villeurbanne	Lyon 7e Arrondissement	1 046	28
Lyon 8e Arrondissement	Lyon 3e Arrondissement	888	21
Lyon 7e Arrondissement	Lyon 3e Arrondissement	830	20
Villeurbanne	Lyon 2e Arrondissement	782	27
Villeurbanne	Vaulx-en-Velin	729	23
Lyon 3e Arrondissement	Lyon 7e Arrondissement	706	20
Lyon 6e Arrondissement	Villeurbanne	672	21
Villeurbanne	Saint-Priest	664	39
Lyon 3e Arrondissement	Lyon 6e Arrondissement	645	19
Villeurbanne	Bron	635	28
Lyon 6e Arrondissement	Lyon 3e Arrondissement	631	19
Lyon 8e Arrondissement	Saint-Priest	628	34
Vénissieux	Lyon 3e Arrondissement	627	29
Lyon 3e Arrondissement	Bron	627	26
Lyon 8e Arrondissement	Lyon 7e Arrondissement	626	21
Villeurbanne	Lyon 8e Arrondissement	609	31

## 2.4 Conclusion

Le résultat de cette étape de calcul des temps de parcours TC est nécessaire pour nourrir l'étape de choix modal.

Les détails de tous les calculs du temps de parcours TC sont présentes dans le rapport technique afférent. La méthode que nous proposons est reproductible sous condition de la disponibilité de données du réseau TC en format de GTFS, standard qui tend à se généraliser.

## CONCLUSION GENERALE

Nous avons élaboré un modèle macroscopique de trafic routier, adapté aux objectifs fixés, sur la base de simplifications admissibles. A partir d'une série d'estimations sur la base de spécifications variées sur le cas de l'agglomération lyonnaise, nous avons sélectionné un modèle qui se révèle être robuste par rapport à la représentation du réseau routier et robuste par rapport au découpage spatial.

La méthode est aisément reproductible, notamment pour la validation du modèle sur d'autres territoires, moyennant trois types de données :

- les données du réseau de transport routier, issues de BDTOPO disponible sur tout le territoire français ;
- la charge du réseau (en équivalent uvp), à partir d'une enquête ménages déplacements locale, d'une enquête cordon et d'une simulation du transport de marchandises en ville (de type FRETURB)
- les temps de parcours à vide et en heure de pointe sur le réseau routier.

Concernant la représentation de l'offre en transports collectifs nous proposons une méthode également reproductible, sous condition de la disponibilité de données du réseau TC au format GTFS, standard qui tend à se généraliser. Le résultat de cette étape de calcul des temps de parcours TC est nécessaire pour nourrir l'étape de choix modal.

