



POLYTECH[®]
TOURS
Département
Aménagement et Environnement

université
de **TOURS**

CITERES
UMR 7324
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe DATE
Dynamiques et Actions
Territoriales et
Environnementales

Projet de Fin d'Etudes

LA PIETONISATION DU CENTRE-VILLE DE TOURS ET SES CONSEQUENCES

Raffinement et calage du modèle



2017-2018

Directeur de recherche
Baptiste Hervé

Lamirault Valentin

Avertissement

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Table des matières

Avertissement	2
Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement	3
Introduction	8
1 Génération et distribution des déplacements	12
1.1 Facteur d'attractivité	13
1.2 Calage du frein au déplacement	14
1.2.1 Agrégation des flux par commune	14
1.2.2 Calage par régression linéaire	15
1.3 Intégration d'un nouveau motif de déplacements :	18
1.4 De la génération/distribution à l'affectation des déplacements	19
2 Affectation des flux sur le réseau	21
2.1 Recherche sur la capacité d'une voie et modification du modèle d'affectation	21
2.1.1 Calcul de la capacité théorique et équations fondamentales	21
2.1.1.1 Concentration maximale	22
2.1.1.2 Équation fondamentale du trafic	22
2.1.1.3 Relation entre vitesse et concentration	22
2.1.1.4 Relation entre concentration et débit	23
2.1.1.5 Capacité des voies	24
2.1.1.6 Relation entre débit et vitesse	27
2.1.2 Modélisation de la capacité dans le projet	28
2.1.2.1 Initialisation de l'affectation	28
2.1.2.2 Algorithme d'affectation	29
2.1.2.3 Itération de l'affectation	30
2.1.2.4 Limites de l'affectation	30
2.2 Résultats de l'affectation	31
2.2.1 Modélisation des flux avant piétonisation du secteur sauvegardé	32
2.2.2 Modélisation des flux après piétonisation du secteur sauvegardé	36
2.2.3 Comparaison des résultats	38
2.2.3.1 Comparaison avec les comptages routiers	38
2.2.3.2 Comparaison des situations avant et après piétonisation	40
3 Modélisation du stationnement	42
3.1 L'offre de stationnement	42
3.2 Occupation des stationnements avant piétonisation	45
3.2.1 Découpage de la zone d'étude en quatre "bassins" et affectation des parkings-relais	48
3.2.2 Utilisation des emplacements de stationnement par les résidents	49
3.2.3 Taux d'occupation des stationnements.	49

3.3	Occupation des stationnements après piétonisation et nouveaux parkings-relais	50
3.3.1	Modification de l'offre de stationnement suite à la piétonisation	50
3.3.2	Possibilités de reports du stationnement résidentiel	52
3.3.3	Nouveau dimensionnement des parkings relais	53
Conclusion		55
Bibliographie		58
Annexe 1 : données des effectifs de l'enseignement supérieur et des lycées		60
Annexe 2 : Cartes complémentaires		62
Annexe 3 : Logiciel de modélisation		67

Table des figures

1	Carte de la zone piétonne dans l'agglomération tourangelles	9
1.1	Schéma expliquant le processus d'agrégation des flux	15
1.2	Graphique représentant une modélisation "idéale"	16
1.3	Graphique représentant l'évolution du coefficient de détermination en fonction du β	17
1.4	Graphique représentant le nuage de point obtenu pour une valeur de β de 0,6	18
2.1	Schéma représentant l'évolution de la vitesse en fonction de la concentration	23
2.2	Schéma représentant l'évolution du débit en fonction de la concentration	24
2.3	Carte de la capacité théorique des routes sur Tours Métropole	25
2.4	Schéma représentant la fréquentation du réseau routier au cours d'une journée	26
2.5	Schéma représentant l'évolution de la vitesse en fonction du débit (courbe débit vitesse)	28
2.6	Carte comparant les flux générés avant piétonisation pour les itération 1 et 2	32
2.7	Carte comparant les flux générés avant piétonisation pour les itération 2 et 3	33
2.8	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la troisième itération avant piétonisation	34
2.9	Carte représentant les flux affectés au semestre 9 avant piétonisation	35
2.10	Carte comparant les flux générés après piétonisation pour les itération 1 et 2	36
2.11	Carte comparant les flux générés après piétonisation pour les itération 2 et 3	37
2.12	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la troisième itération après piétonisation	37
2.13	Carte représentant les flux affectés au semestre 9 après piétonisation	38
2.14	Graphique comparant les flux affectés sur le réseau avec les comptages routiers	39
2.15	Carte comparant les flux générés avant et après piétonisation	40
3.1	Carte de l'offre de stationnement sur la zone centrale	44
3.2	Carte de l'offre de stationnement en parkings-relais sur la métropole de Tours	45
3.3	Logigramme de l'évaluation de l'occupation des stationnements	46
3.4	Détail des variables et relation du logigramme de l'évaluation de l'occupation des stationnements	47
3.5	Carte représentant les différents bassins de provenance des flux	48
3.6	Carte de l'offre de stationnement sur la zone centrale	50
3.7	Carte de l'offre de stationnement sur la zone centrale	51
3.8	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la première itération avant piétonisation	62
3.9	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la deuxième itération avant piétonisation	63
3.10	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la troisième itération avant piétonisation	63
3.11	Carte représentant les flux affectés au semestre 9 avant piétonisation	64
3.12	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la première itération après piétonisation	64
3.13	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la deuxième itération après piétonisation	65
3.14	Carte représentant les flux affectés à l'issu de la troisième itération après piétonisation	65
3.15	Carte représentant les flux affectés au semestre 9 après piétonisation	66
3.16	Interface de l'application "modèle à 4 étapes"	67

Liste des tableaux

2.1	Tableau exprimant en pourcentage la réduction de la capacité en fonction de la largeur	25
3.1	Tableau du diagnostic de l'offre de stationnement sur trois IRIS du centre de Tours . .	43
3.2	Tableau de l'évolution du nombre stationnement avant et après piétonisation	51
3.3	Tableau de l'évolution du nombre stationnement avant et après piétonisation	52
3.4	Tableau de l'évolution du nombre stationnements avant et après piétonisation	53
3.5	Tableau des effectifs de l'enseignement supérieur	60
3.6	Tableau des effectifs des lycées	61

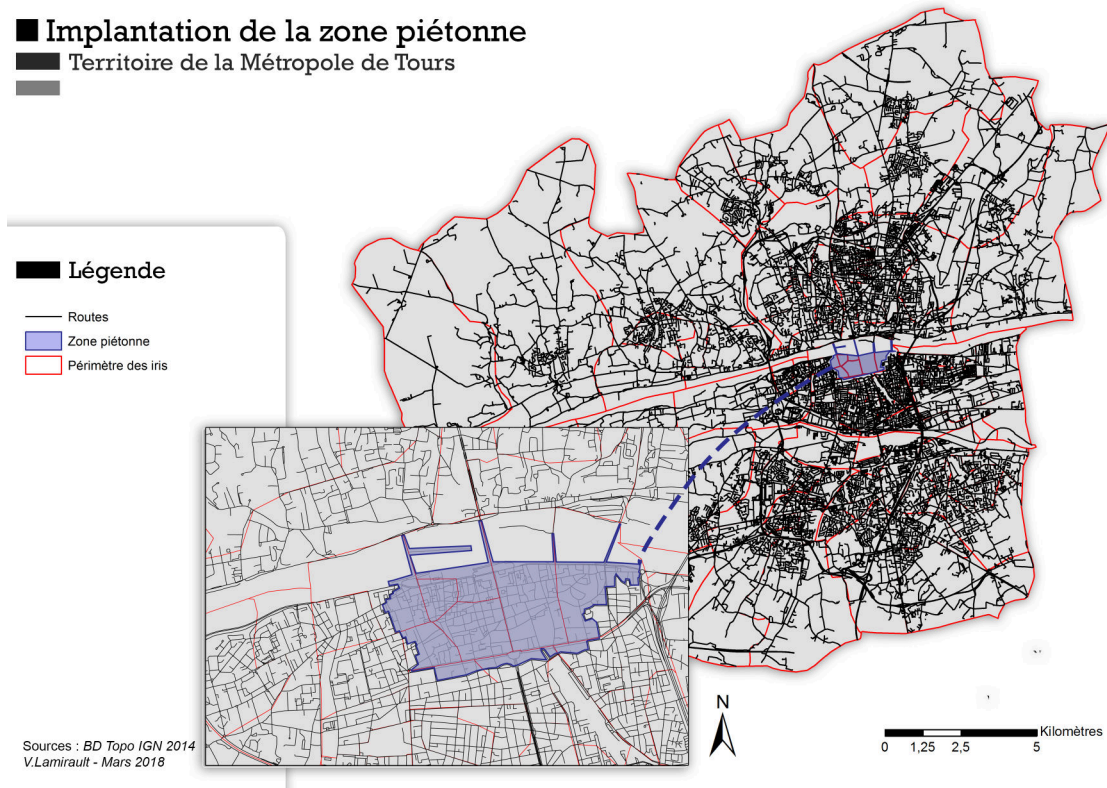
Introduction

D'une ville majoritairement dédiée aux piétons au XIX^{eme} siècle, on est passé, durant le XX^{eme} siècle, à une ville dédiée à l'automobile. L'émergence et la généralisation de ce mode de transport à profondément transformé les villes et la façon de les faire. Aujourd'hui, dans un contexte où l'on se préoccupe de plus en plus des nuisances et de la pollution et où l'espace devient de plus en plus contraint, la place de la voiture en ville est reconsidérée. Ainsi, de nombreuses villes réfléchissent à l'implantation de vastes secteurs réservés aux piétons (et plus généralement aux modes doux) en leur centre (Blanloeil F. Lamirault V., PFE Semestre 9, 2017).

Ce processus, appelé piétonisation, prend diverses formes : piétonisation saisonnière ou ponctuelle, piétonisation zonale, piétonisation linéaire, ou partage modale. Le premier type consiste à rendre piéton une rue ou un secteur d'une ville de manière ponctuelle ou selon la saison. Ce type d'initiative se retrouve à l'occasion des journées sans voiture ou durant les périodes estivales dans les stations balnéaires. Une opération telle que Paris plage fait également partie de cette catégorie de piétonisation. La piétonisation linéaire consiste à rendre piéton tout ou une partie d'une rue comme ce fut le cas à Bordeaux avec la rue Sainte Catherine dont l'aménagement en faveur des piétons a débuté en 1975. La piétonisation zonale, repose sur le même principe que la piétonisation linéaire sauf qu'elle n'est pas réduite qu'à une seule rue. Ce peut être tout un quartier qui est concerné ou plus modestement que quelques voies. Les exemples ne manquent pas : Strasbourg, Nantes, Angers, Tours ou encore Montpellier possèdent des zones piétonnes plus ou moins vastes et qui se sont constituées au fil des ans. Enfin, le partage modale n'est pas vraiment un "acte" de piétonisation mais amène à reconsidérer la place de chaque mode de transport. Cette opération peut être réalisée à l'occasion du réaménagement d'une rue ou au moment de l'implantation d'un transport en commun en site propre (Bus à haut niveau de service ou tramway). L'ensemble de ces dispositifs amènent également à reconsidérer les espaces de stationnement. Lorsqu'on piétonnise une rue ou une zone, les parkings sont très souvent supprimés. De même lorsqu'un transport en commun en site propre est créé, celui-ci s'accompagne souvent de la création de parkings-relais. La voiture ayant une grande importance en ville, tout aménagement de la voirie (dans notre cas soit la piétonisation, soit l'implantation d'un transport en commun en site propre) implique de se questionner sur le stationnement.

L'implantation d'une zone piétonne, quel que soit sa taille a des impacts sur l'ensemble des mobilités. Le projet de fin d'étude réalisé au semestre 9 (Blanloeil F. Lamirault V., PFE Semestre 9, 2017) avait pour but d'évaluer une partie des conséquences de l'implantation d'une grande zone piétonne sur le centre-ville de Tours. Cette zone correspondait à peu près au secteur sauvegardé de la ville (voir carte 1).

FIGURE 1 – Carte de la zone piétonne dans l'agglomération tourangelle



L'étude a porté sur un seul mode de déplacement (l'automobile) et pour un seul motif (déplacements domicile-travail). L'objectif était de déterminer quels seraient les effets de la piétonisation du centre-ville de Tours sur les déplacements en voiture pour le motif-domicile travail. Avant de mesurer les effets de cette piétonisation, il a d'abord fallu modéliser la situation actuelle. Pour se faire, un modèle à quatre étapes a été utilisé. Celui-ci fait se succéder de manière séquentielle les étapes de génération de la demande de déplacements, de distribution des déplacements, de choix modal et d'affectation des déplacements. Comme seuls les déplacements en voiture ont été étudiés, l'étape de choix modale n'a pas été traitée.

Les étapes de génération et de distribution ont été traitées simultanément grâce au modèle de Huff (ce modèle est décrit au début de la partie 1). Bien qu'utilisé initialement pour déterminer l'attractivité d'une zone commerciale par rapport à une autre, ce modèle peut aussi servir à générer et à distribuer la demande de transport. Cette première étape de modélisation se base sur plusieurs hypothèses et a fait apparaître quelques limites. Tout d'abord, le choix a été fait de découper le territoire d'étude (la métropole de Tours) selon les IRIS et d'agréger l'ensemble des caractéristiques de ces zones au centre de celles-ci. Cela implique que les déplacements internes ne soient pas pris en compte. Certaines données du modèle de Huff, non disponibles à l'échelle des IRIS ont été distribuées de manière proportionnelle à d'autres données créant une situation parfois loin de la réalité. Un des paramètres du modèle de Huff (le frein au déplacement notamment) a été défini de manière arbitraire en considérant qu'il n'avait pas d'influence sur les résultats. Enfin, dans l'ensemble de l'étude, une

distance dite "temporelle" a été utilisée pour caractériser chaque arc du réseau. Cette grandeur est fonction de la distance kilométrique et de la vitesse maximale autorisée.

L'étape suivante, l'affectation des flux sur le réseau, a été réalisée selon le mode "tout ou rien". Cela signifie que dès lors qu'un chemin existe entre une origine et une destination, les flux sont affectés sur ce chemin. S'il n'existe pas de chemin alors le flux en question devient un flux résiduel. Cette affectation ne prend donc pas en compte la capacité de chaque tronçon de route ni le fait que le choix du chemin puisse être influencé par l'intensité du flux. Enfin, les flux ont été affectés uniquement dans un sens : depuis le domicile vers le lieu de travail. Le trajet retour n'a pas été modélisé. Cette affectation a été réalisée à deux reprises : une première fois afin de modéliser la situation actuelle et une seconde fois pour modéliser la situation après piétonisation. Les résultats font apparaître un certain report d'itinéraires entre les deux simulations. La vaste zone piétonne implémentée dans le cœur de l'agglomération implique de trouver d'autres itinéraires que ceux utilisés précédemment. Après piétonisation, de nombreux flux n'ont pas pu être affectés (il existe des flux résiduels). Ceux-ci correspondent aux flux partant ou allant vers la zone piétonnisée. Ces flux résiduels sont ensuite utilisés pour dimensionner des parkings-relais.

Comme cela a été évoqué précédemment, piétonniser une grande zone en centre-ville implique de se poser des questions sur l'ensemble des mobilités et sur les effets de la mobilité en règle général. Il est ainsi possible d'étudier les reports de gaz à effet de serre ou encore le stationnement comme ce fut le cas pour le projet du semestre 9. La modélisation du stationnement se limite ici à étudier les flux résiduels, à les répartir selon quatre grands secteurs et à dimensionner une nouvelle offre de parking relais. Cette modélisation repose sur l'hypothèse que les personnes n'ayant pas pu rejoindre le secteur sauvegardé du fait de sa piétonisation utilisent des parkings-relais pour stationner leurs véhicules et continuent leur trajet en transport en commun. Ainsi, les parkings-relais existant ont pu être redimensionnés pour accueillir le surplus de véhicules. De nouveaux ont également été positionnés à l'ouest et à l'est de l'agglomération en lien avec les futurs projets de transports en commun en site propre. L'offre et l'utilisation actuelle du stationnement à la fois en parking-relais et en règle générale dans le centre de l'agglomération n'ont pas été étudiées.

Le présent projet se positionne dans la continuité de celui qui vient d'être brièvement présenté. Il s'agit à partir des limites et hypothèses relevées de proposer des pistes de raffinement et d'amélioration des modèles de génération et de distribution des flux, d'affectation des flux sur le réseau et de modélisation du stationnement. Ces pistes de raffinement peuvent être abordées à travers les trois questions suivantes. Une des principales limites évoquée pour l'étape de génération et de distribution des flux est le choix, quelque peu arbitraire du frein au déplacement. Quelle méthode employer pour caler le paramètre "frein au déplacement" du modèle de Huff ? L'étape d'affectation réalisée selon le mode « tout ou rien » ignore la capacité de chaque tronçon de route. Cette étape ne prend également pas en compte les effets du trafic sur la vitesse réellement pratiquée sur chaque tronçon. Quels sont donc les relations permettant de définir la capacité et liant cette variable à la vitesse et aux flux ? Enfin, la modélisation du stationnement ne se préoccupe pas de l'offre et de l'utilisation actuelle de celle-ci. Comment évaluer l'offre et l'utilisation du stationnement dans une zone correspondant au cœur d'une agglomération ?

La suite de ce dossier se décompose en trois parties. Dans un premier temps, nous proposons des pistes de raffinement du modèle présenté ci-dessus. Pour se faire, nous passons en revue les différentes phases du modèle à quatre étapes. La première partie se concentre sur les étapes de génération et de distribution des déplacements. À la lumière d'auteurs tel que Patrick Bonnel, nous décrivons une méthode pour caler les paramètres du modèle de génération et de distribution des flux (section 1.2). Nous proposons également d'intégrer un nouveau motif de déplacement à notre étude (section 1.3). Tout comme pour la modélisation réalisée au semestre 9, l'étape de choix modal ne sera pas abordée. Dans un second temps (partie 2), nous traitons de l'étape d'affectation. Après avoir réalisé une revue des différentes relations liant la vitesse, le débit et la concentration (section 2.1), nous exposons une nouvelle méthode d'affectation des flux sur le réseau (section 2.1.2). Les résultats de cette affectation sont ensuite présentés et analysés (section 2.2). Enfin, dans un dernier temps (partie 3), nous traitons de la problématique du stationnement en tentant de quantifier l'offre (section 3.1) et son utilisation (section 3.2). Nous examinons également les conséquences de la piétonisation du centre-ville de Tours sur cette offre (section 3.3).

Génération et distribution des déplacements

Cette première partie se focalise sur les étapes de génération et de distribution des déplacements. Dans un premier temps, elle se propose de donner un éclairage théorique sur ces deux étapes. Ensuite, différentes pistes de raffinement du modèle sont présentées.

Selon Patrick Bonnel (HDR Chapitre 6, 2001), l'étape de génération a pour but de déterminer le nombre de déplacements réalisés par la population d'une zone d'étude. Il distingue les déplacements émis des déplacements attirés. Les premiers sont les déplacements ayant pour origine la zone d'étude et les seconds sont ceux l'ayant pour destination. L'étape de génération permet de déterminer pour chaque zone le nombre de déplacements émis et le nombre de déplacements attirés. Pour réaliser cette étape plusieurs données peuvent être utilisées en tant que "variable explicative". Par exemple, pour les variables expliquant les émissions de déplacements, il est possible de se baser sur le revenu des ménages, le taux de motorisation des ménages c'est-à-dire le nombre de voiture par ménage, le nombre de personnes, la répartition de la population selon les classes d'âge ... Pour les variables expliquant l'attraction de déplacements, des indicateurs tel que le nombre d'emplois, le nombre de places dans les écoles, le nombre de ménages ou d'individus dans la zone peuvent être utilisés. Que ce soit l'émission ou l'attraction des déplacements, ces variables sont choisis en fonction du motif de déplacement. Dans notre cas, nous avons utilisé la population active comme variable expliquant l'émission de déplacements liés au travail et le nombre d'emplois en tant que variable expliquant l'attraction de déplacements liés au travail.

Toujours selon Patrick Bonnel (HDR Chapitre 7, 2001), l'étape de distribution correspond au choix de la destination du déplacement de l'individu. Cette étape permet de déterminer la matrice origine-destination. Généralement, elle arrive après l'étape de génération. Elle a d'ailleurs besoin des résultats de la première étape pour calculer la matrice origine-destination.

Les modèles de distribution se basent sur le coût des déplacements (ou coût généralisé). Ce coût peut être déterminé de diverses manières de la plus simple en considérant que le coût équivaut à la distance à une définition plus complexe incluant le temps de déplacement, le coût perçu en fonction de l'individu et la valeur que l'individu attribue à son temps (Bonnel P., HDR Chapitre 5, 2001). Dans notre modèle se coût généralisé est réduit au temps de parcours sur le réseau entre une origine et une destination (Blanloeil F., Lamirault V., PFE Semestre 9, 2017). Quel que soit le modèle de distribution choisit, le calage se fait en ajustant les inconnus du modèle mathématique de manière qu'il soit capable de reproduire la réalité (Bonnel P., HDR Chapitre 2, 2001). Ce processus fait l'objet d'une section dans la présente partie.

Dans notre cas, le modèle de Huff est ici utilisé pour générer et distribuer les flux entre chaque

couple origine-destination. Il y a donc agrégation de ces deux étapes en une seule. Le modèle de Huff, est un modèle probabiliste surtout utilisé pour déterminer l'attractivité des centre-commerciaux les uns par rapport aux autres (Huff, 1962). Dans le cadre des déplacements depuis le domicile vers le lieu de travail, ce modèle est utilisé pour déterminer l'attractivité d'un IRIS par rapport à l'autre. Ce modèle peut être résumé par la formule suivante :

$$t_{ij} = P_i \times \frac{\frac{M_j}{d_{ij}^\beta}}{\sum_k \frac{M_k}{d_{ik}^\beta}} \quad (1.1)$$

Avec :

- i et j les indices des nœuds origines et destinations ;
- t_{ij} : le flux de i vers j ;
- P_i : la population vivant en i (ici la population active vivant en i) ;
- M_j : le facteur d'attractivité (ici le nombre d'emplois dans la zone j) ;
- d_{ij} : la distance entre i et j ;
- β : le frein sur la distance.

La suite de cette partie se propose de faire un état des lieux des limites de la modélisation réalisée au semestre 9 (Blanloeil F., Lamirault V., PFE Semestre 9, 2017) et de proposer des pistes de raffinement pour chacune d'elles. Il s'agit donc dans un premier temps de traiter le problème de la distribution du facteur d'attractivité sur les IRIS. Puis, dans un second de présenter une méthode de calage du modèle et enfin dans un dernier temps d'intégrer un nouveau motif de déplacement.

1.1. Facteur d'attractivité

Dans la modélisation réalisée précédemment, le facteur d'attractivité était distribué dans les IRIS en fonction du nombre d'actifs. Le nombre d'emplois, donnée utilisée comme facteur d'attractivité, n'est disponible qu'à l'échelle communale. Pour les distribuer sur les IRIS, nous avons émis l'hypothèse que les emplois se répartissent dans les mêmes proportions que les actifs. Cette méthode est problématique pour les IRIS de type zone industrielle (comme "Douets-Miletière 3" à Tours Nord) qui ne contiennent pas de logements et par extension aucun actif. En réalité, ils ne sont pas vides et on peut y trouver de nombreux emplois.

Nous avons donc décidé de distribuer les emplois d'une autre manière dans le but d'affiner notre modélisation. La nouvelle hypothèse étant que le nombre d'emplois est proportionnel aux surfaces bâties de l'IRIS. Nous avons donc calculé la surface au sol occupée par l'ensemble des bâtiments de chaque IRIS (grâce aux données du bâti différencié et du bâti industriel de l'IGN). Le nombre d'emplois dans chaque IRIS étant ensuite obtenu comme suit :

$$\text{Nombre d'emplois de l'IRIS} = \frac{\sum \text{Surfaces batis dans l'IRIS}}{\sum \text{Surfaces batis dans la commune}} \times \text{Nombre d'emplois de la commune} \quad (1.2)$$

Avec cette méthode de distribution, les zones plus densément bâties ont le plus d'emplois. Cette répartition permet de distribuer les emplois dans tous les IRIS alors que certains étaient exclus auparavant. Néanmoins, les chiffres peuvent être plus importants que dans la réalité pour certains IRIS ayant une vocation uniquement résidentielles. C'est le cas de ceux intégrant des grands ensembles

dans lesquels le nombre d'emplois est relativement faible. Cette limite était déjà présente avec la répartition des emplois en fonction du nombre d'actifs. Les IRIS de grands ensembles sont densément peuplés et ont donc un grand nombre d'actifs. Le nombre d'emplois était donc aussi important.

1.2. Calage du frein au déplacement

Lors de l'étape de génération, nous avons considéré un frein sur la distance (béta) égal à 1. Autrement dit, nous avons considéré que la distance influait dans les mêmes proportions que la localisation des emplois sur l'intensité et la distribution des flux. Dans le modèle utilisé pour cette nouvelle modélisation, nous proposons de déterminer cette valeur de béta en comparant les flux générés par notre modèle avec ceux disponibles auprès de l'Institut National de la Statistique et des Etudes économiques (INSEE). Ce processus nous permet d'effectuer un premier calage du modèle et de voir si nos résultats sont proches ou non de la réalité.

Pour se faire, nous avons généré les flux avec différentes valeurs de béta comprises entre 0,1 et 3 avec un pas de 0,1. La confrontation des flux ainsi simulés avec les flux domicile-travail disponibles auprès de l'INSEE permet de fixer une valeur du frein au déplacement.

Les données de l'INSEE sont issues de l'exploitation complémentaire du recensement de la population (ici le recensement 2014). D'après la documentation de l'institut les données issues du recensement permettent de mesurer un "nombre de migrants alternants et non un nombre de déplacement" (INSEE, 2010). Il s'agit donc de mesurer un nombre de personnes se rendant de manière régulière sur son lieu de travail. La fréquence de ce déplacement n'est pas prise en compte. Cela n'est ici pas un problème puisque le modèle de Huff ne fait lui aussi pas apparaître d'indications temporelles. Les questionnaires du recensement donnent la possibilité d'indiquer si le lieu de travail est dans la commune de résidence. Selon cette modalité, il existe donc des flux à l'intérieur de chaque commune.

1.2.1. Agrégation des flux par commune

Afin de pouvoir comparer les flux simulés avec ceux de l'INSEE, il est impératif de travailler sur les mêmes zones. Il faut également s'assurer que les flux simulés et ceux proposés par l'INSEE représentent bien la même chose. Les flux de l'INSEE sont disponibles à l'échelon communal, or de notre côté, nous travaillons à l'échelle des IRIS. Les flux simulés par notre modèle sont donc agrégés par commune afin de pouvoir les comparer avec les flux de l'INSEE. Ainsi, le flux d'une commune A vers une commune B est la somme des flux partant des IRIS de la commune A et allant vers les IRIS de la commune B.

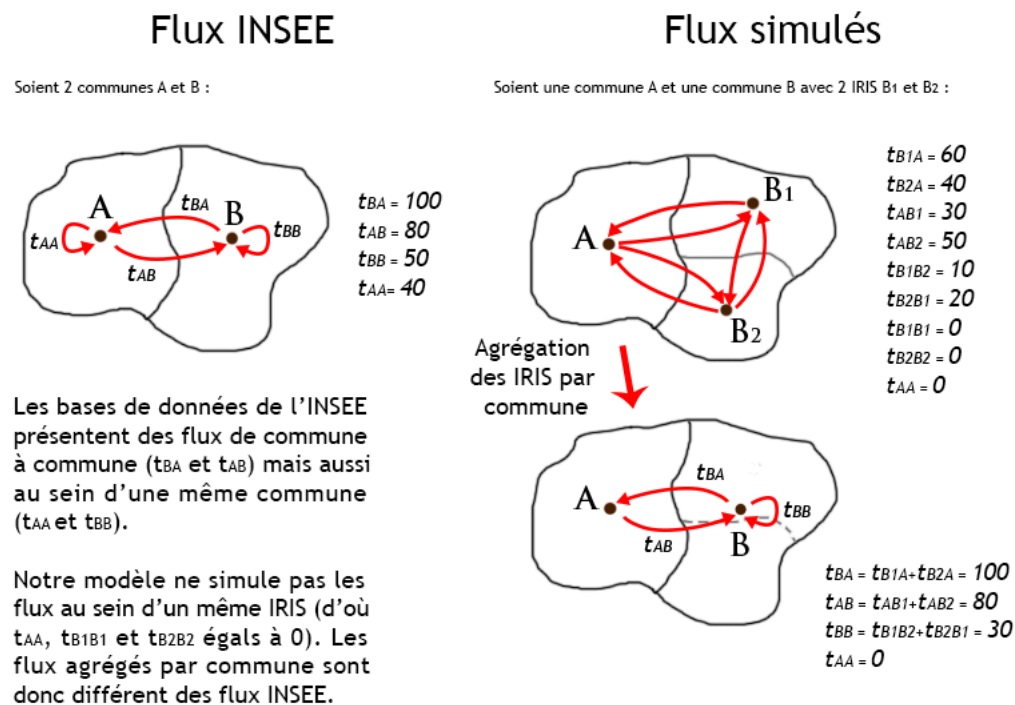
Cette méthode fait apparaître des flux d'une commune vers elle-même. En effet, le modèle de Huff a permis de simuler des flux d'un IRIS vers tous les autres. Par conséquent, pour chaque IRIS d'une commune, il existe des flux vers tous les autres IRIS de la commune. À l'issue de l'agrégation, toutes les communes irisées possèdent des flux internes.

Cependant, lors de notre simulation, nous n'avons pas simulé de flux d'un IRIS vers lui-même : la

distance d'une zone vers elle-même est nulle puisque les nœuds origine et destination sont confondus. Ainsi, selon que la commune est irisée ou non, il existe ou non des flux internes. Le schéma 1.1 explicite de manière simplifiée cette situation.

Finalement, les flux internes à une commune ne représentent pas la même chose pour l'INSEE et pour nous. Afin d'effectuer le calage, nous avons fait le choix de ne pas prendre en compte ces flux internes dans notre comparaison. Les flux simulés pouvant être considérés comme incomplets par rapport à ceux de l'INSEE et en particulier pour ceux partant d'une commune et allant vers elle-même.

FIGURE 1.1 – Schéma expliquant le processus d'agrégation des flux



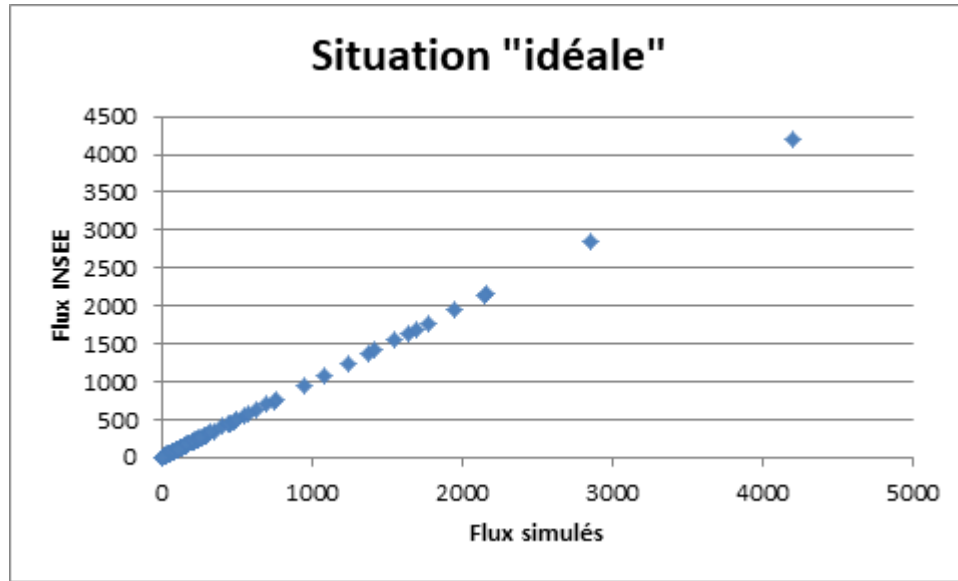
1.2.2. Calage par régression linéaire

Le calage du frein au déplacement est effectué grâce à une régression linéaire. Cette méthode doit nous permettre de trouver la valeur de bêta pour laquelle les flux simulés par notre modèle sont les plus proches de ceux observés par l'INSEE.

Soit X les flux simulés par le modèle de Huff et Y les flux disponibles auprès de l'INSEE. À chaque couple origine-destination est associé un point qui a pour coordonnées X et Y, respectivement les flux simulés et les flux INSEE. On représente X et Y dans un repère sous la forme d'un nuage de point. Dans la situation la plus idéale, c'est-à-dire dans laquelle les flux simulés correspondent exactement à ceux de l'INSEE, tous les points sont alignés sur une même droite ayant pour équation $Y=X$ (Voir

graphique 1.2 pour l'exemple). L'objectif du travail de calage est de tenter, en faisant varier le frein au déplacement (béta) de s'approcher le plus possible de cette situation.

FIGURE 1.2 – Graphique représentant une modélisation "idéale"



Pour se faire, pour chacune des valeurs de béta, nous avons déterminé la droite de régression c'est-à-dire la droite qui minimise la somme des distances verticales au carré entre les points et la droite (FIELD, 2014).

À partir de ce travail, il faut ensuite estimer quelle régression est la meilleure. En effet les équations des droites de régression seules ne suffisent pas. Deux séries de données peuvent avoir la même droite de régression et pourtant la dispersion des valeurs autour de celle-ci est complètement différente. Il nous faut donc calculer un indicateur qui évalue la fiabilité de la régression linéaire. Cet indicateur est le coefficient de détermination. Il est noté R^2 et il est obtenu grâce à la formule suivante :

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{k=1}^n ((X_i - E(X)) \times ((Y_i - E(Y)))}{\sigma_X \times \sigma_Y} \right)^2 \quad (1.3)$$

Avec :

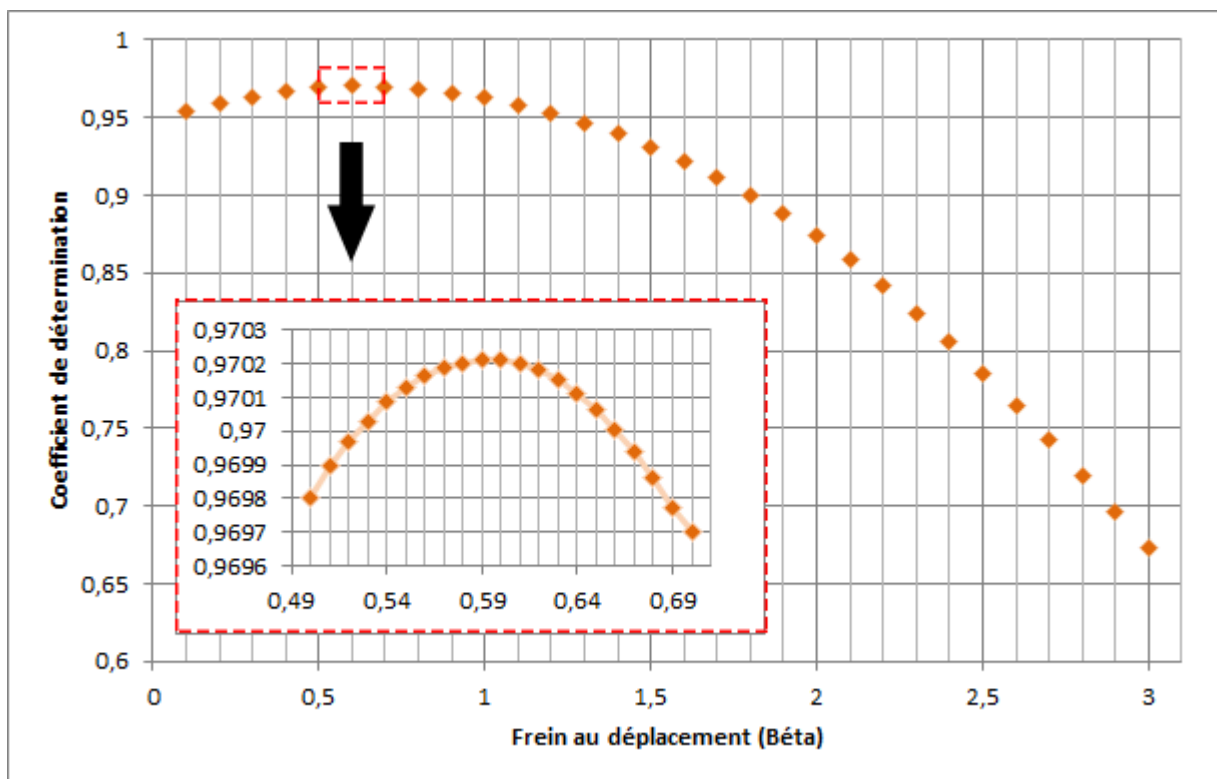
- $E(X)$ et $E(Y)$ respectivement les moyennes des variables X et Y ;
- σ_X et σ_Y respectivement les écarts types des variables X et Y.

Plus ce coefficient est important (i.e. proche de 1), plus le caractère prédictif du modèle est valable. Dans le cas contraire, plus il est proche de 0, moins la régression est fiable. Dans notre cas, nous recherchons la valeur de béta pour laquelle ce coefficient est le plus grand.

La simulation a été faite en prenant des valeurs de béta comprises entre 0,1 et 3 avec un pas de 0,1. Les résultats font apparaître une valeur maximale du coefficient de détermination pour $\beta = 0,6$. Pour affiner la valeur de béta, une nouvelle simulation a été réalisée avec des valeurs de béta comprises entre 0,5 et 0,7 avec un pas de 0,01. Là encore la valeur maximale du coefficient de détermination est de nouveau obtenu pour $\beta = 0,6$. Le graphique 1.3 représente l'évolution des valeurs du coefficient

de détermination en fonction de la valeur du frein au déplacement.

FIGURE 1.3 – Graphique représentant l'évolution du coefficient de détermination en fonction du bêta



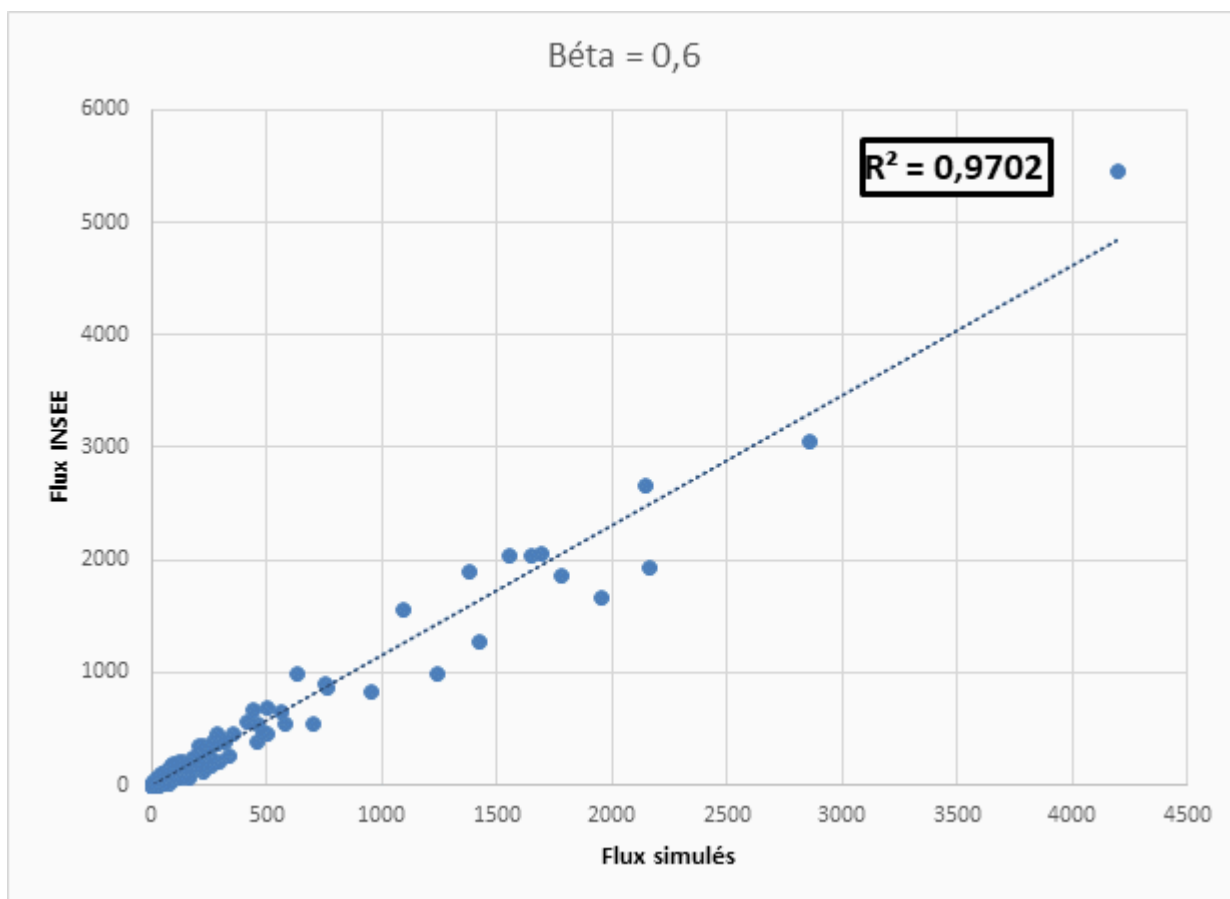
Nous constatons que les variations du coefficient de détermination sont assez faibles. Ce coefficient est également assez élevé : généralement un modèle de régression linéaire est considéré comme fiable dès que le coefficient de détermination est supérieur à 0,5 (FIELD, 2014).

Le graphique 1.4 représente le nuage de points ainsi que la valeur du coefficient de détermination pour un frein au déplacement égal à 0,6.

Finalement, le frein au déplacement obtenu est très faible. Il est d'ailleurs inférieur à celui utilisé dans le modèle développé précédemment. Cette faible valeur peut être expliquée par le fait que nous ne prenons pas en compte les déplacements internes à une commune. Ces derniers sont dans tous les cas des déplacements réalisés sur de courtes distances. Nous les avons ignoré dans notre détermination de la valeur de bêta. Ceux-ci ont néanmoins une influence importante sur le frein au déplacement. Ils représentent 1 déplacement sur 2 pour les flux issus de l'INSEE et 1 déplacement sur 3 pour notre modélisation (avec $\beta=0,6$). L'écart observé s'explique par le fait que nos flux sont "incomplets" par rapport à ceux de l'INSEE.

Dans la suite de la modélisation les valeurs de flux utilisées sont celles obtenus avec un frein au déplacement de 0,6.

FIGURE 1.4 – Graphique représentant le nuage de point obtenu pour une valeur de bêta de 0,6



1.3. Intégration d'un nouveau motif de déplacements :

La première modélisation s'est faite à partir d'un seul motif de déplacement : le motif domicile-travail et ce au sens strict du terme. En effet, seules étaient considérés les déplacements depuis le domicile vers le lieu de travail. Les déplacements depuis le lieu de travail vers le domicile ne sont pas pris en compte. Ce motif, bien que structurant ne représente pas la majorité des déplacements. Sur le territoire du SCoT de l'agglomération tourangelle les déplacements domicile-travail représentent seulement 23% des déplacements (SMAT, 2013).

Pour cette nouvelle modélisation nous avons décidé d'ajouter le motif domicile – lieu d'étude. Ces déplacements représentent sur le territoire du SCoT 3% des déplacements pour le motif domicile université et 9% des déplacements pour le motif domicile – école (SMAT, 2013).

Dans la mesure où nous nous intéressons uniquement aux déplacements réalisés en automobile, nous avons fait le choix de ne conserver que les déplacements pour les motifs domicile-université et domicile-lycée.

Les déplacements du domicile vers les écoles maternelles et primaires ne sont pas intégrés de même

pour les déplacements depuis le domicile vers les collèges. Dans les deux cas, les élèves même s'ils se déplacent en voiture sont passagers. Nous supposons ici que les parents ou le conducteur réalise ce déplacement à l'occasion d'un déplacement domicile-travail et que le passage par le collège n'est qu'une étape de leur déplacement. Ces déplacements ne font donc pas réellement partis du motif "domicile-lieu d'étude". Idéalement ce détour devrait être modélisé dans les déplacements domicile-travail. Il faudrait dans ce cas revoir l'ensemble du processus de distribution des déplacements ou prendre en compte a posteriori cet aspect dans l'affectation. Enfin, une grande majorité des enfants sont scolarisés au plus proche de leur domicile. La quasi-totalité des IRIS possédant une école, nous supposons donc ici que les enfants sont scolarisés dans l'école située au sein de l'IRIS. Ainsi, comme nous ne traitons pas les déplacements internes à chaque IRIS, ces déplacements ne sont pas modélisés.

Finalement se sont uniquement les déplacements domicile-école supérieur et domicile-lycée qui nous intéressent. Ici encore, seuls les déplacements réalisés en voiture sont pris en compte dans notre modélisation. Nous avons considéré que 30% des déplacements des étudiants et 10% des déplacements des lycéens sont réalisés en voiture. (IAU-IDF, 2017)

De nouveau le modèle de Huff est utilisé pour modéliser ces flux (voir équation 1.1). Le facteur d'attractivité est ici l'effectif recensé dans chaque établissement. Ces données sont disponibles en annexe 1. La population considérée est la population scolarisée âgée de 15 à 17 ans pour le motif domicile-lycée et la population scolarisée âgée de 18 ans ou plus pour le motif domicile-université.

De la même manière que les emplois et la population active sont agrégés au centre de l'IRIS, l'ensemble des établissements scolaires et la population scolarisés sont là aussi localisés au centre de l'IRIS. Les distances sont également calculées de la même manière.