## ANNEXES

### Annexe 1 : Les différents découpages spatiaux

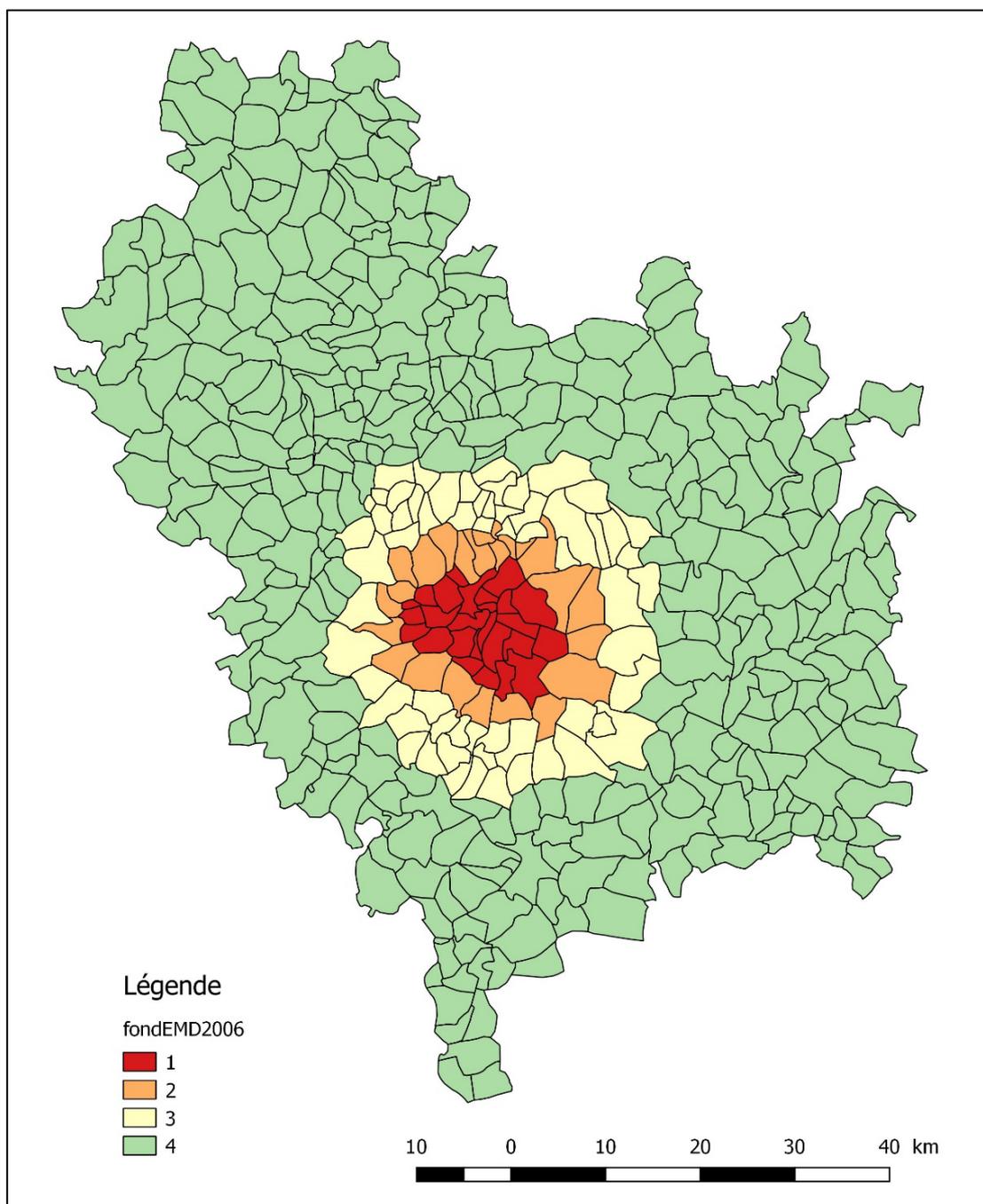
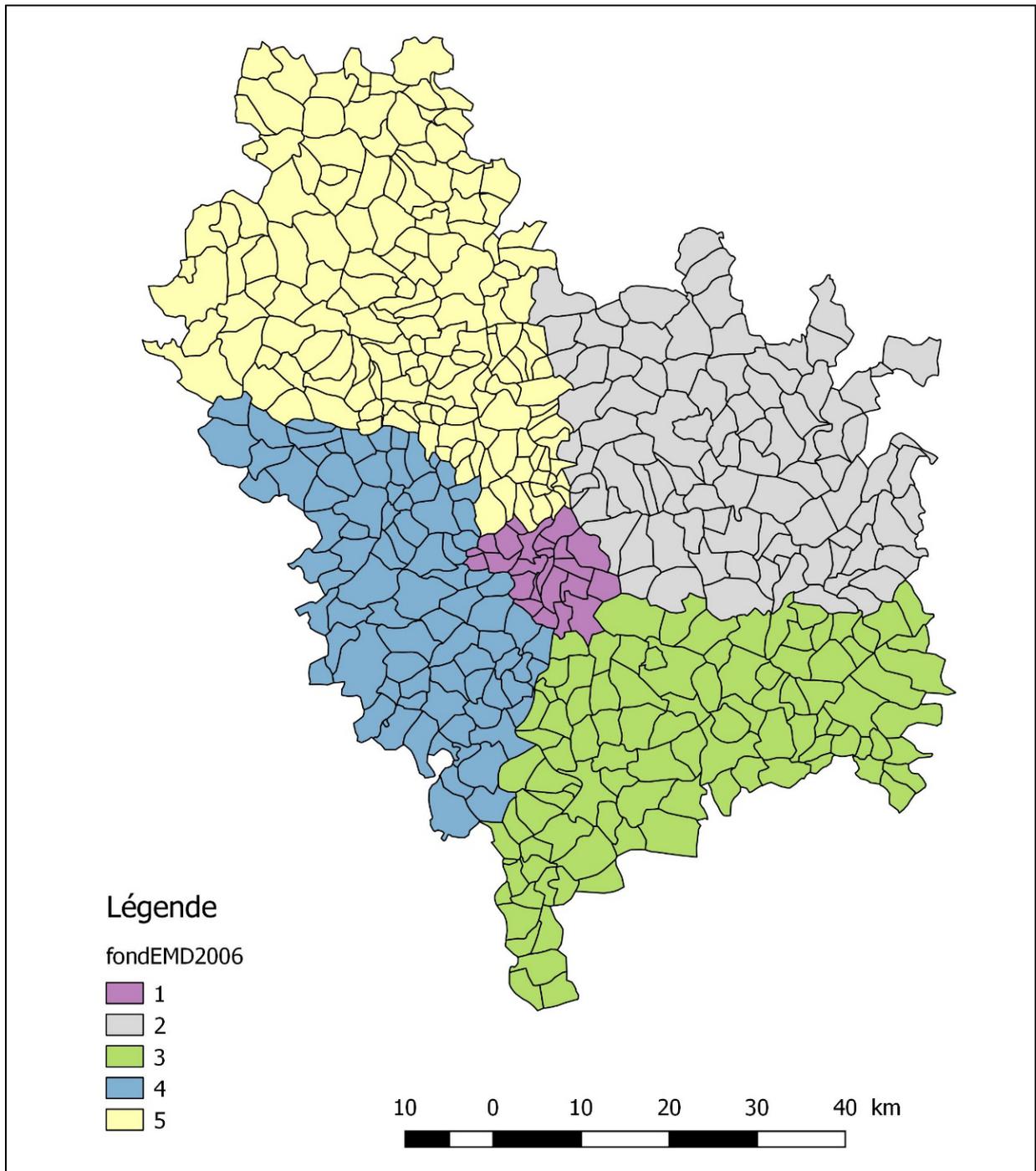
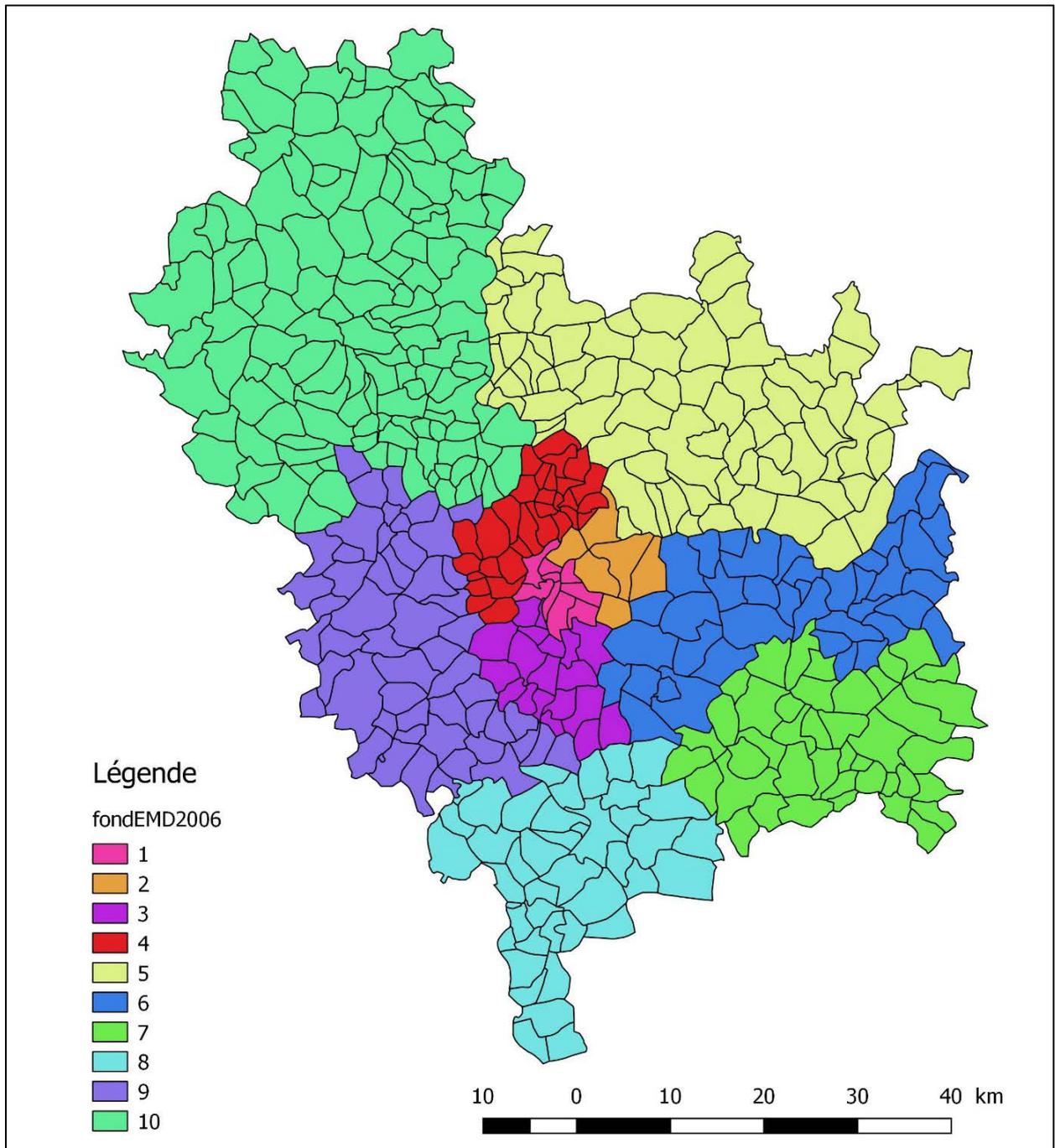