Enfin le frein au déplacement utilisé est le même que pour le motif domicile-travail. Nous avons considéré que sur le terrain d'étude, un territoire assez urbain, la distance influe sur les déplacements domicile étude de la même manière que pour le domicile travail. Comme nous ne considérons que les personnes ayant la possibilité de se déplacer en voiture, la contrainte semble équivalente.

1.4. De la génération/distribution à l'affectation des déplacements

Le modèle séquentiel à quatre étapes, qui guide l'ensemble de notre modélisation, comprend entre les étapes de distribution et d'affectation une étape de choix modal. Cette étape correspond au choix du mode de déplacement (Bonnell P. HDR Chapitre 8, 2001). Dans notre cas, cette étape n'est pas traitée ou plutôt est implicitement incluse dans le choix des données d'entrée des étapes de génération et de distribution des flux. En effet, nous avons considéré uniquement des populations se déplaçant en voiture que ce soit pour le motif domicile-travail ou pour le motif domicile-lieu d'étude.

Les flux générés à l'issue des étapes de génération et de distribution sont un nombre de déplacements. Pour le besoin de l'étape d'affectation où nous cherchons à connaître les flux de véhicules sur le réseau routier, ce nombre de déplacement est converti en unité de véhicule particulier. Pour se faire, on considère qu'à chaque déplacement correspond une personne. Il y a donc autant de déplacements que

de personnes qui se déplacent. Cela est conforme à la formulation du modèle de Huff, puisque pour chaque couple origine-destination nous avons multiplié une population vivant à l'origine (P_i) par la probabilité qu'un usager vivant à l'origine se rende à la destination (Huff, 1962). Pour convertir ce flux obtenu en nombre de personnes en un flux en nombre de véhicule, le premier est divisé par le taux d'occupation d'une voiture personnelle. Pour faciliter les comparaisons avec le travail de modélisation déjà réalisé, le taux d'occupation retenu est de 1,06 personnes par voiture (Blanloeil F., Lamirault V., PFE Semestre 9, 2017).

Le modèle de Huff a permis de modéliser les flux pour chaque couple origine-destination sans indication de temps comme cela a déjà été évoqué précédemment. Pour les besoins de l'étape d'affectation, nous avons considéré que les flux simulés sont ceux d'une journée type en semaine et en période scolaire. Dans la partie suivante, cette hypothèse va nous permettre de calculer une capacité théorique pour chaque tronçon du réseau routier.

Affectation des flux sur le réseau

2.1. Recherche sur la capacité d'une voie et modification du modèle d'affectation

Le modèle conçu au premier semestre ne prenait pas en compte la capacité des arcs au moment de l'affectation. L'hypothèse était que chaque arc, donc chaque tronçon de route avait une capacité infinie. Dès lors, si un chemin était trouvé entre une origine et une destination, la totalité des flux passaient par ce chemin. Si aucun chemin n'était trouvé, les flux devenaient des flux résiduels (i.e. des flux n'ayant pas pu être affectés).

En réalité, une route, quelle que soit sa nature, a une capacité. Celle-ci est le plus souvent exprimée en UVP/jour (unité de véhicules particuliers par jour) ou en UVP/heure. Cette notion de capacité est très vaste et il existe de nombreuses méthodes pour la déterminer. La suite de cette partie expose la méthodologie utilisée pour déterminer la capacité de chaque tronçon de route ainsi que les sources bibliographique sur lesquelles se base cette méthode.

Il convient toutefois d'alerter le lecteur sur le caractère quelque peu "exploratoire" de la démarche à suivre. Devant l'ampleur des solutions possibles, de nombreuses hypothèses ont dû être posées et conduisent nécessairement à certaines approximations. Cette partie doit être plus vue comme une première approche de cette notion.

2.1.1. Calcul de la capacité théorique et équations fondamentales

L'objectif de cette section est d'établir les relations qui nous permettront de déterminer la capacité de chaque tronçon ainsi que la vitesse des véhicules en fonction du flux supporté par chaque tronçon de route.

Dans la suite de cette section nous adopterons les notations suivantes :

- Q est le débit sur l'arc (en UVP/heure) ;
- Q_{max} est le débit maximum sur l'arc autrement dit sa capacité ;
- k est la concentration de véhicules (en UVP par kilomètre) ;
- k_{max} est la concentration maximale c'est-à-dire le nombre de véhicules par kilomètre avec une chaussée remplie de véhicules ;
- k_c est la concentration critique c'est-à-dire la concentration de véhicules au-delà de laquelle la vitesse des véhicules est contrainte par celle des autres véhicules. Dimon (2012) parle de vitesse "libre" des véhicules ;
- v la vitesse moyenne des véhicules sur l'arc ;
- v_{max} la vitesse maximale autorisée sur l'arc.

2.1.1.1 Concentration maximale

La concentration maximale est atteinte lorsqu'un tronçon de voie est entièrement occupé par des véhicules à l'arrêt. Pour notre modélisation, nous supposons qu'un véhicule mesure 4,1 mètres (ALVES, 2011) de longueur en moyenne et qu'il y a un espace minimum de 1,5 mètres entre chaque véhicule. La concentration maximale vaut donc :

$$k_{max} = \frac{1}{5,6 \times 10^{-3}} \text{ (UVP/km)} \quad (2.1)$$

Cela représente environ 179 véhicules par kilomètre.

2.1.1.2 Équation fondamentale du trafic

En suivant les notations vues précédemment cette équation s'écrit :

$$Q = v \times k \quad (2.2)$$

Dans cette équation, le trafic routier est assimilé à un fluide. Si on fait l'analogie avec l'hydrologie, le débit se calcul en multipliant la vitesse d'écoulement du fluide par l'aire de la section du cours d'eau. Cette définition peut être transposée au domaine des transports. Le débit est alors exprimé en fonction de la vitesse et de la concentration des véhicules (Maizia M. 2016).

Ce modèle est surtout valable si l'objectif est de modéliser le trafic sur une autoroute. En effet, ce type de voie supporte un flux relativement continue et donc assez proche des conditions d'écoulement d'un fluide où il n'y a pas ou peu de variation de la vitesse.

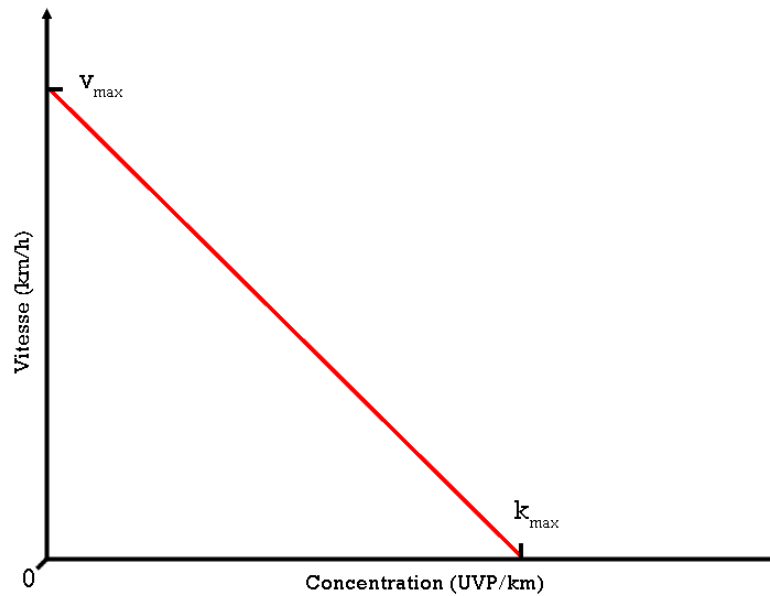
Dans notre modèle, cette relation est appliquée à l'ensemble des routes présentes sur notre réseau. Cela inclut bien sûr des portions d'autoroutes mais surtout les autres types de routes. On suppose donc que la vitesse sur un tronçon de route ne subit pas de variation et on ignore les aménagements induisant ces changements de vitesse (carrefours, aménagements sur la chaussée, effets des stationnements, etc.).

2.1.1.3 Relation entre vitesse et concentration

B. D. Greenshield développe en 1935 une méthode photographique pour étudier le comportement du trafic (Greenshield, 1935). De cette étude il tire un certain nombre d'hypothèses aujourd'hui très utilisés du fait de leur simplicité. La première étant que la vitesse du trafic décroît proportionnellement à l'augmentation de la concentration. Dans ce cas, la vitesse est une fonction affine de la concentration. On note f la fonction telle que $f(k) = v = a \times k + b$ avec a et b deux réels à déterminer. Pour se faire, deux hypothèses sont nécessaires.

Tout d'abord, on suppose que lorsque la concentration est nulle (i.e. il n'y a aucun véhicule), un véhicule arrivant sur le tronçon de voie roule à la vitesse maximale autorisée. On a donc l'égalité suivante : $f(k = 0) = v_{max}$. On suppose ensuite que lorsque la concentration est maximale, c'est-à-dire lorsque la voie est totalement occupée par des véhicules, la vitesse est alors nulle. On a ainsi l'égalité suivante : $f(k_{max}) = 0$. Cette situation est représentée dans le schémas 2.1.

FIGURE 2.1 – Schéma représentant l'évolution de la vitesse en fonction de la concentration



À partir de ces deux hypothèses, on peut maintenant déterminer les valeurs de a et b .

On a :

$$f(0) = v_{max} \iff b = v_{max}$$

De plus :

$$\begin{aligned} f(k_{max}) = 0 &\iff a \times k_{max} + v_{max} = 0 \\ &\iff a = -\frac{v_{max}}{k_{max}} \end{aligned}$$

Ainsi on a :

$$v = v_{max} - \frac{v_{max}}{k_{max}} \times k \quad (2.3)$$

2.1.1.4 Relation entre concentration et débit

D'après les sections précédentes, on a :

$$Q = v \times k \text{ et } v = v_{max} - \frac{v_{max}}{k_{max}} \times k$$

On peut donc écrire que :

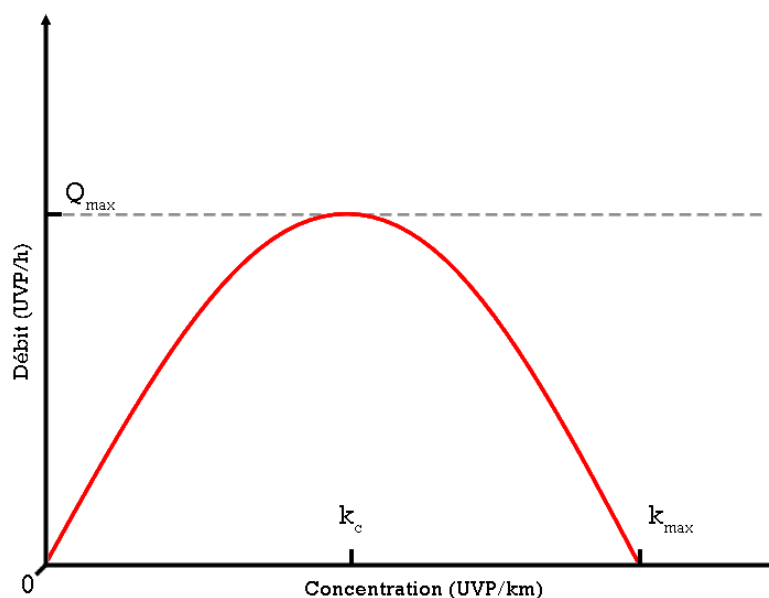
$$Q = (v_{max} - \frac{v_{max}}{k_{max}} \times k) \times k$$

D'où :

$$Q = v_{max} \times k - \frac{v_{max}}{k_{max}} \times k^2 \quad (2.4)$$

On reconnaît ici une fonction du second degré. Le maximum pour ce type de fonction (de la forme $f(x) = ax^2 + bx + c$) est atteint pour $x = -b/2a$ c'est-à-dire ici pour $x = k_{max}/2$. Le schéma 2.2 représente cette fonction.

FIGURE 2.2 – Schéma représentant l'évolution du débit en fonction de la concentration



Cette relation nous permet de déterminer la concentration critique c'est-à-dire la concentration ne permettant plus un écoulement à vitesse libre des véhicules. C'est une concentration à partir de laquelle le débit chute car l'espacement entre les véhicules ne leur permet plus de rouler à une vitesse proche de la vitesse maximale. Cette concentration critique équivaut sur le schéma 2.2 au maximum de la fonction atteint pour $x = k_{max}/2$ (DIMON C. 2012).

2.1.1.5 Capacité des voies

D'après les éléments énoncés dans la section précédente, le débit maximum, c'est-à-dire la capacité est atteinte lorsque que la concentration a atteint son seuil critique ($k = k_c = k_{max}/2$).

D'après la relation 2.4, pour $k = k_{max}/2$:

$$Q = v_{max} \times k - \frac{v_{max}}{k_{max}} \times k^2 = \frac{v_{max} \times k_{max}}{4} \quad (2.5)$$

La capacité est donc égale à $v_{max} \times k_{max}/4$ et la vitesse associée est d'après la relation 2.3 égale à la moitié de la vitesse maximale.

Le modèle proposé par Greenshield nous permet d'obtenir une première formule pour calculer la capacité. Celle-ci dépend dans ce cas uniquement de la vitesse maximale et de la concentration maximale. Coquand nous donne dans son ouvrage *Routes* de 1972 plus de précisions sur les facteurs influençant la capacité d'une voie. Ainsi celle-ci est fonction bien sûr de la vitesse mais aussi des conditions climatiques, de la présence ou non de bas-côté ou d'obstacles, de la présence de stationnements en bordure de route, etc (COQUAND R. , 1972). L'élément le plus déterminant est néanmoins la largeur de chacune des voies. En fonction de celle-ci, les usagers se sentent plus ou moins en danger et adaptent leur vitesse. Coquand propose de réduire la capacité d'une voie en fonction de sa largeur si

celle-ci est inférieure à 3,6 mètres. Le tableau 2.1 donne les pourcentages de réduction de la capacité associés à chaque largeur de voie.

TABLE 2.1 – Tableau exprimant en pourcentage la réduction de la capacité en fonction de la largeur

Largeur d'une voie (en mètres)	Réduction de la capacité (en %)
3,60	0%
3,30	14%
3	23%
2,70	30%

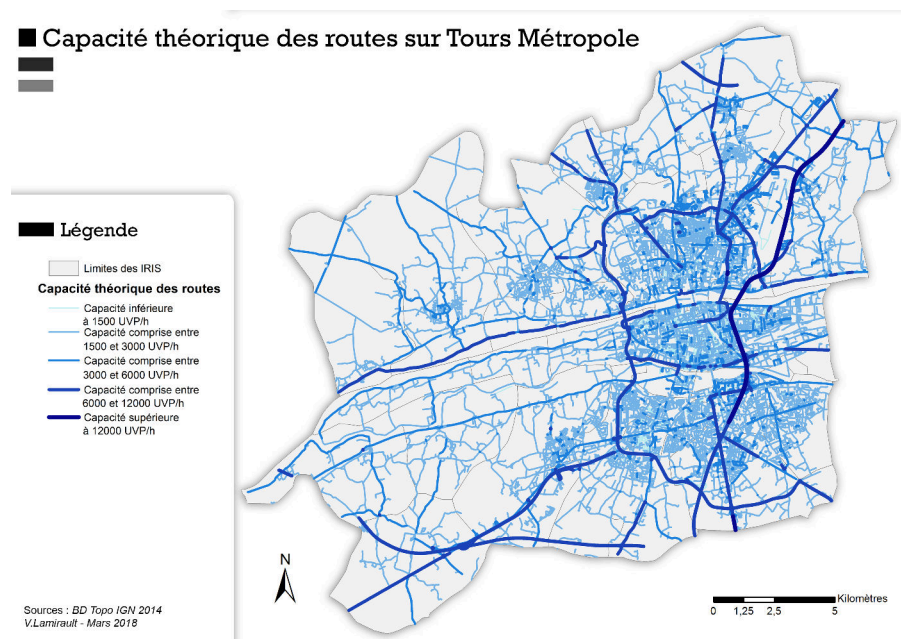
Afin de pouvoir modéliser la capacité rapidement et ce quel que soit la largeur de chacune des voies, celle-ci peut être approchée grâce à la fonction suivante¹ :

$$\text{Si la largeur} \geq 3,6m : Q_{max} = \frac{v_{max} \times k_{max}}{4} \quad (2.6)$$

$$\text{Sinon : } Q_{max} = \frac{v_{max} \times k_{max}}{4} \times 0,289 * e^{(0.3935 \times \text{Largeur})}$$

La carte 2.3 représente cette capacité "théorique" sur l'ensemble du réseau routier de la métropole tourangelles. La capacité est ici en UVP/heure. De manière générale, les capacités obtenues sont supérieures aux capacités théoriques usuelles. Cela vient surtout de la définition de la concentration maximum dont dépend grandement le calcul de la capacité.

FIGURE 2.3 – Carte de la capacité théorique des routes sur Tours Métropole



1. La fonction sur la largeur exprime la réduction de capacité telle que formulée dans le tableau 2.1 pour toute largeur inférieure à 3,6 mètres.

Pour que cette notion de capacité soit exploitable dans l'affectation, il faut que l'unité soit la même que pour les flux issus des étapes de génération et de distribution. À l'issue de ces deux étapes, nous avons fait l'hypothèse que les flux obtenus représentaient les déplacements réalisés sur une journée type de la semaine. Ces flux sont donc obtenus en UVP/jour. Il s'agit donc maintenant de convertir cette capacité "horaire" en capacité "journalière".

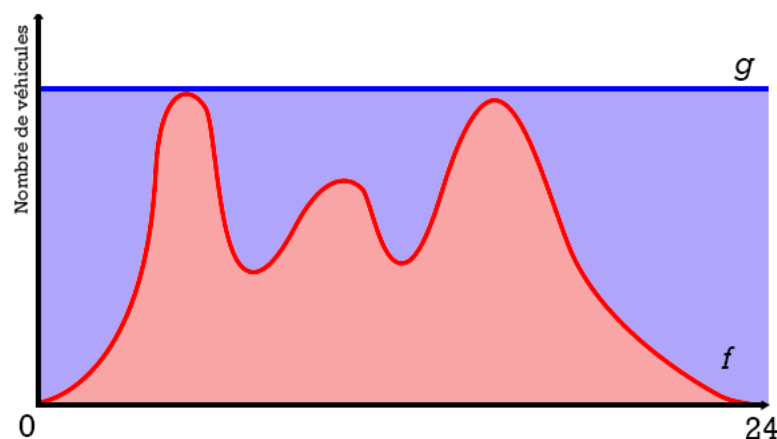
Une manière simple de faire cela est de multiplier la capacité horaire par le nombre d'heures en une journée soit, par 24. Cependant, cette méthode ignore la répartition du trafic sur la journée. La fréquentation du réseau n'est pas la même à 1h du matin et à 17h en fin d'après-midi. En utilisant cette définition de la capacité journalière celle-ci serait largement surévaluée.

Si on étudie la courbe de répartition de la circulation sur une journée, on s'aperçoit que le réseau routier est inégalement utilisé au cours de celle-ci. L'objectif est de rendre compte de cette inégale utilisation dans le coefficient qui permettra de passer des flux en UVP par heure à des flux en UVP par jour.

On suppose qu'au moment du pic de circulation, le tronçon considéré est au maximum de sa capacité. Cela est évidemment une hypothèse qui ne respecte pas tout à fait la réalité mais qui va permettre d'obtenir le coefficient recherché.

On considère le schéma 2.4 qui représente la fréquentation du réseau routier au cours d'une journée (en rouge). La capacité est sur ce schéma représentée par la fonction g (en bleu). Toujours en considérant que le pic de circulation correspond à une utilisation du réseau à sa capacité maximum, le rapport de l'aire sous la courbe g par l'aire sous la courbe f nous donne une indication sur l'utilisation du réseau par rapport à sa capacité.

FIGURE 2.4 – Schéma représentant la fréquentation du réseau routier au cours d'une journée



Mathématiquement on a :

$$C = \frac{\int_0^{24} f(t)}{\int_0^{24} g(t)}$$

En réalisant cette étude sur la courbe présentée dans le schéma 2.4 on obtient un coefficient d'environ 0,5. Ainsi pour passer de la capacité exprimée en UVP par heure à la capacité exprimée en UVP par jour on effectue le calcul suivant :

$$\text{Capacité jour} = \text{Capacité heure} \times 0.5 \times 24 = \text{Capacité heure} \times 12 \quad (2.7)$$

2.1.1.6 Relation entre débit et vitesse

La dernière relation concerne le débit et la vitesse. D'après l'équation fondamentale du trafic (équation 2.2) et la relation entre vitesse et concentration (équation 2.3) on a :

$$Q = v \times k \iff v = \frac{Q}{k}$$

Et :

$$v = v_{max} - \frac{v_{max}}{k_{max}} \times k$$

Donc :

$$k = (v - v_{max}) \times \frac{-k_{max}}{v_{max}}$$

En remplaçant k par le résultat précédent dans l'équation fondamentale du trafic on obtient :

$$v = \frac{Q}{v - v_{max}} \times \frac{-k_{max}}{v_{max}}$$

Si on réorganise l'expression, on obtient l'équation suivante :

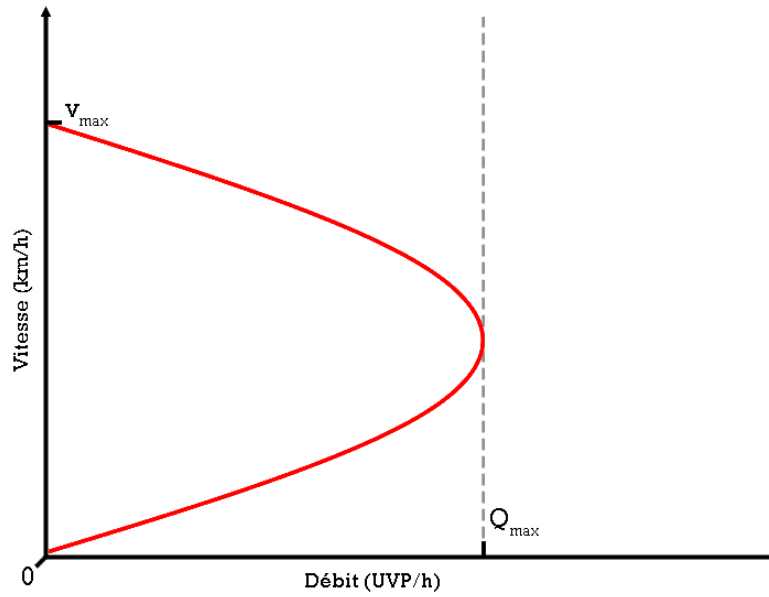
$$v^2 = v \times v_{max} - \frac{Q \times v_{max}}{k_{max}} \quad (2.8)$$

On reconnaît une équation de la même forme que celle proposée par Patrick Bonnel (Bonnel P. HDR, Chapitre 10, 2001) pour caractériser la courbe débit vitesse : $v^2 = av - bQ$ où dans notre cas $a = v_{max}$ et $b = v_{max}/k_{max}$. Comme dans la section concernant la capacité, il s'agit d'une équation du second degré à une inconnue. On peut donc identifier les solutions pour déterminer la vitesse dans l'hypothèse où l'on connaît le débit.

$$v_1 = \frac{v_{max} + \sqrt{\frac{v_{max}^2 - 4 \times Q \times v_{max}}{k_{max}}}}{2} \text{ et } v_2 = \frac{v_{max} - \sqrt{\frac{v_{max}^2 - 4 \times Q \times v_{max}}{k_{max}}}}{2} \quad (2.9)$$

Le schéma 2.5 représente la courbe débit vitesse pour plusieurs vitesses maximum.

FIGURE 2.5 – Schéma représentant l'évolution de la vitesse en fonction du débit (courbe débit vitesse)



La courbe débit-vitesse admet un maximum lorsque le discriminant (delta) est égal à 0 c'est-à-dire lorsque $v_{max}^2 - 4 \times Q \times v_{max}/k_{max} = 0$ ou encore lorsque $v_{max} \times k_{max}/4 = Q$. Cela correspond bien à l'équation qui nous a servi à déterminer la capacité dans la section précédente.

2.1.2. Modélisation de la capacité dans le projet

Pour les besoins de ce projet, les équations vues précédemment sont utilisés pour déterminer à la fois la capacité maximum théorique et la vitesse moyenne sur le réseau en fonction du débit simulé.

L'idée de cette nouvelle méthode d'affectation est de répéter plusieurs fois le processus réalisé au semestre 9 en faisant évoluer à chaque itération la vitesse sur le réseau en fonction des flux supporté par celui-ci. Cette évolution de la vitesse implique de recalculer la distance. Celle-ci étant défini en fonction de la vitesse et de la longueur de chaque tronçon de route (c'est une distance "temporelle").

2.1.2.1 Initialisation de l'affectation

Avant de réaliser l'affectation il convient d'initialiser les données nécessaires à celle-ci. La première étape est de calculer la capacité de chaque tronçon de route. C'est ici qu'intervient ce qui a été développé dans la section 2.1.1.5. La capacité est donc calculée comme suit :

$$\text{Si la largeur} \geq 3,6m : Q_{max} = \frac{v_{max} \times k_{max}}{4}$$

$$\text{Sinon : } Q_{max} = \frac{v_{max} \times k_{max}}{4} \times 0,289 * e^{(0.3935 \times \text{Largeur})}$$

Dans la modélisation réalisée précédemment, la vitesse considérée était la vitesse maximum autorisée sur chaque tronçon de route. Afin de coller au plus proche de la réalité, la vitesse est désormais

calculée à partir du débit supporté par le tronçon routier. Pour se faire on utilise l'expression 2.9 développée précédemment. Pour l'initialisation, on ne connaît pas encore de valeur du débit. On considère donc la vitesse associée au débit maximum c'est-à-dire à la capacité. Comme indiqué dans la section 2.1.1.5, cette vitesse est égale à la moitié de la vitesse maximale autorisée.

Enfin, la dernière étape de l'initialisation de l'affectation consiste à recalculer le temps de parcours sur chaque tronçon du réseau routier pour que celui-ci corresponde à la vitesse.

2.1.2.2 Algorithme d'affectation

Au semestre 9, l'affectation des flux sur le réseau était réalisée sur un mode tout ou rien. En d'autre terme dès lors qu'il existait un chemin (le chemin en question étant le plus court) entre une origine et une destination les flux étaient affectés aux tronçons routiers appartenant à ce chemin. Les capacités de chacune des voies n'étaient pas prises en compte.

L'algorithme proposé pour ce nouveau modèle prend en compte les capacités de chacune des voies. Dans un premier temps il recherche le plus court chemin entre une origine et une destination. Ensuite pour chaque arc (i.e pour chaque tronçon de route) composant ce chemin, il compare le flux à affecter avec la capacité de l'arc. Si cette capacité est supérieure au flux, alors celui-ci est affecté à l'arc et il est soustrait à la capacité. Si la capacité n'est pas suffisante, une partie du flux correspondant au restant de la capacité est affectée à l'arc. Un nouveau chemin est recherché pour affecter le flux restant².

Ci-dessous sont présentés les algorithmes d'affectation du semestre 9 (Blanloeil F. Lamirault V. PFE S9) et celui réalisé pour cette nouvelle modélisation.

Algorithme d'affectation (S9) :

Pour chaque couple origine-destination :

Rechercher le chemin le plus court pour relier ce couple.

S'il n'existe pas de chemin pour relier l'origine à la destination :

Ajouter le flux entre l'origine et la destination aux flux résiduels.

Sinon :

Pour chaque arc constituant le chemin :

Ajouter au flux déjà supporté par l'arc le flux associé au couple
origine-destination

Passer à l'arc suivant.

Fin Pour

Fin Pour

Algorithme d'affectation (S10) :

Pour chaque couple origine-destination :

Rechercher le chemin le plus court pour relier ce couple.

S'il n'existe pas de chemin pour relier l'origine à la destination :

2. L'algorithme de recherche de chemin a également été modifié pour exclure à chaque fois les arcs dont la capacité est égale à 0, c'est-à-dire les arcs saturés.

```

    Ajouter le flux entre l'origine et la destination aux flux résiduels.
Sinon :
    Pour chaque arc constituant le chemin :
        Si le flux est inférieur à la capacité de l'arc moins le flux déjà supporté
        par l'arc :
            Alors on ajoute au flux supporté par l'arc le flux associé au couple
            origine-destination.
            Modifier la capacité : celle-ci est égale à la capacité moins le flux
            affecté.
            Passer à l'arc suivant.
        Sinon :
            Compléter le flux supporté par l'arc de sorte à ce qu'il soit égal à la
            capacité de l'arc.
            Modifier la capacité : celle-ci est égale à 0.
            Appeler l'algorithme d'affectation avec comme paramètre
            [[Nœud du début de l'arc, Nœud destination, flux restant non affecté]]
            Passer à l'arc suivant.
    Fin Pour
Fin Pour

```

En fin d'affectation la capacité de chaque arc est réinitialisée. Afin de pouvoir itérer ce processus en prenant en compte la fréquentation sur le réseau, une nouvelle vitesse est calculée à partir du flux affecté sur chaque arc. Un nouveau temps de parcours est calculé à partir de la nouvelle vitesse.

2.1.2.3 Itération de l'affectation

Comme énoncé précédemment, le processus d'affectation est répété plusieurs fois. L'hypothèse étant que la vitesse des véhicules sur chaque tronçon dépend de leur fréquentation. C'est l'hypothèse faite par Greenshield lorsqu'il a conçu le modèle décrit ci-avant.

À la fin de chaque itération le débit supporté par chaque tronçon routier permet de recalculer la vitesse et par conséquent le temps qu'il faut pour parcourir chaque arc. Cela doit permettre de modifier à l'itération suivante le choix du ou des plus courts chemins en fonction du débit supporté par chaque tronçon routier. Ainsi, les flux ne seront pas affectés sur les mêmes arcs. L'objectif étant, au bout d'un certain nombre d'itération, d'arriver à une situation d'équilibre où la vitesse est stabilisée. Ce nombre d'itération est pour le moment inconnu.

2.1.2.4 Limites de l'affectation

En réalisant les diverses simulations (voir section 2.2), on s'aperçoit que la codification du réseau (i.e. comment ont été déterminés les attributs de chaque tronçon routier) est très importante. L'attribut vitesse maximale autorisée est particulièrement important. Celle-ci dépend de la densité du bâti avoisinant (voir Blanloeil, F. Lamirault, V., PFE semestre 9, 2017), ainsi elle n'est pas toujours parfaitement conforme à la réalité. Il y a donc quelques erreurs qui ont une influence sur le processus d'affectation. Par exemple il est possible de retrouver des tronçons à 90 en pleine ville uniquement

parce que la zone aux alentours n'est pas bâtie. Ce tronçon peut ainsi se retrouver dans un chemin considéré comme le plus rapide alors qu'il ne l'est pas nécessairement en réalité. Les imperfections dans la codification du réseau influencent donc le choix des chemins. Cela se retrouve notamment dans les résultats détaillés ci-après. De plus, la vitesse maximale autorisée est une variable présente dans tous les calculs réalisés avant et après l'affectation. La capacité et la vitesse réelle dépendent toutes deux de la vitesse maximale autorisée.

Une analyse similaire peut être dressée pour la concentration maximum comme cela a déjà été relevé précédemment. Cette constante se retrouve elle aussi dans tous les calculs. Pour être plus précis la détermination de cette valeur devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie.

Comme cela a été énoncé dans la partie 1.3, les déplacements domicile-travail et les déplacements domicile-étude ne représentent qu'une petite part de l'ensemble des déplacements. Il y a donc peu de chances qu'un tronçon routier atteigne les limites de sa capacité d'autant que celle-ci semble légèrement surévaluée. Plus les flux sont faibles, plus la vitesse pratiquée est proche de la vitesse maximale autorisée. Ainsi, c'est encore une fois cette vitesse maximale qui influencera le plus le choix du chemin le plus court et l'affectation des flux.

L'opération réalisée pour passer d'une capacité exprimée en UVP/heure à une capacité exprimée en UVP/jour n'est pas non plus idéale. Elle repose sur une hypothèse n'étant pas tout à fait exacte par rapport à la réalité. L'idéal aurait été de faire l'opération inverse c'est-à-dire de tenter de convertir les flux exprimés en UVP/jour en flux exprimés en UVP/heure en les répartissant sur la journée. L'affectation aurait ensuite été effectuée sur la période de la journée où le trafic est le plus important (période de pointe du matin ou du soir). Cela aurait nécessité des recherches plus approfondies sur la répartition de la circulation sur une journée au sein de l'agglomération tourangelle.

Finalement, le processus d'itération de l'affectation tel que nous l'avons exposé dans cette partie repose en grande partie sur les données d'entrée que sont la vitesse maximale autorisée sur chaque tronçon et la concentration maximale.

2.2. Résultats de l'affectation

Après avoir décrit en détail la méthode d'affectation, cette section se propose de discuter des résultats. Il s'agit dans un premier temps d'analyser séparément les résultats obtenus avant et après piétonisation du secteur sauvegardé. Cette analyse se décompose en deux temps. Un premier temps où il est question d'analyser l'évolution de la répartition des flux sur le réseau à l'issue de l'itération du processus d'affectation. Un second temps où les résultats de la dernière itération sont confrontés à ceux obtenus lors de la modélisation réalisée au semestre précédent.

Dans un second temps, les résultats avant piétonisation sont comparés avec les comptages réalisés sur le réseau routier. Enfin dans un dernier temps les résultats obtenus avant piétonisation sont confrontés à ceux obtenus après piétonisation.

2.2.1. Modélisation des flux avant piétonisation du secteur sauvegardé

Dans cette première partie, l'objectif est de comparer les résultats issus des différentes itérations du processus d'affectation. Pour rappel, à l'issue de l'affectation, la vitesse de circulation sur chaque tronçon du réseau routier est recalculé en fonction du flux supporté par le tronçon en question. Ainsi à l'itération suivante, un tronçon routier n'a pas forcément le même poids et cela influence le choix du plus court chemin. Cela implique à chaque itération de rechercher pour chaque couple origine destination le chemin le plus court.

Dans notre cas, le processus a été répété cinq fois. Si on représente les résultats sur une carte avec les flux sur chaque tronçon routier, on ne constate pas d'évolution flagrante d'une itération à l'autre. Les résultats pour les trois premières itérations ont été représentés en annexe 2. De plus, si on analyse les résultats plus en détails, on ne constate pas d'évolution entre la troisième et la quatrième itération et entre la quatrième et la cinquième itération. Cette observation est discutée dans la suite de cette section.

Si on représente maintenant le pourcentage d'évolution des flux d'une itération à l'autre, les évolutions sont plus visibles (carte 2.6 et 2.7).

FIGURE 2.6 – Carte comparant les flux générés avant piétonisation pour les itération 1 et 2

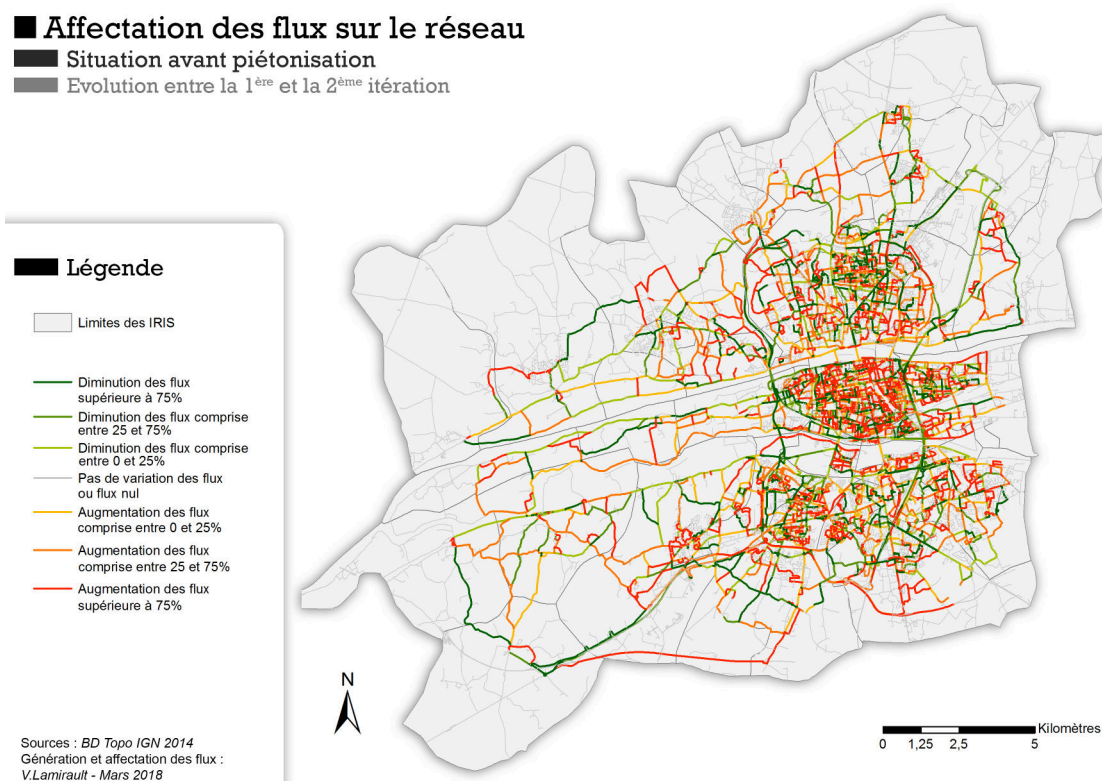
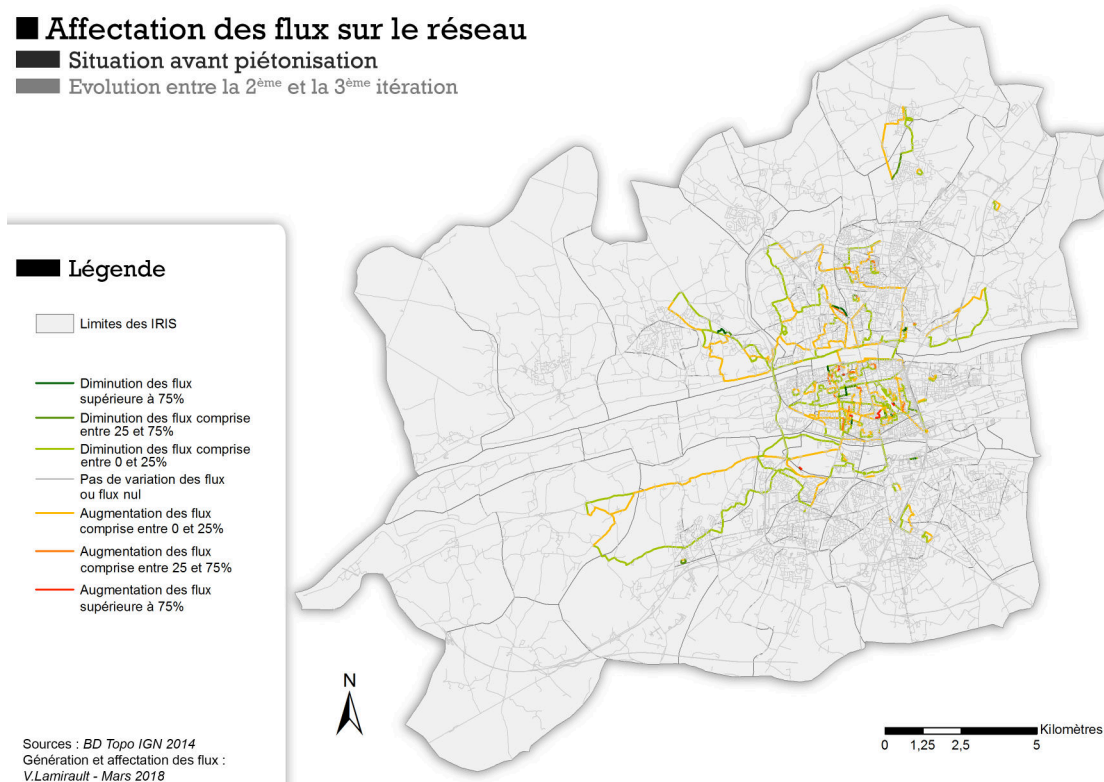


FIGURE 2.7 – Carte comparant les flux générés avant piétonisation pour les itération 2 et 3



Entre la première et la deuxième itération, on constate une importante évolution sur une grande partie des tronçons routiers. On observe une évolution (positive ou négative) pour 52% des tronçons routiers. Ces chiffres importants s'expliquent par le fait que les vitesses utilisées lors de la première itération sont celles correspondant à la capacité maximum (c'est-à-dire la moitié de la vitesse maximale autorisée). À la fin de cette première itération les vitesses sont recalculées pour chaque tronçon en fonction du flux supporté. Comme ces flux sont relativement faibles au regard de la capacité les vitesses sont beaucoup plus élevées (et proches de la vitesse maximale autorisée). Cette mise à jour des vitesses concerne également les tronçons routiers ne supportant aucun flux. Sur ces tronçons, il n'y a aucun impact du débit puisque celui-ci est nul. D'après le modèle développé dans la section 2.1.1.6 (équation 2.8) lorsque le débit est nul, la vitesse est maximale c'est-à-dire égale à la vitesse maximale autorisée. Ainsi, lors de la deuxième affectation, on observe des changements importants des chemins les plus courts.

Entre la deuxième et la troisième affectation, on observe une évolution pour seulement 9% des tronçons routiers ce qui est beaucoup moins important. Cela semble aussi normal car les flux supportés par chaque tronçon sont loin d'atteindre la capacité maximale. En effet, seuls les flux domicile-travail et domicile étude sont représentés. Ainsi peu ou pas de tronçon arrivent au seuil de saturation c'est-à-dire à un moment où le flux est suffisamment conséquent pour faire chuter la vitesse de manière importante. Les autres chemins ne sont ainsi pas plus avantageux compte tenu de ces faibles variations de la vitesse.

Pour obtenir des variations sur plus de trois itérations, il faudrait modéliser l'ensemble des motifs de déplacement et inclure le trafic de transit et le trafic provenant de l'extérieur. Les flux seraient ainsi beaucoup plus importants et impliqueraient de diminuer de manière plus importante la vitesse sur les tronçons empruntés.

Les cartes 2.8 et 2.9 permettent de comparer les résultats obtenus à l'issue de la troisième itération avec ceux obtenus au semestre 9.

FIGURE 2.8 – Carte représentant les flux affectés à l'issue de la troisième itération avant piétonisation

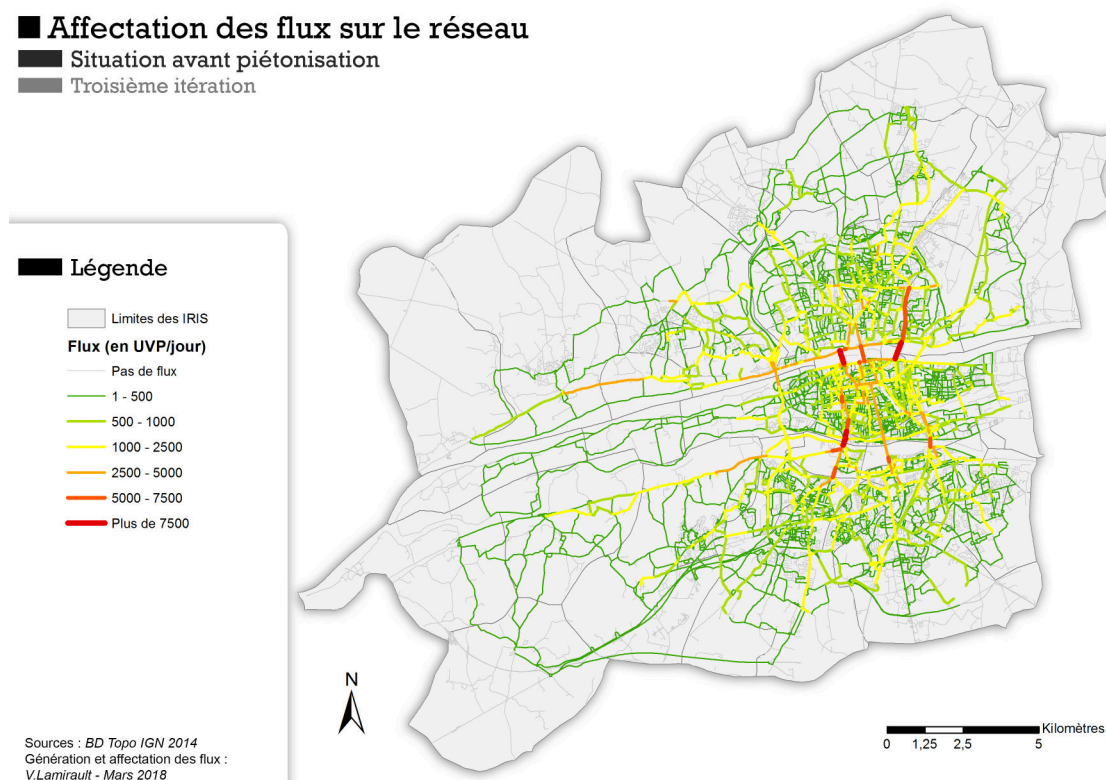
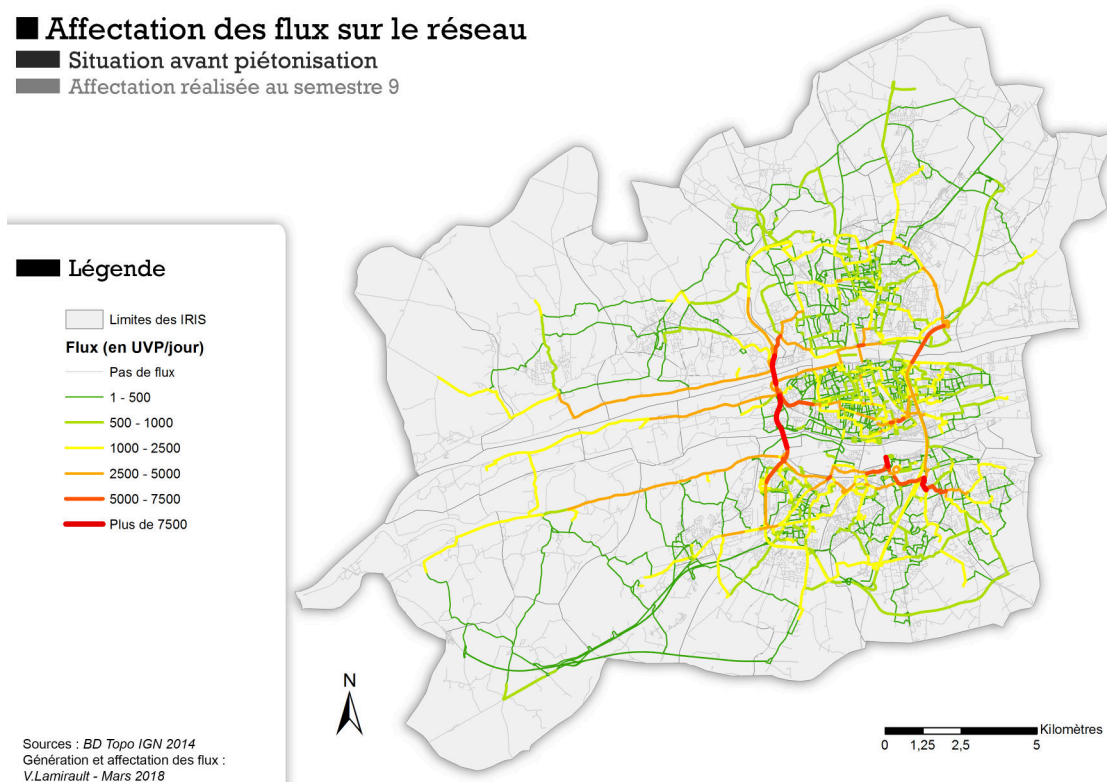


FIGURE 2.9 – Carte représentant les flux affectés au semestre 9 avant piétonisation



Pour ses deux affectations, les résultats sont complètement différents pour plusieurs raisons. Tout d'abord, les flux en entrée de l'étape d'affectation ne sont pas les mêmes. Ceux utilisés pour la modélisation du semestre 9 ne comprenaient que le motif domicile-travail avec un frein au déplacement de 1. Ensuite, l'affectation ne se fait pas selon les mêmes modalités. Les itinéraires les plus courts ne sont pas nécessairement les mêmes. Enfin, le réseau n'est pas tout à fait équivalent dans les deux cas. Celui utilisé pour la modélisation du semestre 9 comprenait entre autre des voies déjà piétonnisées (rue Nationale notamment) et des voies de bus (avenue Grammont notamment) qui ne sont au final pas des voies utilisables par les automobilistes. Ces voies ont été supprimées pour la nouvelle modélisation.