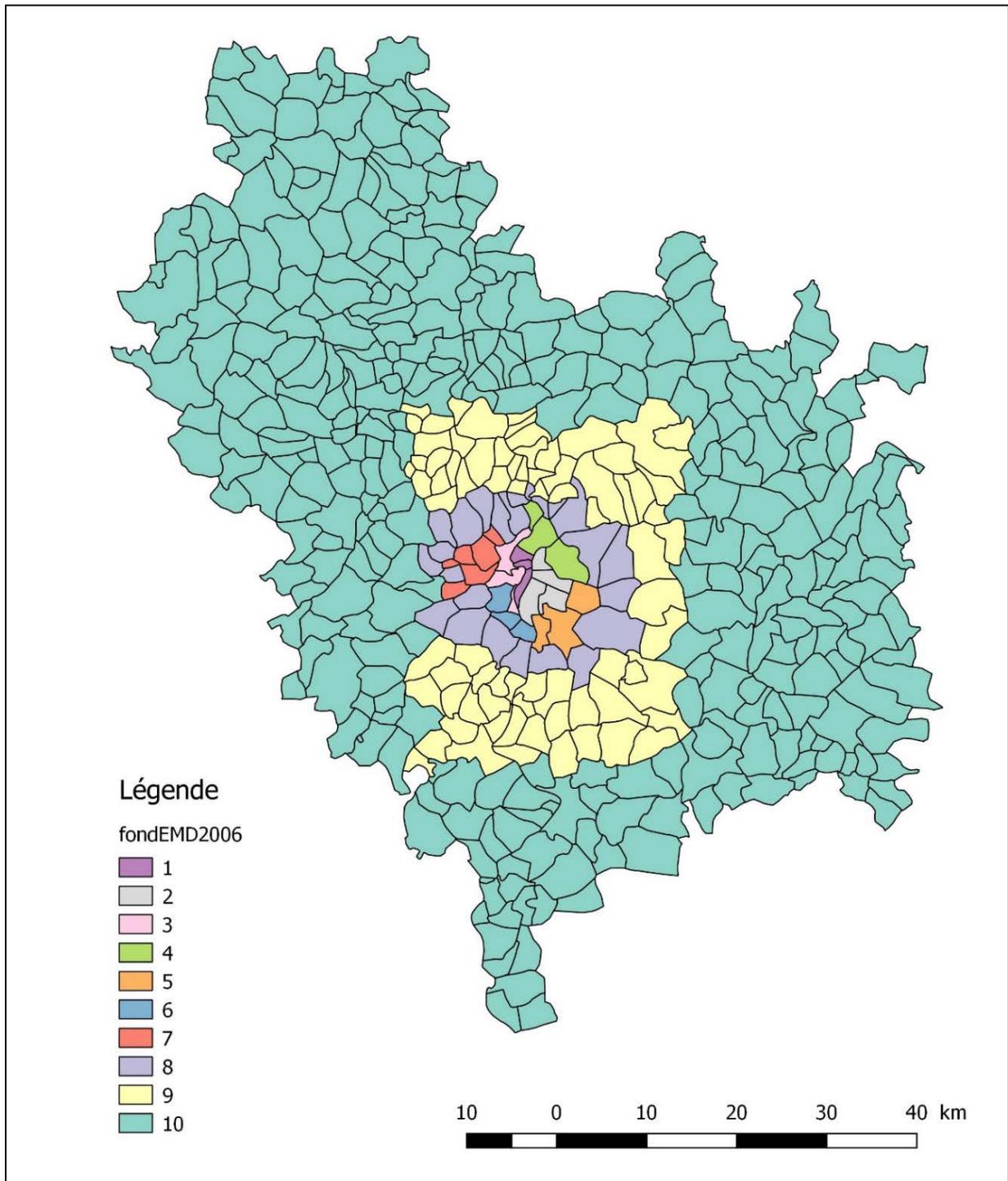
Figure 23 : Découpage V2C4, concentrique