On observe également une plus grande utilisation des axes rapides (périphérique, autoroute A10, boulevard Abel Gance) pour la modélisation réalisée au semestre 9. En revanche, plus de tronçons du réseau routier sont utilisés pour la nouvelle modélisation (52,7%) que pour celle réalisée au semestre 9 (30,5%). Cette plus grande utilisation du réseau permet de se rapprocher de la réalité dans la mesure où la plupart des tronçons de route existant sont utilisés même de façon infime. Les deux cartes montrent bien cette densité d'utilisation du réseau routier. Cela est particulièrement vrai si on regarde dans l'ouest du territoire. Par exemple sur une commune comme Villandry (commune non irisée), seulement deux itinéraires sortant de la commune étaient utilisés au semestre 9. Dans la nouvelle modélisation on peut en dénombrer 4 ou 5.

La méthode d'affectation employée pour la nouvelle modélisation permet donc de mieux disperser les flux sur le réseau routier et peut être de mieux correspondre à la réalité.

2.2.2. Modélisation des flux après piétonisation du secteur sauvegardé

Pour cette seconde partie, les résultats et les analyses seront sensiblement les mêmes que pour la première partie. Au vu des résultats précédents, le processus d'affectation est réalisé trois fois uniquement. Ce choix a été fait pour deux raisons. D'une part le temps de calcul est très long et d'autre part, il n'y avait pas d'évolutions entre la troisième et la quatrième itération et entre la quatrième et la cinquième itération lors de la simulation des flux avant piétonisation. Les cartes de l'affectation du trafic en valeur absolue pour chaque itération sont disponibles en annexe 2. Si on compare les deux premières itérations et les deux dernières itérations, on observe le même phénomène que précédemment (carte 2.10 et 2.11) : les évolutions sont très importantes entre les deux premières et plus mesurées entre les deux suivantes.

FIGURE 2.10 – Carte comparant les flux générés après piétonisation pour les itération 1 et 2

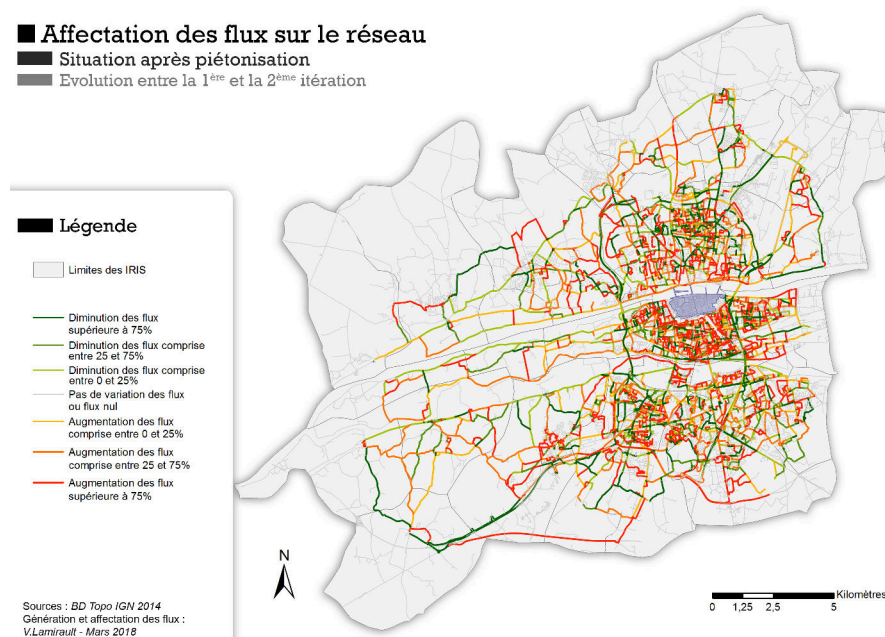
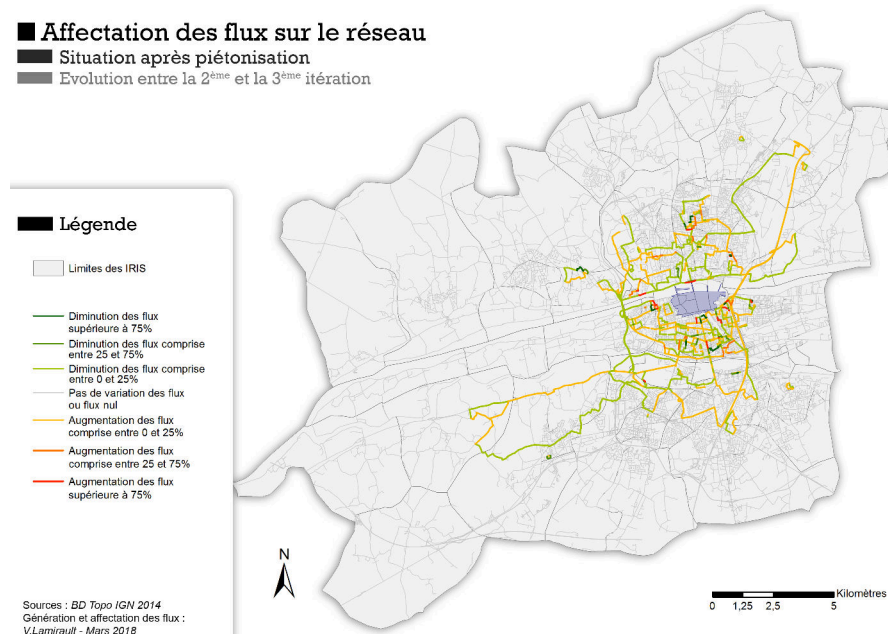


FIGURE 2.11 – Carte comparant les flux générés après piétonisation pour les itération 2 et 3



Enfin, en comparant les résultats obtenus à l'issu de la troisième itération (carte 2.12) avec les résultats obtenus au semestre 9 (carte 2.13), on observe là aussi le même phénomène que pour la situation avant piétonisation. La nouvelle méthode d'affectation permet d'utiliser une plus grande proportion du réseau routier et les flux sont moins concentrés sur les grands axes de circulation.

FIGURE 2.12 – Carte représentant les flux affectés à l'issu de la troisième itération après piétonisation

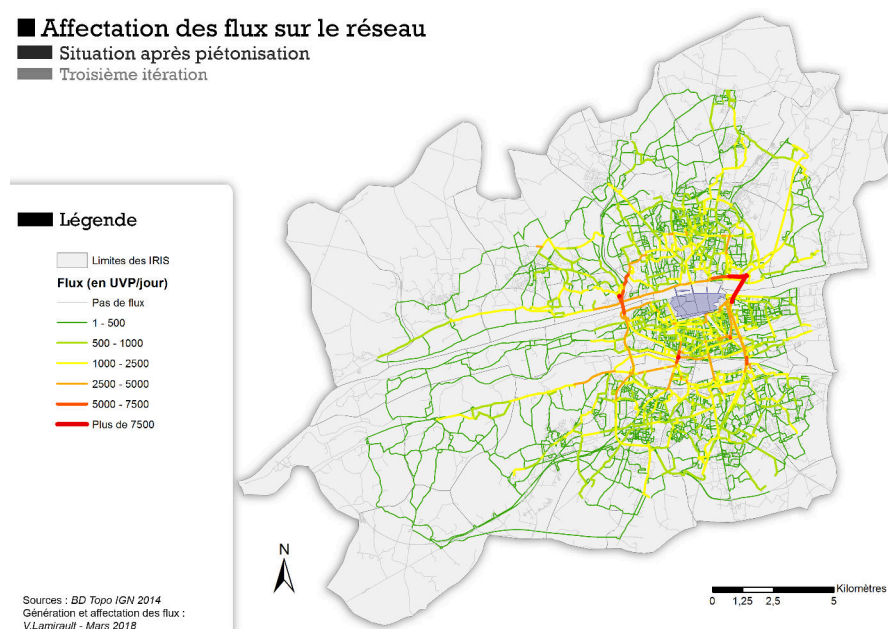
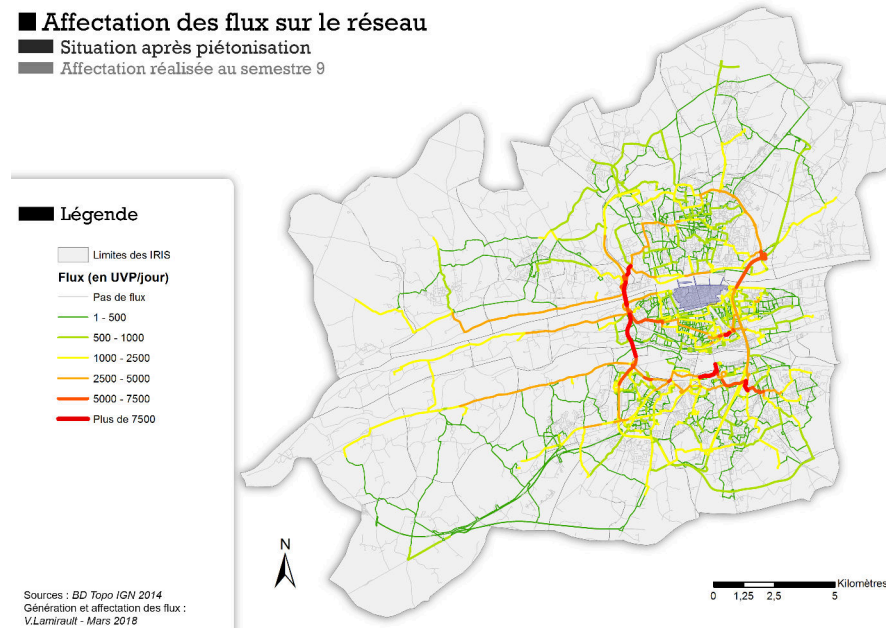


FIGURE 2.13 – Carte représentant les flux affectés au semestre 9 après piétonisation



2.2.3. Comparaison des résultats

2.2.3.1 Comparaison avec les comptages routiers

Avant de réaliser une comparaison des flux entre les situations avant et après piétonisation, cette section se propose de comparer les flux générés et affectés avant piétonisation avec les comptages réalisés en 2015 sur le territoire de la métropole.

Ces comptages concernent surtout des grands axes routiers tels que l'avenue Grammont, l'avenue de Bordeaux, les boulevard Churchill, Bérenger, et Wagner, l'avenue de la Tranchée, les ponts enjambant la Loire ou le Cher, les voies situés sur les quais et les voies de desserte du centre-ville (rue de la Victoire, rue Marceau, etc).

Les comptages routiers englobent tout type de déplacement et donnent un trafic journalier moyen pour chacun des axes de circulation étudié. Il convient donc, dans un premier de temps d'appliquer sur chaque comptage un coefficient correspondant à la part des motifs de déplacement étudiés dans notre simulation. Les déplacements domicile-travail représentent 23% des déplacement, les déplacements domicile-université 3% et les déplacements domicile-école 9%. Parmi ces derniers seuls une infime partie est étudiée. On a considéré uniquement les déplacements des lycéens. Ceux-ci représentent 21% de la population scolarisée de moins de 18 ans. Ainsi la part des déplacements domicile-école est réduite à 2%. Ainsi, pour effectuer nos comparaisons on ne considérera que 28% de chacun des comptages.

Cela a été rappelé précédemment, les déplacements modélisés sont les déplacements domicile-travail et domicile-lieu d'étude au sens stricte. On ne considère par les déplacements retours (travail-

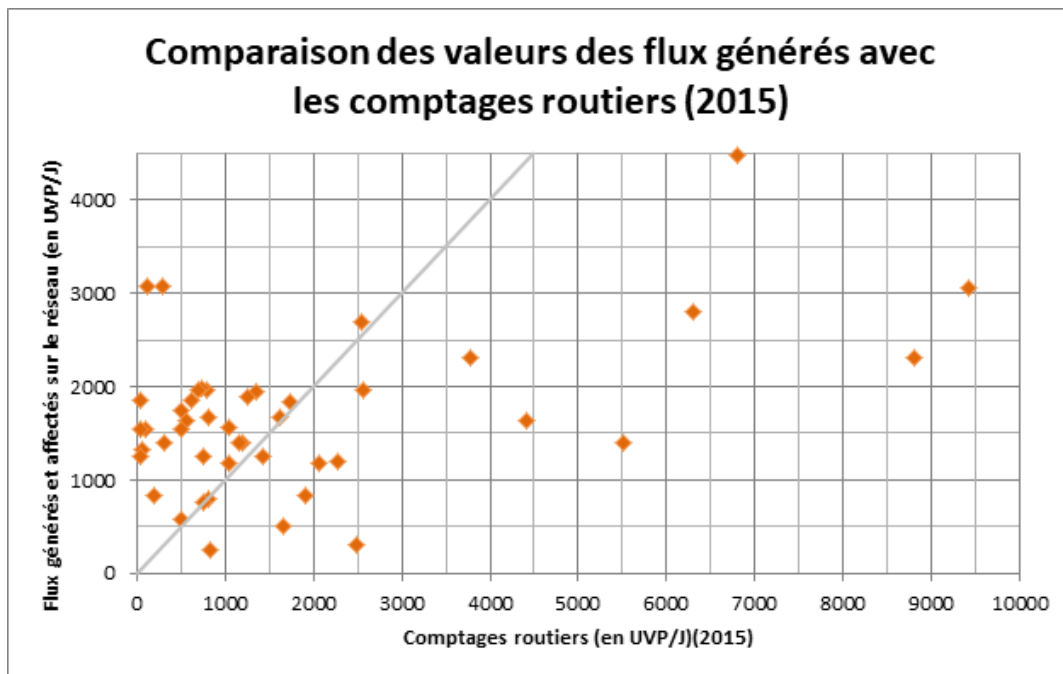
domicile et lieu d'étude-domicile). Il convient donc dans un dernier temps de diviser les valeurs des comptages par deux.

Ainsi les valeurs de comptages utilisées pour la comparaison avec les flux simulés sont obtenu comme suit :

$$\text{Comptage ajusté} = \frac{\text{Comptage mesuré} \times 0,28}{2} \quad (2.10)$$

Les valeurs de comptages sont consignées dans un tableau contenant l'identifiant du tronçon sur lequel le comptage à été réalisé. La correspondance avec les identifiants de la base de données des routes utilisée n'est pas parfaite. Ainsi de nombreuses valeurs de comptages ne trouvent pas de correspondance dans les flux simulés. Sur 71 comptages réalisés, seuls 45 ont une correspondance dans la base de données utilisée. Seules ses valeurs sont représentées dans le graphique 2.14 sous la forme d'un nuage de points. Sur ce graphique, la ligne grise représente le moment où il y a égalité entre les flux simulés et les flux comptés

FIGURE 2.14 – Graphique comparant les flux affectés sur le réseau avec les comptages routiers



Sur ce graphique, on constate qu'une grande partie des comptages sont supérieurs aux flux simulés. Cela peut être expliqué par le fait que les flux simulés ne prennent pas en compte le trafic de transit et le trafic venant de l'extérieur. Le système considéré est un système fermé et donc sans interaction avec l'extérieur.

En réalisant une régression linéaire sur ces données comme cela a été fait dans la partie 1.2.2, on obtient un coefficient de détermination de 0,22 ce qui est plutôt faible. Notre modèle d'affectation est donc très faiblement prédictif et les équivalences entre les comptages et les flux simulés ne sont pas forcément très fiables. En effet, la méthode qui a permis de mettre les données des comptages à niveau des données obtenus grâce à la simulation est fortement agrégée. On ne distingue ici pas les

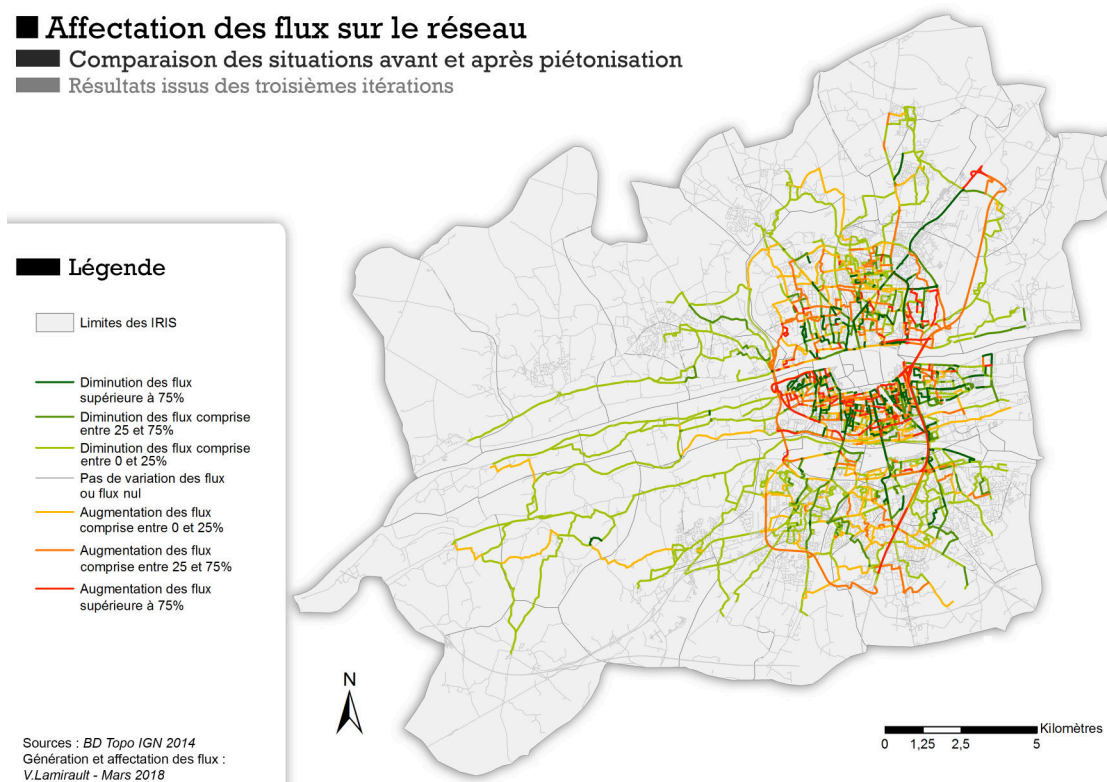
spécificités de chacun des axes, on les considère tous de même nature.

Finalement, ce que l'on peut retenir de cette comparaison c'est que notre modèle donne une approximation des flux réels. L'ordre de grandeur entre les flux simulés et les données issues des comptages reste le même. Néanmoins les résultats de la modélisation sont ici à prendre avec précaution dans toute tentative d'analyse.

2.2.3.2 Comparaison des situations avant et après piétonisation

Pour cette dernière section, on cherche à comparer les résultats obtenus avant et après piétonisation du secteur sauvegardé. Pour se faire, dans les deux cas on a utilisé les données issues de la troisième itération. Les évolutions entre la situation initiale et la situation projetée sont représentées sur la carte 2.15.

FIGURE 2.15 – Carte comparant les flux générés avant et après piétonisation



Un premier constat est que les flux se dirigeant vers les IRIS ou les communes périphériques ont plutôt tendance à être moins élevés après piétonisation du secteur sauvegardé qu'avant. Cela s'explique par le fait qu'une partie non négligeable des flux n'ont pas pu être affectés (ce sont les flux résiduels). Comme la zone piétonnisée est le secteur le plus attractif en termes d'emplois, les flux allant vers cette zone depuis les communes et IRIS périphériques sont importants.

Pour ce qui est du cœur de la métropole que l'on peut délimiter sur cette carte par le périphérique à l'Ouest, la Loire au Nord, l'autoroute A10 à l'Est et le Cher au sud, on observe que les grands

axes connaissent une augmentation de leur flux. On peut supposer que les flux transitant du nord au sud et passant par la zone qui a été piétonnisée se sont reportés sur d'autres itinéraires englobant notamment le périphérique et l'autoroute A10. Cela n'a rien d'étonnant puisque les trois autres ponts (Napoléon, Wilson et Mirabeau) sont également piétonnisés et donc inaccessibles aux voitures.

Finalement, les conclusions sont ici très similaires à ce que l'on a pu observer lors de la modélisation réalisée au semestre 9.

Modélisation du stationnement

L'objet de cette partie est dans un premier de temps d'établir un diagnostic de l'offre de stationnement et de son utilisation. Cette étude se concentrant en particulier dans le secteur piétonnisé et aux alentours. En effet, la modélisation du stationnement réalisée au semestre 9 ne prenait pas en compte l'offre existante ni l'occupation actuelle des parkings relais.

Dans un second temps, il s'agit d'intégrer les nouveaux résultats issus de la modélisation des flux pour dimensionner de nouvelles aires de stationnement en relation avec la piétonisation du secteur sauvegardé.

3.1. L'offre de stationnement

Outre l'offre de parkings-relais et de stationnements payant, cette partie se propose de déterminer l'ensemble de l'offre de stationnement sur les IRIS du centre de Tours. L'offre de stationnement se décompose en quatre parties : le stationnement sur la voirie qu'il soit payant ou gratuit, le stationnement en ouvrage et en particulier dans les parkings souterrains, le stationnement en parking relais et le stationnement résidentiel.

Le stationnement résidentiel est une donnée partiellement disponible auprès de l'INSEE. En effet, les bases de données sur le logement indiquent également le nombre de ménages comportant au moins un emplacement de stationnement. Nous ne connaissons donc pas le nombre moyen de stationnements par logement (au sens de l'INSEE un ménage équivaut à une résidence principal donc à un logement occupé de façon habituelle – INSEE, 2016). Cette données n'étant pas disponible, nous avons pris le parti de considérer que chaque ménage est équipé d'au moins un emplacement de stationnement en possède en moyenne 1,5.

Le stationnement sur la voirie n'est pas une donnée disponible directement. Nous savons seulement que l'offre de stationnement payant à Tours se chiffre à 3600 emplacements. Nous ne savons pas où sont localisés ces stationnements ni le nombre d'emplacements gratuits. L'idée est donc d'approcher au mieux l'offre réelle en étudiant le nombre d'emplacements visibles sur trois IRIS différents et en modélisant ensuite l'offre sur les autres IRIS. Pour se faire, nous avons utilisé les images satellites pour compté le nombre d'emplacements visibles. Les trois IRIS concernés se situent dans le centre de Tours et sont les suivants : Centre 4, Saint Symphorien 5 et Sanitas Rotonde 3 (IRIS en pointillé sur la carte 3.1). L'IRIS centre 4 se situe dans le cœur historique, tandis que les IRIS Saint-Symphorien 5 et Sanitas-Rotonde sont situés en bordure de celui-ci. Les résultats sont consignés dans le tableau 3.1.

À partir du diagnostic de ces trois IRIS, il est possible de calculer le nombre de stationnements

TABLE 3.1 – Tableau du diagnostic de l’offre de stationnement sur trois IRIS du centre de Tours

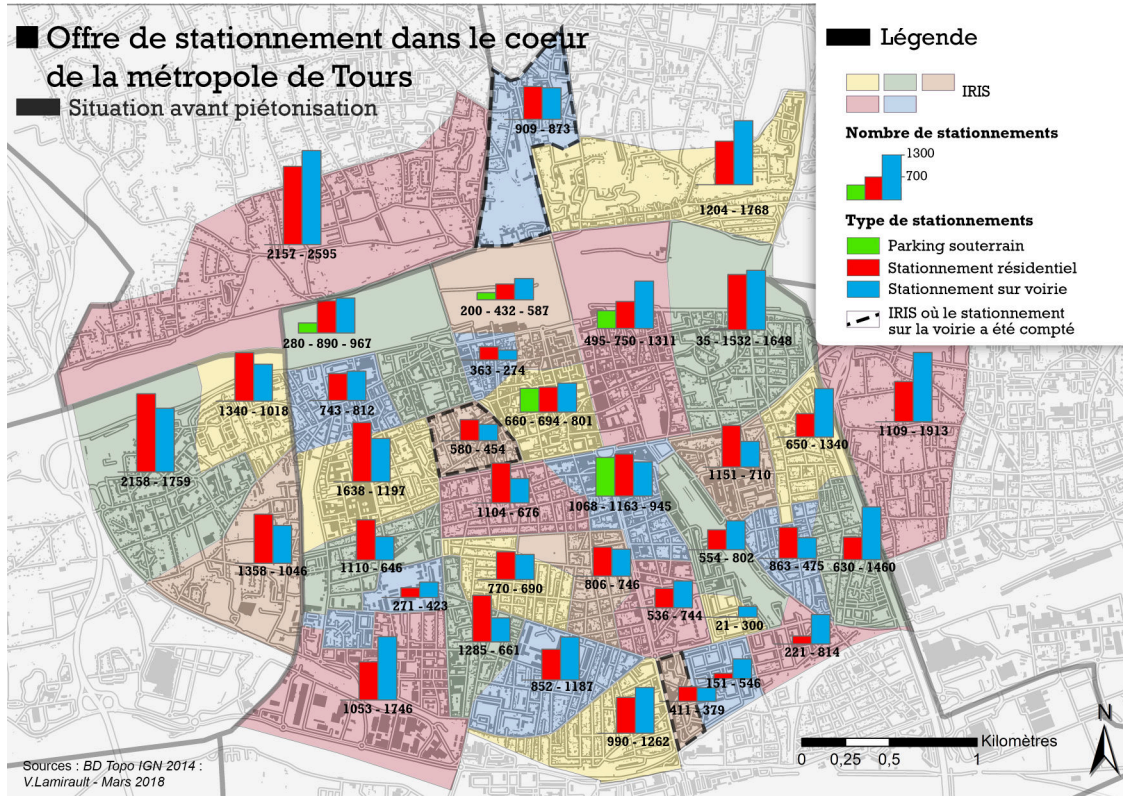
Nom IRIS	Stationnements comptés	Kilomètres de voies	Stationnements par kilomètres
Centre 4	489	4,330	113
Saint Symphorien 5	551	8,318	62
Sanitas Rotonde 3	489	3,615	135
Moyenne			105

sur la voirie pour tous les autres IRIS. Dans la mesure où nous avons considéré trois IRIS appartenant au centre-ville de Tours le calcul est surtout valable pour les autres IRIS du même type. Ici, l’offre de stationnement dans les communes périurbaines ne nous intéresse pas puisque nous cherchons à savoir combien de places sont supprimées lors de la piétonisation du secteur sauvegardé et quelle est l’offre de stationnement pouvant être utilisée par la suite dans les IRIS limitrophes de la future zone piétonne.

Enfin, le stationnement disponible en parkings relais et en parkings souterrains sont des données disponibles auprès de Fil Bleu et des différents gestionnaires. Les données présentées dans la carte 3.2 pour les parkings-relais sont celles de novembre 2013. Les dernières communications de la métropole ne donnant que la fréquentation annuelle. Ce sont environ 211 000 (Tours Métropole, 2018) véhicules qui ont stationné en 2017 dans l’ensemble des parkings relais. Cela représente une moyenne de 578 véhicules par jour. Ce chiffre ignore les inégalités de fréquentation qu’il peut y avoir en fonction du jour de la semaine. Pour les chiffres de 2013, cela représente la fréquentation moyenne pour un jour de semaine. Néanmoins, ces chiffres sont à considérer avec précaution puisqu’ils ont été relevés peu de temps après l’ouverture de la première ligne de tramway et ils ne représentent peut être pas la situation actuelle.

La carte 3.1 représente l’offre de stationnement dans les IRIS du secteur sauvegardé et dans les IRIS limitrophes. La carte 3.2 représente l’offre de stationnement dans les parkings relais sur l’ensemble de l’agglomération ainsi que leur fréquentation actuelle.

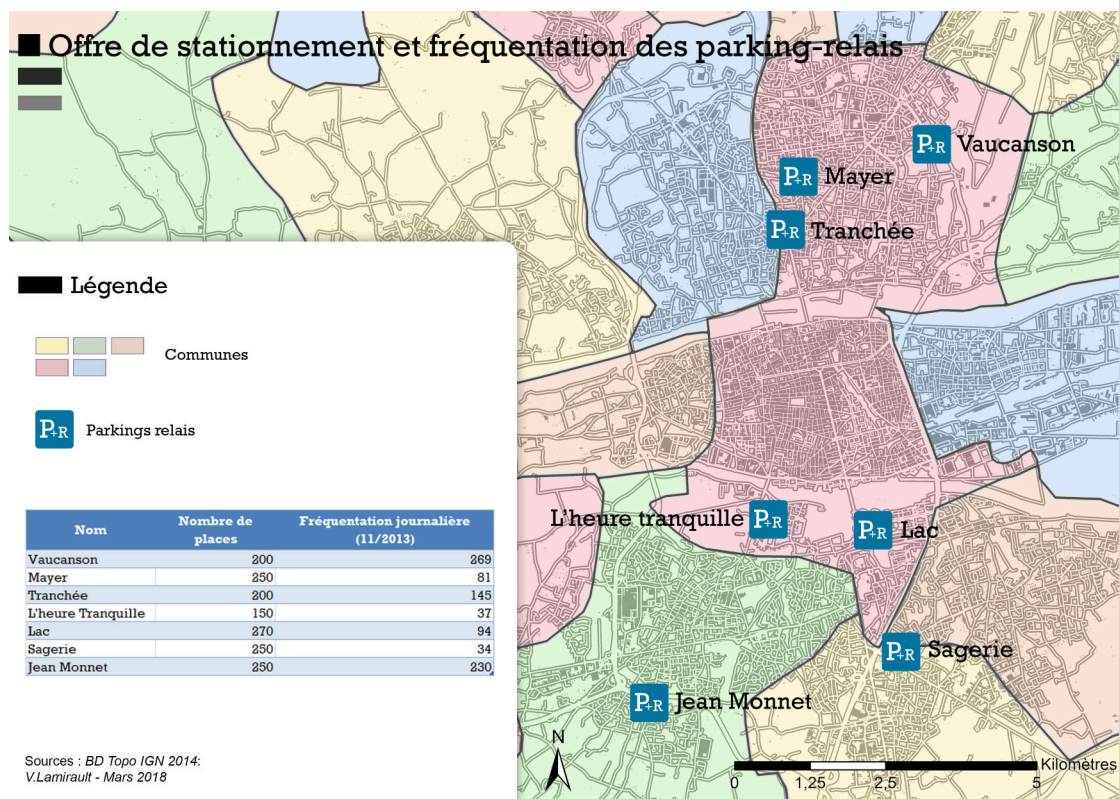
FIGURE 3.1 – Carte de l'offre de stationnement sur la zone centrale



Ce diagnostic de l'offre demeure cependant incomplet. Pour avoir une idée plus exacte de la situation du stationnement en centre-ville, il faudrait connaître le taux de rotation des véhicules sur les stationnements. Ce taux de rotation est le rapport entre le nombre de véhicules stationnés sur une période donnée (un jour par exemple) et le nombre de stationnement disponibles (ce que nous avons appelé l'offre de stationnement). Connaissant ce taux, il serait ensuite possible d'évaluer le nombre de véhicules ne pouvant plus stationner dans la zone piétonne.

Cette donnée n'étant pas disponible pour l'agglomération tourangelles et variant certainement d'un IRIS à l'autre, nous avons fait l'hypothèse que ce taux est de 1. Cela signifie que sur une journée un emplacement n'est occupé que par un véhicule. Dans la section suivante, on cherchera à déterminer l'occupation des stationnements.

FIGURE 3.2 – Carte de l'offre de stationnement en parkings-relais sur la métropole de Tours



3.2. Occupation des stationnements avant piétonisation

L'objectif de cette section est de déterminer l'occupation du stationnement en particulier en centre-ville. Ainsi, cela permettra à l'étape suivante de connaître combien de stationnements supprimés dans le secteur piétonnisé pourront se reporter dans les stationnements restant. Pour se faire, nous avons procédé en plusieurs étapes (résumées dans le schéma 3.3, ci-dessous). La première est d'évaluer dans chaque IRIS la part des véhicules allant se stationner dans les parkings relais. Dans un second temps, nous avons cherché à savoir si le stationnement résidentiel est suffisant pour accueillir tous les véhicules des habitants.

Et enfin dans un troisième temps la simulation des flux réalisée précédemment à l'étape de génération et de distribution des flux (partie 1) nous permet de déterminer l'occupation des stationnements.

FIGURE 3.3 – Logigramme de l'évaluation de l'occupation des stationnements

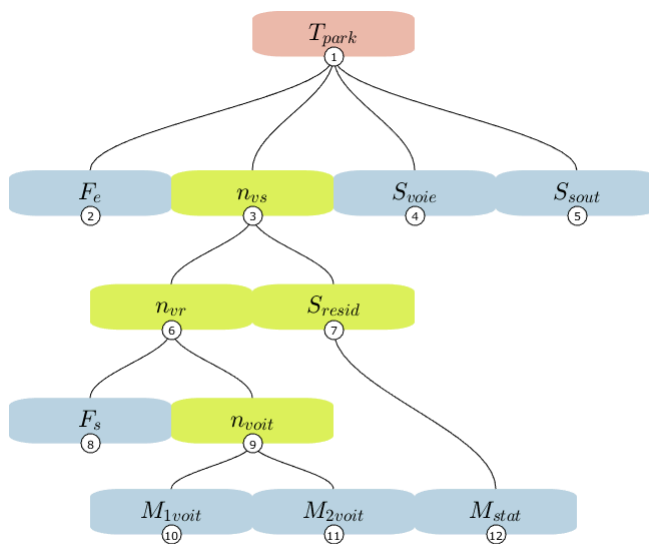


FIGURE 3.4 – Détail des variables et relation du logigramme de l'évaluation de l'occupation des stationnements

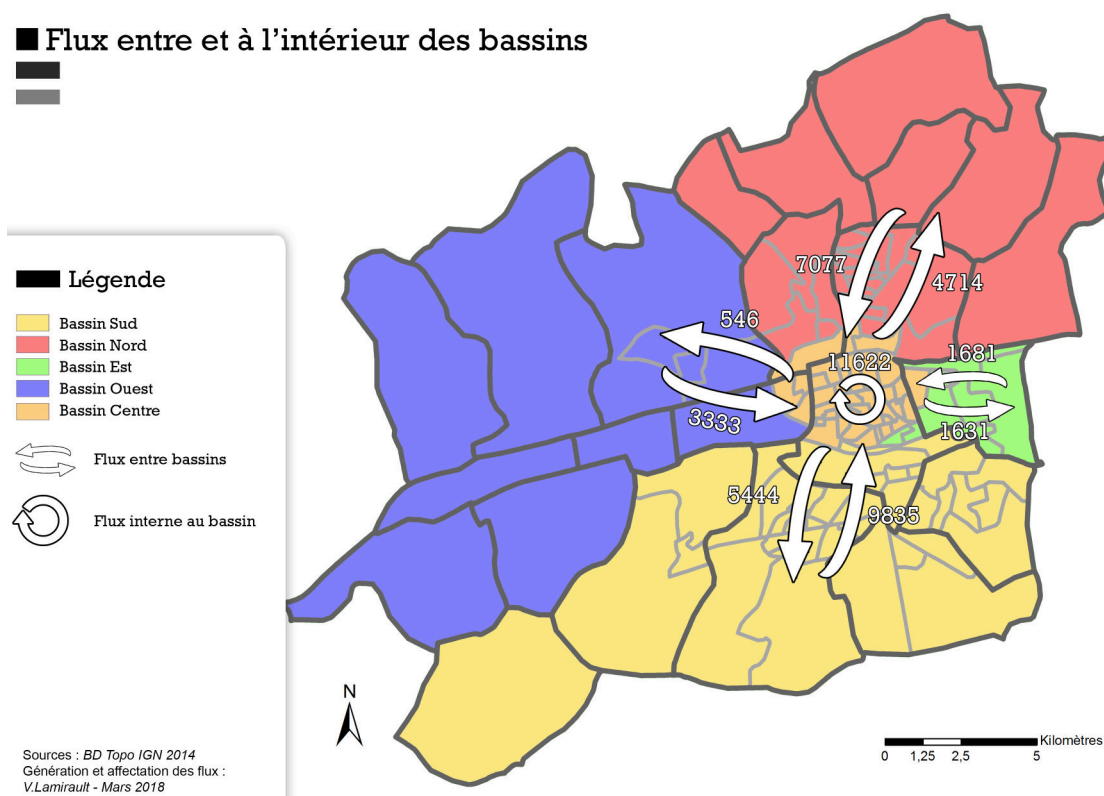
T_{park} : Taux d'occupation des stationnement en voirie et en parking souterrain en sans unité	
1	$T_{park} = \frac{F_e + n_{vs}}{S_{voie} + S_{sout}} . 100$
F_e : Flux entrant dans chaque IRIS diminué des utilisateurs des parkings relais en nombre de voitures	
2	$0 \leq F_e \leq +\infty$
n_{vs} : Nombre de voitures n'ayant pas de place de stationnement en résidence en unité	
3	$si, n_{vr} > S_{resid} : n_{vs} = n_{vr} - S_{resid} ; sinon : n_{vs} = 0$
S_{voie} : Nombre de stationnements sur la voirie en nombre de stationnements	
4	$0 \leq S_{voie} \leq +\infty$
S_{sout} : Nombre de stationnements en parking souterrain en nombre de stationnements	
5	$0 \leq S_{sout} \leq +\infty$
n_{vr} : Nombre de voiture n'étant pas utilisées pour les déplacements domicile-travail ou domici en nombre de voitures	
6	$n_{vr} = n_{voit} - F_s$
S_{resid} : Nombre de stationnements résidentiels par IRIS en nombre de stationnements	
7	$S_{resid} = M_{stat} . 1,5$
F_s : Flux sortants de chaque IRIS, obtenus avec le modèle de Huff en nombre de voitures	
8	$0 \leq F_s \leq +\infty$
n_{voit} : Nombre de voitures par IRIS en nombre de voitures	
9	$n_{voit} = M_{1voit} + 2.M_{2voit}$
M_{1voit} : Nombre de ménages possédant une voiture par IRIS en nombre de ménages	
10	$0 \leq M_{1voit} \leq +\infty$
M_{2voit} : Nombre de ménages possédant 2 voitures ou plus par IRIS en nombre de ménages	
11	$0 \leq M_{2voit} \leq +\infty$
M_{stat} : Nombre de ménages possédant un emplacement de stationnement ou plus en nombre de voitures	
12	$0 \leq M_{stat} \leq +\infty$

3.2.1. Découpage de la zone d'étude en quatre "bassins" et affectation des parkings-relais

Comme vue précédemment dans la carte 3.2, les parkings relais se répartissent essentiellement au Nord et au Sud de l'agglomération. À chaque IRIS est affecté un ou plusieurs parkings relais. On détermine quatre zones (quatre bassins d'où peuvent provenir les flux) : la zone Nord qui comprend les parkings-relais Vaucanson, Tranchée et Mayer ; la zone Sud qui comprend les parkings-relais Sagerie, Lac et Jean Monnet ; la zone Ouest qui comprend le parking-relais de l'Heure Tranquille et la zone Est qui ne compte pas de parking-relais. Enfin, une cinquième zone est délimitée : il s'agit de la zone centrale dans laquelle l'offre de stationnement a été étudiée dans la section précédente.

On calcule ensuite pour chacune de ces zones la somme des flux allant vers la zone centrale. On utilise pour se faire les données issues des étapes de génération et de distribution des flux (voir partie 1). On obtient les résultats représentés sur la carte 3.5.

FIGURE 3.5 – Carte représentant les différents bassins de provenance des flux



On calcule ensuite la part des véhicules pouvant se stationner dans les parkings relais pour chaque bassin. Pour se faire, on utilise les valeurs de la fréquentation des parkings-relais relevées en 2013 (voir carte 3.2). On fait également l'hypothèse que les parkings-relais sont uniquement utilisés par les personnes allant dans la zone centre pour des déplacements domicile-travail ou domicile-étude. En réalité, ces parkings sont certainement aussi utilisés pour d'autres déplacements. On peut notamment penser aux déplacements domicile-achat ou domicile-loisir. L'agglomération de Strasbourg a d'ailleurs observé que l'essentiel de la fréquentation de ses parkings-relais était dû à des déplacements occa-

sionnels (Agence de Développement et d'Urbanisme de l'Agglomération Strasbourgeoise, 2013). Pour ce qui concerne l'agglomération tourangelles, l'absence d'étude sur le sujet nous conduit à l'hypothèse précédente.

Cela représente entre 0 et 7% des flux selon la zone étudiée. Ce taux d'utilisation des parkings relais par zone est ensuite reporté sur chaque IRIS. Les flux sortant de chaque IRIS et allant vers la zone centrale sont diminués selon ce taux. Par exemple, un IRIS situé dans la zone Nord verra son flux diminué de 7%. Ces 7% correspondent aux usagers des parkings relais Vaucanson, Mayer ou Tranchée.

3.2.2. Utilisation des emplacements de stationnement par les résidents

Dans la section précédente, on a évalué le nombre de stationnements résidentiels existants. On cherche maintenant à savoir comment ils sont occupés et si dans certains cas les résidents sont obligés de stationner leur véhicule sur la voirie.

Il faut pour cela connaître le nombre de véhicules possédés par IRIS. Cette donnée est disponible auprès de l'INSEE. On peut ainsi savoir combien de ménages possèdent une voiture et combien des ménages possèdent deux voitures ou plus. En considérant que la plupart des ménages ne possèdent pas plus de deux voitures, on peut déterminer le nombre de véhicules dans chaque IRIS.

Ce nombre de véhicules est diminué du nombre de véhicules quittant l'IRIS pour aller travailler ou pour les études. Ainsi on soustrait au nombre de véhicules de chaque IRIS le flux sortant. On obtient ainsi le nombre de véhicule appartenant aux résidents et restant à stationner dans l'IRIS.

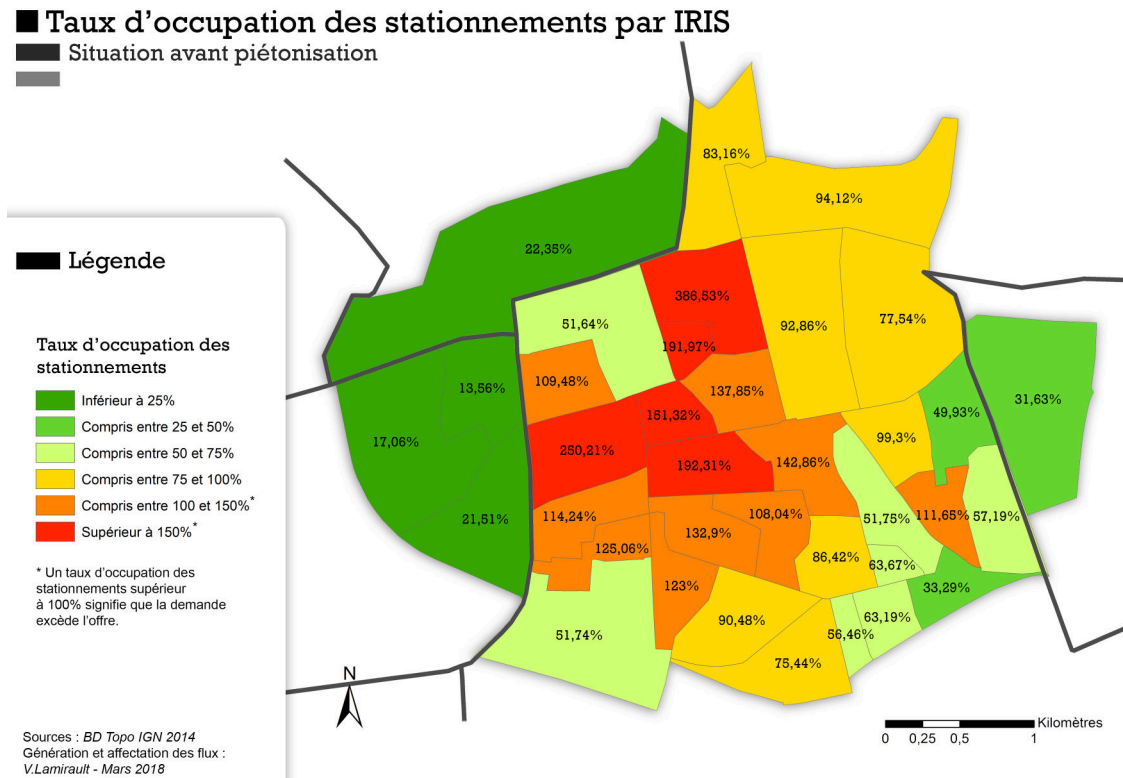
De nouveau, on suppose que ces véhicules sont stationnés dans les résidences, ils occupent donc en priorité les stationnements résidentiels. Si ceux-ci ne suffisent pas, des emplacements de stationnement sur la voirie ou dans les parkings souterrains sont utilisés.