**Figure 24 : Découpage V3R5, radial**



**Figure 25 : Découpage V4D10**



**Figure 26 : Découpage V5C10**

## Annexe 2 : Caractéristiques du réseau routier

**Tableau 22 : Caractéristiques du réseau – Découpage V1C4**

Niveaux d'importance	Zone	Nb moyen de voies	Longueur (km)	Capacité moyenne (uvp/h/voie)	Capacité totale (veh.km/h)	Vitesse à vide (km/h)
<b>IMPORTANCE de 1 à 2</b>	1	2,3	212	1449	691 173	68
	2	2,0	202	1 480	603 899	80
	3	2,1	362	1 520	1 150 002	93
	4	2,0	1 307	1 411	3 688 354	87
<b>IMPORTANCE de 1 à 3</b>	1	2,1	473	1 094	1 097 019	57
	2	1,9	356	1 192	814 756	67
	3	2,0	625	1 230	1 499 063	75
	4	2,0	2 424	1 035	4 917 326	66
<b>IMPORTANCE de 1 à 4</b>	1	2,0	843	956	1 603 757	53
	2	1,9	659	993	1 236 791	59
	3	1,9	1 124	1 021	2 203 400	64
	4	1,9	4 835	895	8 395 011	58
<b>IMPORTANCE de 1 à 5</b>	1	1,8	2 305	834	3 421 819	49
	2	1,8	2 038	833	3 038 801	53
	3	1,7	3 497	846	5 147 724	55
	4	1,6	14 056	810	18 444 283	53