3.2.3. Taux d'occupation des stationnements.

Le taux d'occupation des stationnements est obtenu en additionnant le nombre de véhicules des résidents qui ne peuvent pas stationner chez eux au nombre de véhicules entrant dans chaque IRIS et en divisant ce résultat par le nombre d'emplacements de stationnement présents dans l'IRIS (le nombre de stationnements sur la voirie plus le nombre de stationnement en parking souterrain).

La carte 3.6 expose les résultats pour les IRIS du centre de l'agglomération tourangelles. Sur cette carte, un taux d'occupation des stationnements supérieur à 100% signifie que la demande excède l'offre. Cependant, on n'a ici pas considéré que lorsqu'un usager ne trouve pas de stationnement dans un IRIS il puisse aller dans un IRIS voisin pour rechercher un espace pour se garer. Sur ce territoire, le taux d'occupation des stationnements atteint 85%. Il y a ainsi près de 5500 places libres. Cette valeur est toutefois à prendre avec précaution compte tenu des nombres hypothèses qui ont conduit à sa détermination.

FIGURE 3.6 – Carte de l'offre de stationnement sur la zone centrale



3.3. Occupation des stationnements après piétonisation et nouveaux parkings-relais

Cette dernière section se propose d'étudier les impacts de la piétonisation du secteur sauvegardé sur le stationnement. Dans un premier temps, nous étudierons l'évolution de l'offre et en particulier dans le secteur sauvegardé (qui correspond à la zone piétonne). Ensuite, nous verrons si les possibilités de stationnement sont suffisantes autour du secteur piéton pour que les résidents de ce secteur puisse stationner leurs véhicules. Enfin nous reverrons le dimensionnement des parkings-relais en intégrant leur fréquentation actuelle exposée dans la première section de cette partie.

3.3.1. Modification de l'offre de stationnement suite à la piétonisation

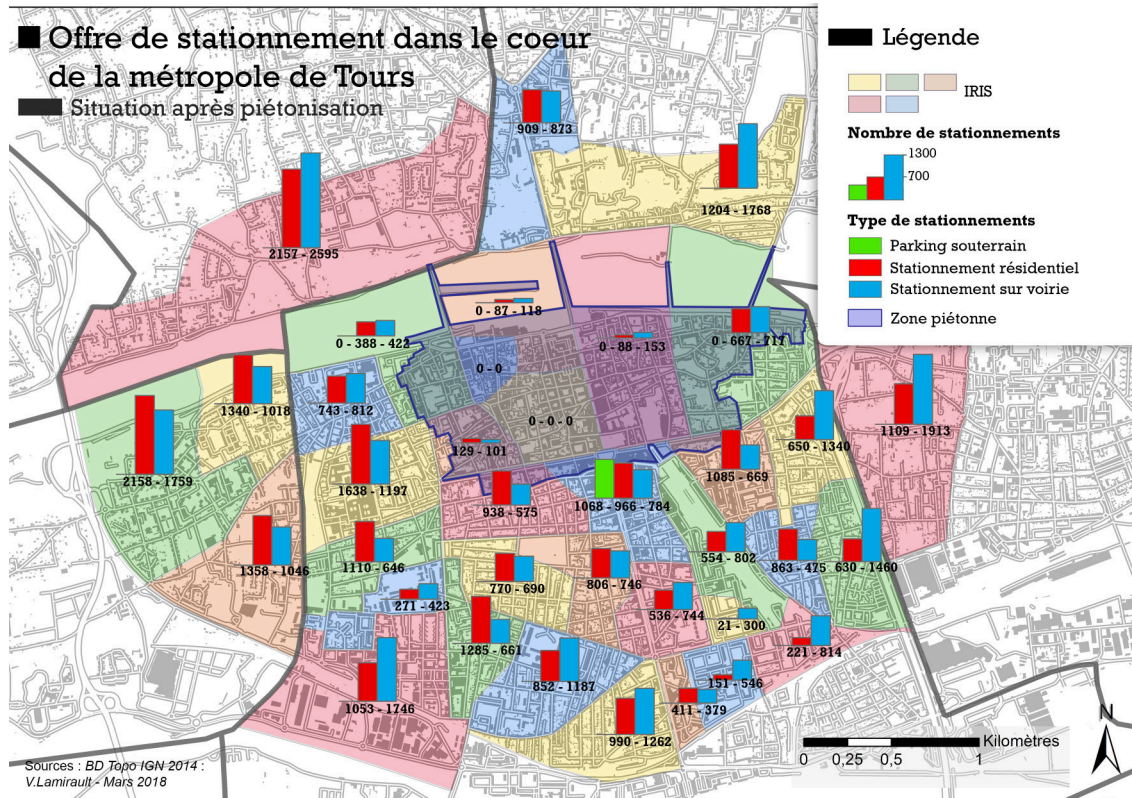
À la suite de la piétonisation du secteur sauvegardé, l'offre de stationnement se trouve modifiée. En effet, les stationnements sur les voies désormais piétonnes n'existent plus. Beaucoup de parkings souterrains sont devenus inaccessibles. Seul le parking de la gare a été conservé. Enfin, les résidents ne peuvent normalement plus rentrer chez eux en voiture. Le stationnement résidentiel se trouve donc lui aussi limité voir pour certain IRIS complètement supprimé.

Pour le stationnement sur la voirie, on a recalculé le linéaire de voirie pour les IRIS tout ou en

partie piétonnisée. On a ensuite recalculé le nombre de stationnements comme énoncé dans la section 3.1. Pour les stationnements résidentiels, on suppose que leur nombre dépend du fait qu'il y a ou non une route accessible aux voitures devant l'habitation. On a donc calculé la proportion de route supprimés et diminué le nombre de stationnements résidentiels dans les mêmes proportions.

On obtient le résultat présenté sur la carte 3.7. Pour certains IRIS les stationnements ont ainsi été totalement supprimés, pour d'autres ils ont seulement été diminués.

FIGURE 3.7 – Carte de l’offre de stationnement sur la zone centrale



Le tableau 3.2 donne l’évolution du nombre de stationnement entre la situation avant piétonisation et la situation après piétonisation.

TABLE 3.2 – Tableau de l’évolution du nombre stationnement avant et après piétonisation

Type de stationnement	Avant piétonisation	Après piétonisation	Différence
Voirie	35675	30841	-4834
Résidentiel	32457	28141	-4315
Souterrain	2738	1068	-1670
Total	70870	60050	-10819

3.3.2. Possibilités de reports du stationnement résidentiel

Les résidents du secteur piéton possédant une voiture ne peuvent plus se garer sur leur stationnement résidentiel suite à la piétonisation. Si il n'y a pas de changement des habitudes ou de la motorisation de ces ménages, ces voitures doivent pouvoir se stationner quelque part. L'objet de cette section est de savoir si l'offre présentée par la carte 3.7 est suffisante pour accueillir tous ces véhicules.

Si on raisonne sur l'ensemble de la zone centrale, il y a 42 231 voitures à stationner pour une offre en stationnement résidentiel de seulement 28 141 places (contre 32 457 avant piétonisation). 14 385 véhicules sont donc obligés d'utiliser l'offre de stationnement sur la voirie. Celle-ci est largement suffisante puisque plus de 30 000 emplacements sont disponibles. Cette première étude, permet de se rendre compte que l'offre de stationnement est amplement suffisante. Néanmoins, elle suppose qu'une personne habitant le secteur piéton puisse se rendre à l'autre bout de la zone centrale pour y retrouver sa voiture et utilise donc un autre moyen de transport entre sa voiture et son domicile.

On réitère la même opération, mais au lieu de reporter les stationnements manquants n'importe où dans la zone, on recherche d'abord des emplacements dans les IRIS les plus proches. On s'intéresse plus particulièrement à la zone piétonne. Ainsi, pour chaque IRIS piétonnisé, on recherche des stationnements disponibles dans les IRIS limitrophes et dans les autres IRIS piétonnés si toutefois il reste des emplacements disponibles. Les résultats de cette recherche sont consignés dans le tableau 3.3.

TABLE 3.3 – Tableau de l'évolution du nombre stationnement avant et après piétonisation

IRIS	Nombre de	Stationnements	Stationnements sur voirie	Stationnements manquants	Stationnements restants
	voitures	résidentiels			
La Fuye Velpeau 1	1096	1085	669	0	658
Grammont 1	1599	939	575	85	0
Grammont 2	1397	966	784	0	352
Centre 1	1383	88	153	1143	0
Centre 2	606	87	118	401	0
Centre 3	804	0	0	804	0
Centre 4	713	129	101	482	0
Centre 5	1107	0	0	1107	0
Cathédrale	1978	667	717	594	0
Lamartine 1	1248	389	422	437	0
Total	11930	4349	3539	5053	1010
Offre restante dans les IRIS limitrophes et dans les IRIS piétonnés					5363

Finalement, l'offre de stationnement semble suffisante même si la différence entre le nombre de stationnements disponibles et la demande de stationnement est très faible. On aurait ainsi une pression importante sur le stationnement dans le centre-ville de Tours.

3.3.3. Nouveau dimensionnement des parkings relais

On s'intéresse maintenant aux flux résiduels c'est-à-dire aux flux n'ayant pas pu être affectés du fait de la piétonisation du secteur sauvegardé. Pour se faire, on suppose que l'ensemble des personnes habitant dans l'un des quatre bassins périphériques se rendront dans la zone piétonnisée par l'intermédiaire d'un parking-relais. Leur déplacement se décompose ainsi en deux temps : un premier en voiture jusqu'au parking-relais puis un second en transports en commun depuis le parking relais vers leur lieu de travail ou d'étude situé dans le secteur piétonnisé.

Lors de la précédente modélisation, nous n'avions pas pris en compte l'utilisation connue des parking-relais. Il s'agit ici de ne pas négliger cette utilisation. Selon la définition donnée dans la section 3.1, les parkings-relais sont utilisés uniquement pour des déplacements (domicile-étude et domicile-travail) venant d'une des quatre zones définies et allant vers la zone centrale. Ces flux correspondent en partie aux flux résiduels et pour le reste aux flux allant vers le secteur non piétonnisé de la zone centrale.

Les étapes de la modélisation sont les suivantes. Dans un premier temps, on diminue les flux résiduels du nombre de voitures utilisant déjà les parkings-relais. On applique pour se faire la même méthode que celle-utilisée dans la section 3.2.1. On fait l'hypothèse qu'un emplacement en parking-relais n'est utilisé que par un seul véhicule chaque jour. On peut ainsi déterminer le nombre de places restantes en parking-relais.

Ensuite, la somme des flux résiduels par zone nous donne le nombre de véhicules ne pouvant plus se rendre dans le secteur piétonnisé. À partir de là, on peut redimensionner les parkings-relais ou tout du moins prévoir le besoin de stationnement toujours en supposant que toutes les personnes ne pouvant plus accéder au centre-ville en voiture se dirigeront vers des parkings relais.

Les résultats sont consignés dans le tableau 3.4.

TABLE 3.4 – Tableau de l'évolution du nombre stationnements avant et après piétonisation

Bassin	Flux résiduels (hors stationnements P+R déjà utilisés)	Offre P+R restante	Besoin de stationnements	Surface de stationnement supplémentaire nécessaire (ha)	Besoin de stationnements corrigés (S9)
Nord	1972	224	1748	4,37	1142
Est	454	0	454	1,13	916
Sud	2500	412	2088	5,22	1241
Ouest	867	123	744	1,86	1403
Centre	5587	0	5587	13,97	//

Si compare ces résultats à ceux obtenus au semestre 9 (Blanloeil F. Lamirault V. PFE Semestre 9), les besoins de stationnement sont légèrement supérieurs (4702 emplacements pour la modélisation

du semestre 9 et 5034 emplacements pour la nouvelle modélisation). Les comparaisons entre zones ne sont pas possible car leur délimitation n'est pas la même. Si on convertit ce nombre de stationnements en une surface, cela revient à créer au total 12,59 hectares de stationnements. Même si on envisage la construction de parkings souterrains ou de parkings silos cela représente une surface importante.

Pour les personnes vivants dans la zone centrale mais n'habitant pas le secteur piéton, cela représente près de 5600 emplacements de stationnements. Comme on l'a vue précédemment, il existe de nombreux emplacements disponibles autour de la zone piétonne mais cette offre est à peine suffisante (environ 5300 emplacements disponibles après utilisation par les résidents). Dans ce cas, il semble plus opportun d'envisager que ces personnes utilisent les transports en commun pour se rendre dans le secteur piétonnisé.

Finalement, la piétonisation d'une aussi vaste de zone, nécessite de se poser de nombreuses questions. À travers la problématique du stationnement, on a pu voir que l'implantation d'une zone piétonne amenait à reconsidérer l'ensemble des mobilités. Par exemple, si les résidents du secteur piéton conservent autant de véhicules qu'ils en possèdent actuellement, cela pose la question du stationnement de ces véhicules. Si on souhaite que la zone soit exclusivement piétonne, il est difficilement envisageable d'autoriser le stationnement résidentiel (surtout sur un secteur aussi vaste!). Comme on a pu le voir au cours de cette partie, si le stationnement se reporte sur les zones avoisinantes, cela crée une pression très élevée sur celui-ci.

Conclusion

Les modèles développés au semestre 9 pour générer les flux et simuler la demande de stationnement se basaient sur de nombreuses hypothèses. Dans ce projet, nous les avons reconsidérées une à une et tenté, pour certaines, de proposer des pistes de raffinement.

Le modèle de simulation de la demande de transport se base sur le modèle dit "à quatre étapes". Celui-ci fait se succéder les étapes de génération, de distribution, de choix modal et d'affectation des flux. Nous avons proposé dans ce projet des pistes de raffinement pour chacune d'elles.

Les étapes de génération et de distribution des flux ont été traitées ensemble à travers le modèle de Huff. Ce modèle nous a permis de générer et distribuer les flux en fonction de l'attractivité de chacune des zones par rapport aux autres. Le raffinement a ici consisté à caler un des paramètres de ce modèle en effectuant une comparaison des flux simulés avec ceux relevés par l'INSEE. Ce paramètre est le frein au déplacement. C'est un exposant sur la distance qui permet de lui donner plus ou moins d'importance et qui est elle aussi un paramètre du modèle de Huff. Les simulations ont été réalisées avec plusieurs freins au déplacement. La valeur pour laquelle les flux simulés sont les plus proches de ceux sondés par l'INSEE est 0,6. Initialement, un seul motif de déplacement était étudié : les déplacements domicile-travail. Il a été proposé d'en rajouter un pour tenter d'améliorer le modèle. De par sa similarité avec le motif domicile-travail, c'est le motif domicile-étude qui a été choisi. En effet, ces déplacements présentent un caractère contraint tout comme les déplacements domicile-travail. La méthode de génération et de distribution est la même que précédemment et le frein au déplacement utilisé est celui obtenu par le calage du modèle (0,6).

Tout comme la modélisation réalisée au premier semestre, l'étape de choix modal n'a pas été traitée. En effet, nous avons dès le départ, dans le choix des données, uniquement considéré les personnes se déplaçant en voiture.

Quatrième et dernière étape du modèle, l'étape d'affectation. Celle-ci a été largement modifiée pour intégrer une limite de capacité et un calcul de la vitesse de parcours sur chaque tronçon en fonction du flux supporté par celui-ci. Ainsi, grâce aux équations liant le débit à la vitesse et à la concentration, nous avons pu déterminer une capacité théorique pour chacun des tronçons de notre réseau. Ensuite, par itération du processus d'affectation, nous avons pu calculer les vitesses réelles sur chacun des tronçons routier en fonction du flux supporté par celui-ci et d'attributs tels que la vitesse maximum autorisée, la concentration critique de véhicules, et la largeur des voies. Du fait de la faible proportion des flux simulés par rapport à l'ensemble des flux le nombre d'itérations nécessaires pour arriver à une situation stable est plutôt faible (les motifs domicile-travail et domicile-étude sur lesquels nous nous sommes penchés représente seulement 28% de l'ensemble des déplacements). Ainsi, au bout de trois itérations nous avons obtenu des flux fixes. En comparant les résultats obtenus avec

ceux produits au semestre 9, nous avons constaté des différences. L'affectation telle que réalisée pour ce projet, permet d'utiliser une plus grande proportion du réseau routier. Les grands axes, très utilisés lors de la première modélisation, supportent globalement un flux moins important. La comparaison des flux simulés avant piétonisation du secteur sauvegardé avec les comptages a fait apparaître une certaine similitude entre ces deux données. Nous avons observé de grandes différences entre les deux, mais après ajustement les données des comptages sont du même ordre de grandeur que les flux simulés. Notre modèle n'est pas nécessairement bien ajusté à la réalité pour une analyse à l'échelle du tronçon (il faudrait ici réaliser un calage poussé ou réaliser l'affectation d'une manière différente pour que ce soit le cas). Néanmoins, compte tenu des volumes de trafic observés, les analyses semblent valables à l'échelle de l'ensemble du réseau. Enfin, lorsque nous avons comparé les flux simulés avant et après piétonisation du secteur sauvegardé, nous avons observé une tendance à la diminution des flux dans les zones périurbaines. Nous avons expliqué cela par le fait qu'une partie des flux venant ou allant vers ces zones n'avaient pas été affectés (ce sont les flux résiduels). Nous avons également observé que suite à la piétonisation du centre-ville, les flux qui traversaient ce secteur c'étaient reportés sur les grands axes en périphérie en priorité.

Après avoir modélisé la demande de transport grâce au modèle à quatre étapes, nous avons cherché à modéliser plus finement la demande de stationnement. Le travail réalisé au semestre 9 ne traitait pas cet aspect ce que nous avons estimé comme un manque important pour pouvoir déterminer une nouvelle offre de stationnement pour les personnes allant dans la zone piétonne. Nous avons donc simulé l'offre de stationnement (résidentiel, sur la voirie, en parking souterrain et en parking relais) en utilisant des données disponibles auprès de divers organismes producteurs (INSEE, Fil Bleu, gestionnaire de parkings souterrains . . .) ou à partir de comptages réalisés par nous-même (pour le stationnement sur la voirie notamment). Nous avons ensuite déterminé l'occupation de ces stationnements en utilisant les données issues des étapes de génération et de distribution. La même simulation a ensuite été réalisée dans la situation après piétonisation. Les résultats font apparaître une offre de stationnement bien utilisée avant piétonisation et pratiquement saturé après piétonisation. Les simulations ne portant que sur les déplacements domicile-travail et domicile-étude, il convient de souligner que l'utilisation des stationnements est en réalité certainement plus importante. Enfin, l'offre de stationnement en parking relais a été redimensionnée pour intégrer les nouveaux flux résiduels (plus importants que ceux simulés au semestre 9) et l'utilisation actuelle des parkings-relais.

Les notions abordés au cours de ce projet sont très vastes et n'ont pas pu être abordés en profondeur. De plus, compte tenu du temps imparti, la prise de recul nécessaire pour pouvoir évaluer et valider ce qui a été fait est plutôt difficile. Néanmoins, si nous essayons de prendre un peu de hauteur sur le travail réalisé, nous pouvons nous poser quelques questions.

Les modélisations ont été faites en considérant la situation actuelle. Ainsi, en dehors de l'implantation de la zone piétonne rien n'a changé : ni les habitudes de la population, ni leur mode de vie. Cela revient à implanter du jour au lendemain cette zone piétonne ce qui d'après les résultats semble difficilement envisageable. Nous pensons notamment à la question du stationnement où un report modale est nécessaire si on ne veut pas transformer les espaces entourant la zone piétonne en de vastes parkings. Une solution à cette problématique serait d'implanter des parkings en ouvrage

à proximité de la zone piétonne. Dans le cas de la ville de Tours, l'environnement est très contraint (centre historique et zone inondable) et rend ce type d'aménagement difficile à réaliser et coûteux. Il convient donc d'avoir une réflexion plus globale sur la part de chaque mode de transport et donc d'envisager que certains automobilistes laissent leur voitures chez eux (ou s'en séparent) et préfèrent un autre mode de transport. Enfin, la piétonisation d'une telle zone, implique de considérer les flux sur l'ensemble du territoire. Nous pouvons ici nous demander si l'implantation d'une zone piétonne modifie aussi les choix d'itinéraires à distance de cette zone.

Finalement, les questions de mobilités ne semblent pouvoir être abordés qu'en considérant plusieurs modes de déplacements voir tous les modes et en particulier lorsqu'on souhaite réaliser un aménagement aussi important que celui proposé dans ce projet.