**Tableau 23 : Caractéristique du réseau – Découpage V2C4**

Niveaux d'importance	Zone	Nb moyen de voies	Longueur (km)	Capacité moyenne (uvp/h/voie)	Capacité totale (veh.km/h)	Vitesse à vide (km/h)
<b>IMPORTANCE de 1 à 2</b>	1	2,2	215	1 437	692 059	67
	2	2,0	201	1 480	603 884	81
	3	2,0	308	1 494	929 507	90
	4	2,1	1 052	1 425	3 073 155	89
<b>IMPORTANCE de 1 à 3</b>	1	2,1	475	1 095	1 102 665	57
	2	1,9	359	1 188	818 865	67
	3	1,9	530	1 210	1 224 883	74
	4	2	2 513	1 047	5 183 289	66
<b>IMPORTANCE de 1 à 4</b>	1	2	856	995	1 694 923	53
	2	1,9	664	991	1 243 665	60
	3	1,9	950	1 009	1 811 660	63
	4	1,9	4 988	902	8 728 401	58

<b>IMPORTANCE de 1 à 5</b>	1	1,8	2 368	832	3 506 913	49
	2	1,8	2 021	833	3 013 452	53
	3	1,7	2 920	841	4 272 953	54
	4	1,6	14 583	812	19 183 062	53

**Tableau 24 : Caractéristique du réseau – Découpage V3R5**

Niveaux d'importance	Zone	Nb moyen de voies	Longueur (km)	Capacité moyenne (uvp/h/voie)	Capacité totale (veh.km/h)	Vitesse à vide (km/h)
<b>IMPORTANCE de 1 à 2</b>	1	2,3	212	1 440	686 880	68
	2	2,0	487	1 482	1 443 468	94
	3	2,2	796	1 475	2 524 315	88
	4	1,8	251	1 290	582 822	74
	5	2,1	336	1 439	1 000 853	90
<b>IMPORTANCE de 1 à 3</b>	1	2,1	465	1 100	1 084 380	57
	2	1,9	843	1 120	1 812 787	72
	3	2,0	990	1 224	2 423 520	73
	4	1,9	558	965	1 006 939	60
	5	2,0	1 022	987	2 007 341	63
<b>IMPORTANCE de 1 à 4</b>	1	2,0	827	690	1 135 554	53
	2	1,9	1 546	952	2 825 841	62
	3	2,0	1 781	1 020	3 542 409	63
	4	1,9	1 256	845	1 995 282	54
	5	1,9	2 060	870	3 476 868	57
<b>IMPORTANCE de 1 à 5</b>	1	1,8	2 253	836	3 352 644	49
	2	1,8	4 329	827	6 408 349	54
	3	1,7	5 446	849	8 045 158	54
	4	1,6	3 850	787	4 726 722	51
	5	1,6	6 048	801	7 508 894	52

**Tableau 25 : Caractéristique du réseau – Découpage V4D10**

Niveaux d'importance	Zone	Nb moyen de voies	Longueur (km)	Capacité moyenne (uvp/h/voie)	Capacité totale (veh.km/h)	Vitesse à vide (km/h)
<b>IMPORTANCE de 1 à 2</b>	1	2,3	65	1 344	198 041	55
	2	2,2	98	1 580	335 478	80
	3	2,2	129	1 522	424 090	84
	4	2,0	122	1 397	347 685	77
	5	2,0	298	1 477	880 292	95

	6	2,0	301	1 439	874 941	88
	7	2,0	356	1 436	1 037 768	89
	8	2,1	219	1 476	691 742	87
	9	1,9	188	1 350	477 144	77
	10	2,1	307	1 418	892 418	89
<b>IMPORTANTANCE de 1 à 3</b>	1	2,3	158	1 006	370 349	50
	2	2,0	229	1 155	531 738	63
	3	1,9	249	1 204	577 521	68
	4	2,0	205	1 149	462 874	66
	5	1,9	544	1 093	1 154 564	70
	6	1,9	474	1 161	1 071 287	72
	7	2,0	322	1 163	737 737	72
	8	2,0	367	1 185	879 229	71
	9	1,9	359	1 024	695 473	63
	10	2,0	959	970	1 851 158	63
<b>IMPORTANTANCE de 1 à 4</b>	1	2,1	308	897	571 891	47
	2	1,9	374	1 007	726 873	58
	3	1,9	453	1 003	863 282	60
	4	1,9	418	949	765 596	58
	5	1,9	1 035	930	1 857 722	61
	6	1,9	844	984	1 586 247	62
	7	1,9	619	967	1 161 232	61
	8	2,0	741	972	1 411 694	60
	9	1,9	831	868	1 363 272	55
	10	1,9	1 827	869	3 080 066	57
<b>IMPORTANTANCE de 1 à 5</b>	1	1,7	820	817	1 145 597	45
	2	1,8	1 024	849	1 582 264	52
	3	1,8	1 354	839	2 044 811	53
	4	1,8	1 272	822	1 829 772	53
	5	1,8	2 915	820	4 230 831	54
	6	1,8	2 428	835	3 710 105	54
	7	1,8	2 018	823	2 923 033	54
	8	1,7	2 166	840	3 002 076	54
	9	1,5	2 444	800	3 011 008	52
	10	1,5	5 446	802	6 551 538	52

**Tableau 26 : Caractéristique du réseau – Découpage V5C10**

Niveaux d'importance	Zone	Nb moyen de voies	Longueur (km)	Capacité moyenne (uvp/h/voie)	Capacité totale (veh.km/h)	Vitesse à vide (km/h)
----------------------	------	-------------------	---------------	-------------------------------	----------------------------	-----------------------

<b>IMPORTANCE de 1 à 2</b>	1	2,5	24	1 315	77 966	47
	2	2,8	12	1 220	39 682	53
	3	2,0	32	1 473	93 329	65
	4	2,2	33	1 546	112 750	77
	5	2,2	63	1 464	201 622	71
	6	2,5	13	1 654	53 982	86
	7	2,2	36	1 372	107 267	66
	8	2,0	202	1 480	603 899	80
	9	2,1	362	1 520	1 150 002	93
	10	2,0	1 307	1 411	3 743 679	87
<b>IMPORTANCE de 1 à 3</b>	1	2,3	41	1 121	103 769	43
	2	2,6	73	856	161 882	50
	3	2,0	52	1 194	124 317	58
	4	2,0	95	1 062	205 669	59
	5	2,0	115	1 214	272 240	62
	6	2,0	26	1 322	69 802	68
	7	2,0	59	1 153	139 481	60
	8	1,9	356	1 192	814 756	67
	9	2,0	625	1 230	1 499 063	75
	10	2,0	2 424	1 035	4 917 326	66
<b>IMPORTANCE de 1 à 4</b>	1	2,1	67	1 000	137 145	39
	2	2,2	159	809	276 557	48
	3	2,0	92	1 005	181 813	52
	4	2,0	157	946	292 588	54
	5	1,9	185	1 051	363 593	58
	6	1,9	64	998	120 907	57
	7	2,0	106	984	205 479	55
	8	1,9	659	993	1 236 791	59
	9	1,9	1 124	1 021	2 203 400	64
	10	1,9	4 835	895	8 395 011	58
<b>IMPORTANCE de 1 à 5</b>	1	1,6	161	880	232 355	36
	2	1,7	439	777	586 697	48
	3	1,8	247	856	374 235	47
	4	1,8	423	830	624 940	50
	5	1,8	485	867	773 711	53
	6	1,8	215	827	323 605	52
	7	1,8	313	837	471 566	52
	8	1,8	2 038	833	3 038 801	53
	9	1,7	3 497	846	5 118 139	55
	10	1,6	14 056	810	18 444 283	53

## REFERENCES

1. Ortuzar J., Willumsen L.G., (2011) ; Modelling transport 4th edition ; John Wiley & Son Ltd, Chichester, United Kingdom
2. Buisson C., Lesort J.B., (2010) ; Comprendre le trafic routier, Méthodes et calculs ; Edition du Certu ; Avril 2010
3. Bureau of Public Roads (BPR), Highway Capacity Manual 2000 (HCM 2000), 2000
4. Geroliminis, N., Daganzo, C.F., (2008) ; Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: some experimental findings ; Transportation Research Part B Methodology : 42 (9), 759–770 ; November 2008
5. Ji Y., Daamen W., Hoogendoorn S., Hoogendoorn-Lanser S., Qian X., (2010) ; Investigating the shape of the macroscopic fundamental diagram using simulation Data ; Journal of the Transportation Research Board 2161 ; Washington D.C, pp. 40–48
6. Spiess H., (1990) ; Technical note – Conical volume-delay functions ; Transp. Sci. 24 (2), 153–158
7. Akçelik R., (1991) ; Travel time functions for transport planning ; Australian Road Research, pp. 49–59, 21-3 ; September 1991
8. Certu (2008) ; Les temps de parcours, Estimation, diffusion et approche multimodale ; Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques ; Avril 2008 (<http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/0968894.pdf>)
9. Setra (2010) ; Calage et validation des modèles de trafic ; Techniques appliquées à l'affectation routière interurbaine ; Juillet 2010 (<http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1056369.pdf>)
10. Certu (2003) ; Modélisation des déplacements urbains de voyageurs, Guide des pratiques ; Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques ; Mars 2003 ([http://memoires.scd.univ-tours.fr/EPU\\_DA/2003\\_ebook\\_Certu-mdu.pdf](http://memoires.scd.univ-tours.fr/EPU_DA/2003_ebook_Certu-mdu.pdf))
11. DDE du Rhône (2006) ; Enquête Cordon de l'agglomération lyonnaise ; Rapport de synthèse des résultats ; Juin 2006 ([http://www.rhone.gouv.fr/content/download/4688/27781/file/synthese\\_resultats\\_version\\_finale\\_cle0192c5.pdf](http://www.rhone.gouv.fr/content/download/4688/27781/file/synthese_resultats_version_finale_cle0192c5.pdf))
12. BD TOPO descriptif de contenu (Version 2.1) ; Institut Géographique National ; Octobre 2011
13. Cerema (2014) ; Guide de transport marchandises ; Guide méthodologique, Transport de marchandises, Caractéristiques de l'offre et capacité des modes de transport; V3-2014
14. Nicolas J.P., Bonnel P., Cabrera J., Godinot C., Homocianu M., Routhier J. L., Toilier F., Zuccarello Ph. (2009) ; Simuler les Mobilités pour une Agglomération Durable ; Rapport final du projet Simbad ; LAET-ENTPE ; Juillet 2009
15. CETE de Lyon (2011) ; Observation des conditions de circulation sur Lyon en 2010 ; Direction Départementale des Territoires du Rhône, Mission Déplacements ; CETE69\_R2\_DM\_Modele\_Rapport\_Rev1 ; Août 2011 ([http://www.rhone.gouv.fr/content/download/4623/27446/file/Observatoire\\_DDT69\\_rapport\\_2010\\_v5\\_cle5f1b16.pdf](http://www.rhone.gouv.fr/content/download/4623/27446/file/Observatoire_DDT69_rapport_2010_v5_cle5f1b16.pdf))
16. Beziat A., Koning M., Toilier F. (2017) ; Marginal congestion costs in the case of multi-class traffic: A macroscopic assessment for the Paris region ; Transport Policy 60 (2017) P87-98

17. AW Thierno (2008) ; Modèle pour le zonage et la génération des déplacements, Application au cas francilien à partir du modèle de la DREIF ; ENPC-LVMT ; December 2008
18. Nielsen, O.A., Jørgensen, R.M. (2008) ; Estimation of speed-flow and flow-density relations on the motorway network in the greater Copenhagen region ; IET Intelligent Transport Systems 2, 120-131
19. Fagnant D.J., Kockelman K.M. (2012) ; Outcome of transportation projects under uncertainty ; Transportation research records 2303 ; 89-98
20. Yongtaek LIM, Doohee NAM, Changho CHOI, Mingu KANG, (2007) ; A Parameter Calibration Technique for Travel Cost Function in Traffic Assignment ; Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol. 7, 2007
21. VISUM 12, Bases Théoriques issue de PTV vision ; version 20.1.12 FR F
22. PERITHEL (2018) ; Dir Ch. Raux, Programme ADEME APR MODEVAL URBA ; Formes (péri)urbaines, transport, habitat, énergie, environnement, localisation : un bilan prospectif, Juin 2018

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Nombre de segment du réseau routier selon la Nature et l'Importance .....	7
Tableau 2 : Vitesse à vide selon la nature et l'importance de route .....	11
Tableau 3 : Capacité routière selon le type de route et le nombre de voies - Source Cerema : guide du transport marchandises [12] .....	13
Tableau 4 : Capacité routière par voie selon l'attribut « Nature » (BDTOPO) .....	14
Tableau 5 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones – Découpage V1C4 .....	25
Tableau 6 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones – Découpage V2C4 .....	25
Tableau 7 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones – Découpage V3R5 .....	25
Tableau 8 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones – Découpage V4D10 .....	26
Tableau 9 : Capacité totale du réseau (uvp.km/h) au niveau des macro zones – Découpage V5C10 .....	26
Tableau 10 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) - Découpage V1C4 .....	28
Tableau 11 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) - Découpage V2C4 .....	28
Tableau 12 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) – Découpage V3R5 .....	28
Tableau 13 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) - Découpage_V4D10 .....	29
Tableau 14 : Capacité et flux pondéré (uvp.km/h) – Découpage V5C10 .....	29
Tableau 15 : Statistiques descriptives des données de 133 OD – Découpage V1C4 .....	30
Tableau 16 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V1C4 .....	33
Tableau 17 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V2C4 .....	33
Tableau 18 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V3R5 .....	34
Tableau 19 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V4D10 .....	34
Tableau 20 : Résultats les modèles d'estimation de tps selon FCR – V5C10 .....	35
Tableau 21 : Temps de parcours en TC .....	48
Tableau 22 : Caractéristiques du réseau – Découpage V1C4 .....	54
Tableau 23 : Caractéristique du réseau – Découpage V2C4 .....	54
Tableau 24 : Caractéristique du réseau – Découpage V3R5 .....	55
Tableau 25 : Caractéristique du réseau – Découpage V4D10 .....	55
Tableau 26 : Caractéristique du réseau – Découpage V5C10 .....	56

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Réseau routier-distinction par la Nature ; territoire EMD Lyon 2006 - Source BD TOPO .....	8
Figure 2 : Réseau routier, distinction par l'importance ; territoire EMD Lyon 2006 - Source BD TOPO .....	9
Figure 3 : Tronçons autoroutiers avec une vitesse à vide de 130 km/h ; source données OSM .....	12
Figure 4 : Carte de la vitesse à vide sur les grands axes (Autoroute et VRU) .....	13
Figure 5 : Synthèse des temps Waze sur 24h pour un OD .....	16
Figure 6 : Comparaison des temps (minute) entre Waze et Google Maps .....	17
Figure 7 : Aire délimitée par le cordon (lignes bleues = Limites des SCOT) – Source rapport de synthèse des résultats d'Enquête Cordon de l'agglomération lyonnaise [11] .....	19
Figure 8 : Densité communale de population – périmètre EMD2006 .....	22
Figure 9 : Densité communale d'emplois – périmètre EMD2006 .....	23
Figure 10 : Découpage V1C4, concentrique sur le carré métropolitain de Lyon.....	24
Figure 11 : Schéma de la répartition de l'offre/la demande en Macro Zone.....	27
Figure 12 : Graphique de l'écart entre le temps de parcours en heure de pointe et à vide en fonction du FCR - découpage V1C4 en niveau d'importance 5 .....	31
Figure 13 : Graphique de l'écart entre le temps de parcours en heure de pointe et à vide en fonction du temps de parcours à vide - découpage V1C4 en niveau d'importance 5 .....	32
Figure 14 : Intervalles de confiance des coefficients de FCR selon différents découpages ....	36
Figure 15 : Schéma du réseau routier en centre de l'agglomération lyonnaise – tous niveaux d'importances .....	37
Figure 16 : Graphique des résidus .....	38
Figure 17 : Q-Q plot .....	39
Figure 18 : Graphique du temps de parcours observées vs du temps de parcours estimées en minutes – découpage V1C4 en niveau d'importance 5 .....	40
Figure 19 : Graphique des erreurs du modèle vs le temps de parcours simulés vs en minutes – découpage V1C4 en niveau d'importance 5 .....	41
Figure 20 : Dispersion de l'écart entre le temps EMD et le temps Waze .....	42
Figure 21 : Schéma du réseau de transport en commun d'agglomération Lyonnaise – Source (Data.GrandLyon.com) .....	45
Figure 22 : Périmètre TCL sur le territoire EMD2006.....	47
Figure 23 : Découpage V2C4, concentrique .....	50
Figure 24 : Découpage V3R5, radial.....	51
Figure 25 : Découpage V4D10.....	52
Figure 26 : Découpage V5C10.....	53



## TABLE DES MATIERES

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>3</b>
<b>1 LA MODELISATION DES CONDITIONS DE TRAFIC ROUTIER.....</b>	<b>4</b>
<b>1.1 Méthode.....</b>	<b>4</b>
1.1.1 Simulation et modèle d'affectation .....	4
1.1.2 Courbes débit-vitesse .....	4
<b>1.2 Données.....</b>	<b>6</b>
1.2.1 L'offre de capacité routière .....	6
1.2.1.1 Réseau de transport routier.....	6
a) Paramètre usuel pour chaque type de route.....	7
b) Nature .....	7
c) Importance.....	8
d) Nombre de voies .....	10
e) Longueur de route .....	10
1.2.1.2 Caractéristiques de l'offre de transport routier.....	10
a) Vitesse à vide par type de route .....	10
b) Capacité.....	13
1.2.1.3 Calculs de la capacité routière et de la vitesse à vide .....	14
1.2.1.4 Temps de parcours observés en charge .....	14
a) Sélection des OD .....	15
b) Temps de parcours Waze .....	15
c) Comparaison avec les données de Google Maps .....	16
1.2.2 Demande de déplacements via le réseau routier .....	17
1.2.2.1 Flux OD.....	17
1.2.2.2 Enquête cordon .....	18
1.2.2.3 Transport de marchandises.....	19
1.2.3 Le territoire d'étude et son découpage .....	20
1.2.3.1 Graphe de matrice OD.....	20
1.2.3.2 Découpage du territoire d'étude .....	21
a) Macro zonage .....	23
b) Pondération .....	26
<b>1.3 Résultats .....</b>	<b>30</b>
1.3.1 Description des données.....	30
1.3.2 Les modèles de régression.....	32
1.3.3 Test de la robustesse.....	35
1.3.4 Analyse des résidus .....	37
1.3.5 Analyse des résultats .....	39
<b>1.4 Validation .....</b>	<b>41</b>
<b>1.5 Conclusion.....</b>	<b>43</b>
<b>2 L'OFFRE DU RESEAU DE TRANSPORT EN COMMUN.....</b>	<b>44</b>
<b>2.1 Données.....</b>	<b>44</b>
<b>2.2 Hypothèses et méthode de calcul.....</b>	<b>45</b>
<b>2.3 Résultats .....</b>	<b>46</b>
<b>2.4 Conclusion.....</b>	<b>48</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>49</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>50</b>

<b>REFERENCES .....</b>	<b>58</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX .....</b>	<b>60</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>61</b>