Bibliographie

- Agence de Développement et d'Urbanisme de l'Agglomération Strasbourgeoise, 2013. *Stratégie d'implantation et de dimensionnement des P+R*.
- ALVES, C, 23/02/2011. *Voiture Moyenne 2010 : plus grande, plus chère*. [En ligne][consulté le 06/02/2018]. Disponible sur : <http://www.autonews.fr/dossiers/industrie/66578-voiture-moyenne-2010-plus-grande-plus-chere/>
- Association Prévention Routière, 30/03/2016. *Tenir ses distances*. Ee ligne][consulté le 26/01/2018]. Disponible sur : <https://www.preventionroutiere.asso.fr/2016/03/30/tenir-ses-distances/>
- BLANLOEIL, F., LAMIRAULT, V., 2017. *La piétonisation du centre-ville de Tours et ses conséquences. Etude de l'impact d'une piétonisation sur les flux et les besoins en stationnement*.
- BONNEL P., 2001. *Prévision de la demande de transport*. Université Lumière Lyon 2. Faculté de Sciences Economiques et de Gestion. 409p
- COHEN, S., DANECH-PAJOUH, M., Janvier 2000. *Initiation à l'ingénierie du trafic routier*. [En ligne][consulté le 16/02/2018]. Disponible sur : <http://mdpdanech.free.fr/PDF-rap/initiation-traffic.pdf>
- COQUAND, R., 1972. *Routes, circulation, tracé, construction*. Septième édition. Editions Eyrolles. 286p.
- DIMON, C., 2012. *Contributions à la modélisation et la commande des réseaux de trafic routier*. Ecole Centrale de Lille. [En ligne][consulté le 22/02/2018]. Disponible sur : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00801762/document>
- ENAULT, C., 2006. *Les vitesses dans l'aire urbaine dijonnaise : un modèle fondé sur la fonction logistique et la courbe de congestion routière débit-vitesse*. Cybergeog. [En ligne][consulté le 01/03/2018]. Disponible sur : <http://journals.openedition.org/cybergeog/2978>
- FIELD, A. 2014. *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics*. Sage. 916p.
- FIL BLEU. *Parkings surclassés*. [En ligne][consulté le 14/03/2018]. Disponible sur : <https://www.filbleu.fr/>
- GREENSCHILD B.D., 1935. *A study of traffic capacity, Proceedings highwayre-search Record*. Washington. p. 448-477
- HUFF D.L., 1962. *Determination of intra-urban retail trade areas* Real Estate Research Program, Graduate Schools of Business Administration, University of California. 46 p.
- Institut d'Aménagement et d'Urbanisme d'Île de France, Mai 2017. *Le quotidien des franciliens à travers leurs déplacements : une multitude d'agendas*. [En ligne][consulté le 01/02/2018]. Disponible sur : https://www.iau-idf.fr/fileadmin/NewEtudes/Etude.1371/NR.745_web.pdf
- Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, 2010. *Recensement de la population - Les déplacements domicile - lieu de travail*. [En ligne][consulté le 04/03/2018]. Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/2022115/fichedepldomtravail.pdf>
- Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, 2016. *Ménage (recensement de la population)*. [En ligne][consulté le 05/02/2018]. Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/defini>

- Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques, 2016. *Définitions des concepts : Recensement de la population*. [En ligne] [consulté le 05/02/2018]. Disponible sur : <https://www.insee.fr/fr/in>
- GUILLERMIN, J., 29/11/2013. *Des résultats contrastés pour les parkings relais*. La nouvelle république du centre-ouest. [En ligne][consulté le 17/03/2018]. Disponible sur : <https://www.lanouvellerepubl>
resultats-contrastes-pour-les-parkings-relais
- LITZLER J-B., LE CAIN B., 16/09/2015. *Pourquoi vouloir limiter la vitesse à 30km/h en ville ?*. Le Figaro. [En ligne][consulté le 21/02/2018]. Disponible sur : <http://www.lefigaro.fr/automobile/20150916ARTFIG00223-pourquoi-vouloir-limiter-la-vitesse-a-30-kmh-en-ville.php>
- LECLERCQ, L., 2002. *Modélisation dynamique du trafic et application à l'estimation du bruit routier*. Laboratoire d'ingénierie circulation transport. [En ligne][consulté le 28/02/2018]. Disponible sur : <http://csidoc.insa-lyon.fr/these/2002/leclercq/page-de-titre.pdf>
- MAÏZIA M., 2016. *Système urbains et transport*. [En ligne][consulté le 16/02/2018]. Disponible sur : https://drive.google.com/file/d/0B3iBhayHD_0_WmJoX2d3OXdLWmM/view
- Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche, 2010. *La vie étudiante : transports et déplacement quotidiens*. [En ligne][consulté le 22/02/2018]. Disponible sur : https://publication.enseignement-recherche.gouv.fr/eesr/6/EESR6_ES_15-la_vie_etudiante_transports_et_deplacements_quotidiens.php
- NETTER, M., Mars 1974. *Capacités de transport, coût de transport et organisation de l'espace..* Revue économique, Vol. 25, No. 2, Aménagement de l'espace et transports routiers. p257-274.
- OMNIL, Janvier 2013. *Enquête globale transport : les Franciliens de 15-25 ans*. [En ligne][consulté le 01/02/2018]. Disponible sur : http://www.omnil.fr/IMG/pdf/egt2010_15_25_ans_bd.pdf
- TOURS METROPOLE, Février 2018. *Bilan de l'année 2017 Fil Bleu, communiqué de presse de Tours Métropole*. [En ligne][consulté le 15/03/2018]. Disponible sur : http://www.agglo-tours.fr/index.php?idtf=228&TPL_CODE=TPL_DOSSIERDETAIL&PAR_TPL_IDENTIFIANT=588

Annexe 1

NB : seuls les établissements dont l'effectif a été trouvé sont indiqués dans les tableaux ci-dessous.

TABLE 3.5 – Tableau des effectifs de l'enseignement supérieur

Nom	Effectif	IRIS
UFR Site Jean Luthier	2182.4	Paul Bert
UFR Site Grandmont	4637	Montjoyeux
UFR Site Tonnellé	6274	Rabelais-Tonnellé 1
UFR Site 2 lions	5456	Deux Lions Gloriette
UFR Site Tanneurs	8184	Centre 2
ETS	400	Grammont 1
Ecole Brassart	212	Les Fontaines 2
ESCEM	550	Les Fontaines 2
Groupe Pigier	135	Centre 1
Institut de Touraine	2500	Centre 5
ESBA Tours	150	Lamartine 1
IPMS	200	Lakanal-Strasbourg 2

TABLE 3.6 – Tableau des effectifs des lycées

Nom	Effectif	IRIS
Lycée privé Saint-Gatien	525	Sud Est
Lycée Balzac	1130	Grammont 1
Lycée Choiseul	1381	Douets Milletiere 1
Lycée Descartes	1680	Centre 1
Lycée Grandmont	2433	Montjoyeux
Lycée Jacques de Vaucanson	1377	Saint-Symphorien 2
Lycée Jean Monnet	1236	Sud Est
Lycée Paul-Louis Courier	1635	Cathédrale
Lycée polyvalent privé d'esthétique cosmétique de Touraine	179	Grammont 4
Lycée privé Marmoutier	359	Sainte-Radegonde 2
Lycée privé Sainte-Ursule	737	Centre 1
Lycée privé Saint-François Saint-Medard	536	Lamartine 1
Lycée privé Saint-Grégoire	338	Paul Bert
Lycée privé Saint-Vincent de Paul	404	Lamartine 1
Lycée privée Sainte-Marguerite	506	Branchoire
Lycée professionnel Albert Bayet	713	Lamartine 2
Lycée professionnel d'Arsonval	368	Rabière Est
Lycée professionnel François Clouet	616	Europe 1
Lycée professionnel Gustave Eiffel	290	Europe 5
Lycée professionnel Henri Becquerel	394	RochePINARD
Lycée professionnel Martin Nadaud	408	Est
Lycée professionnel privé Saint-Martin	95	Centre 5
Lycée professionnel Victor Laloux	522	Montjoyeux

Annexe 2

FIGURE 3.8 – Carte représentant les flux affectés à l'issu de la première itération avant piétonisation

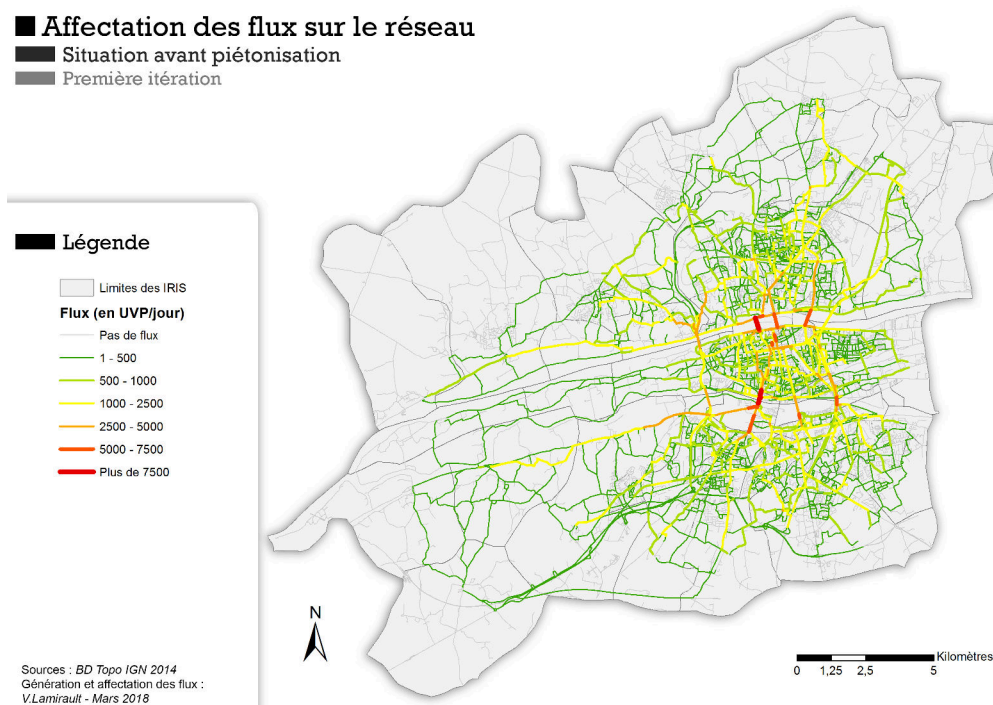


FIGURE 3.9 – Carte représentant les flux affectés à l'issu de la deuxième itération avant piétonisation

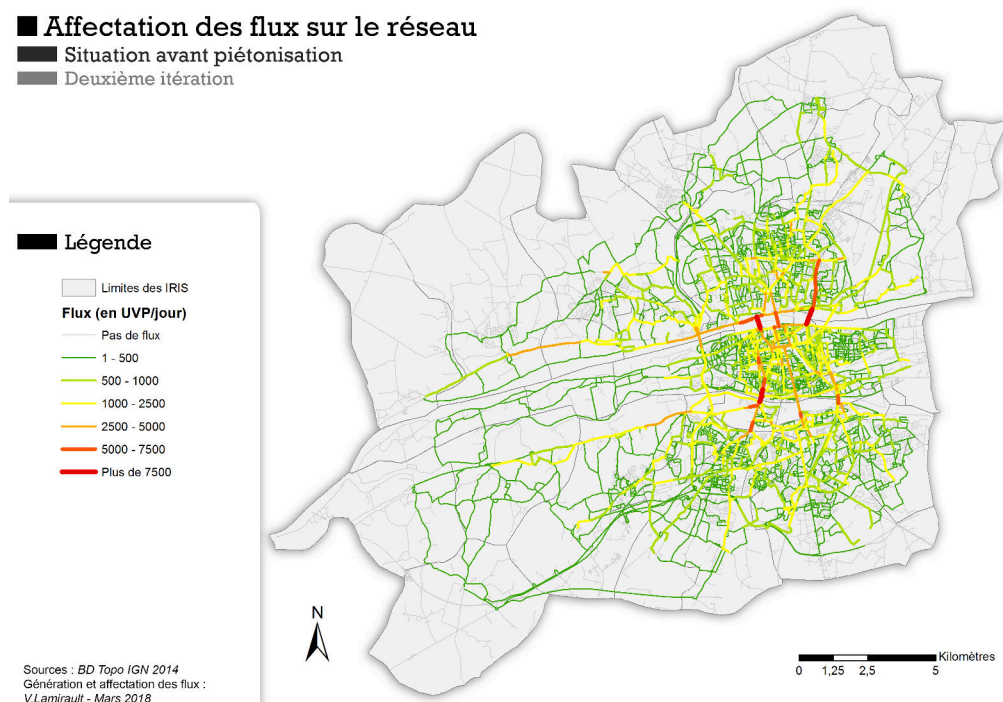


FIGURE 3.10 – Carte représentant les flux affectés à l'issu de la troisième itération avant piétonisation

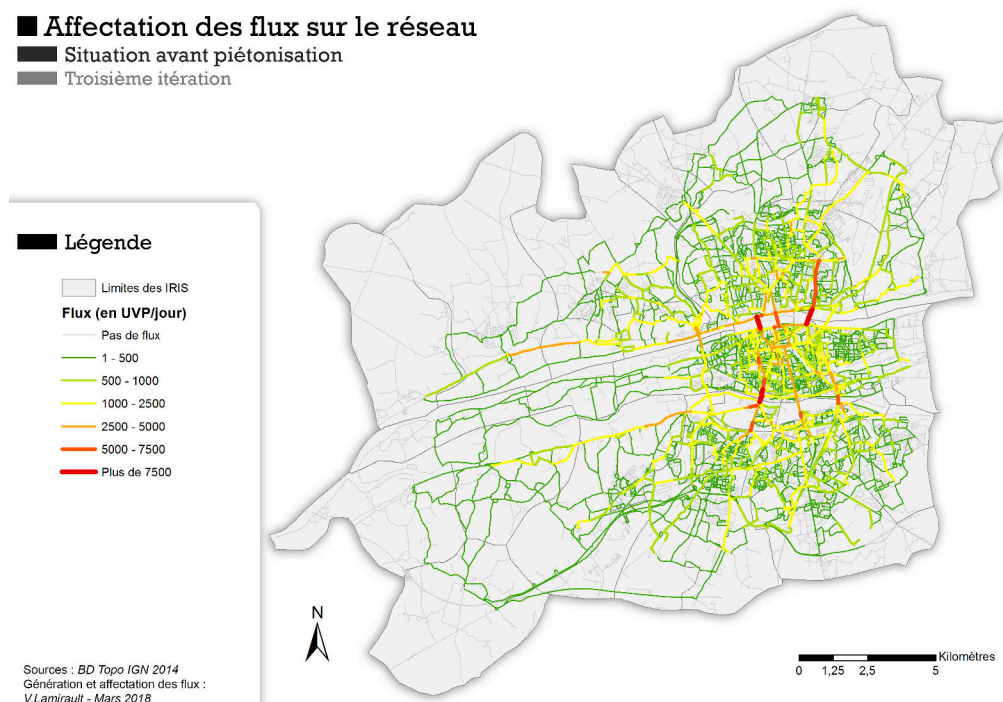


FIGURE 3.11 – Carte représentant les flux affectés au semestre 9 avant piétonisation

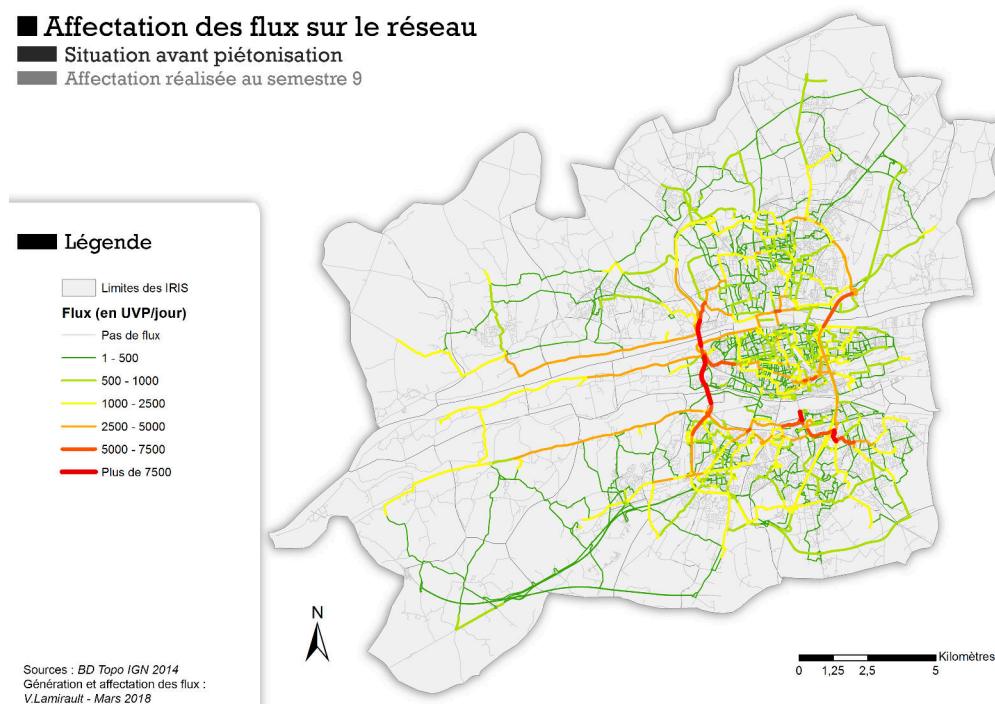


FIGURE 3.12 – Carte représentant les flux affectés à l'issue de la première itération après piétonisation

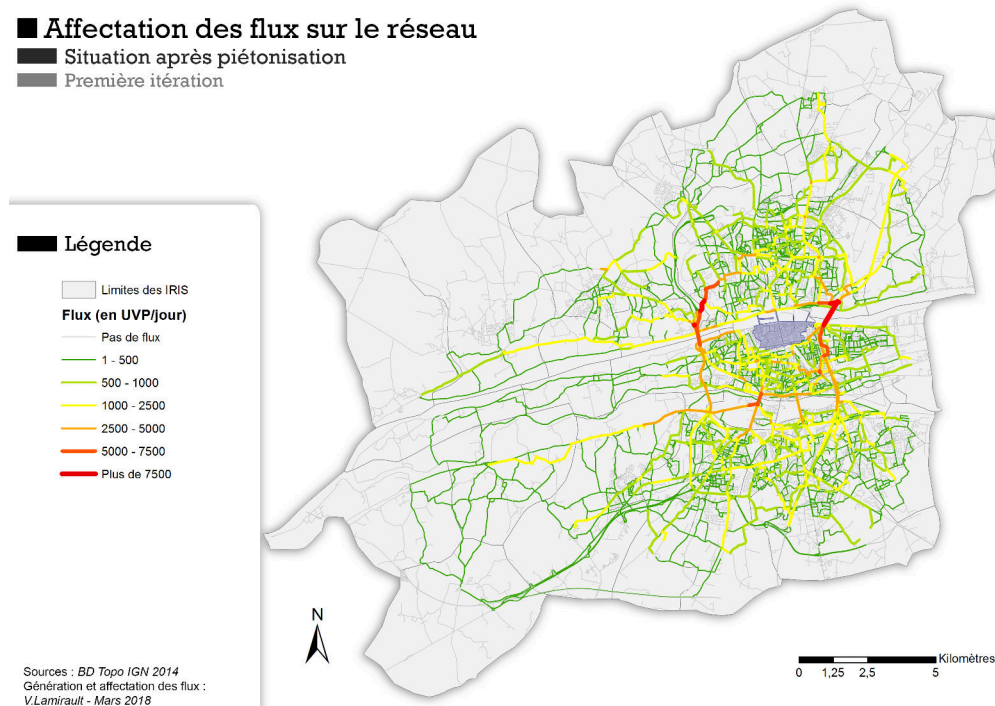


FIGURE 3.13 – Carte représentant les flux affectés à l'issu de la deuxième itération après piétonisation

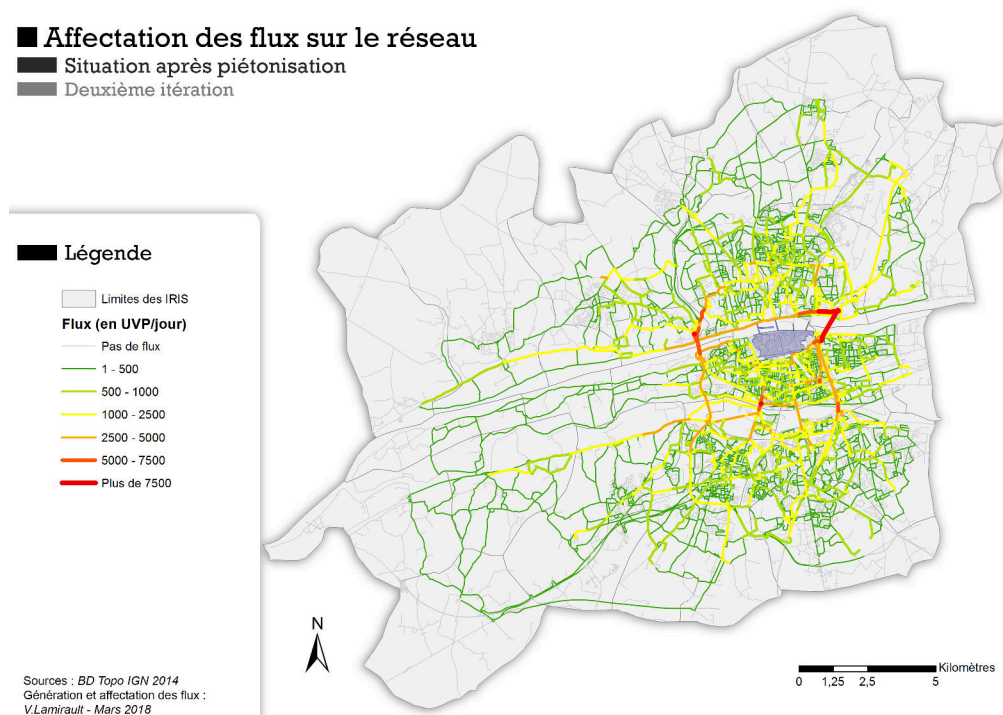


FIGURE 3.14 – Carte représentant les flux affectés à l'issu de la troisième itération après piétonisation

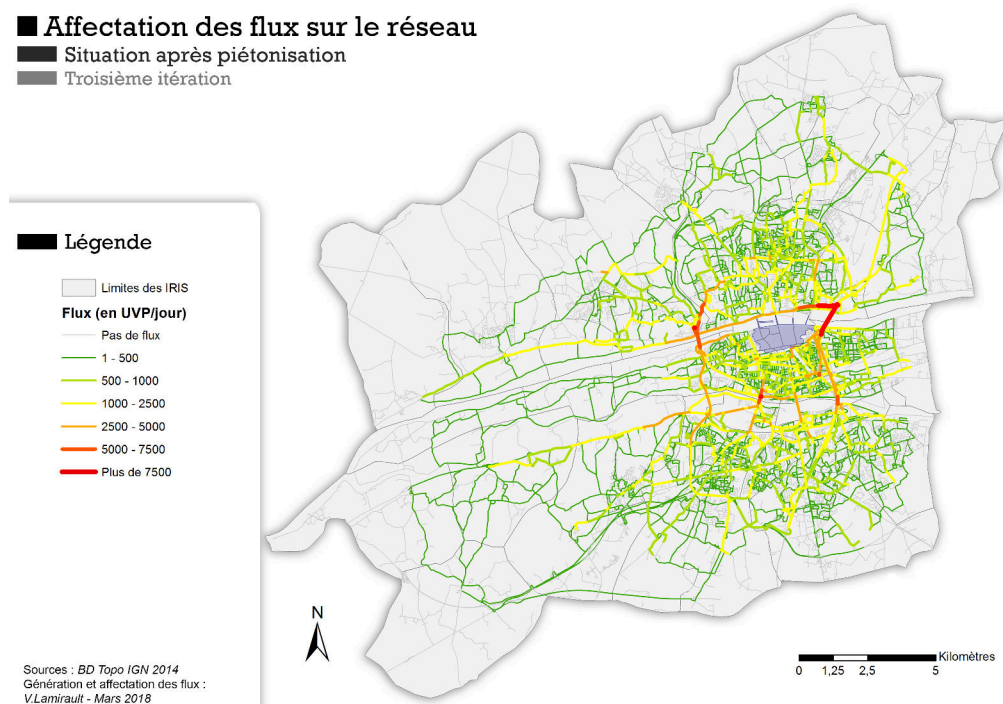
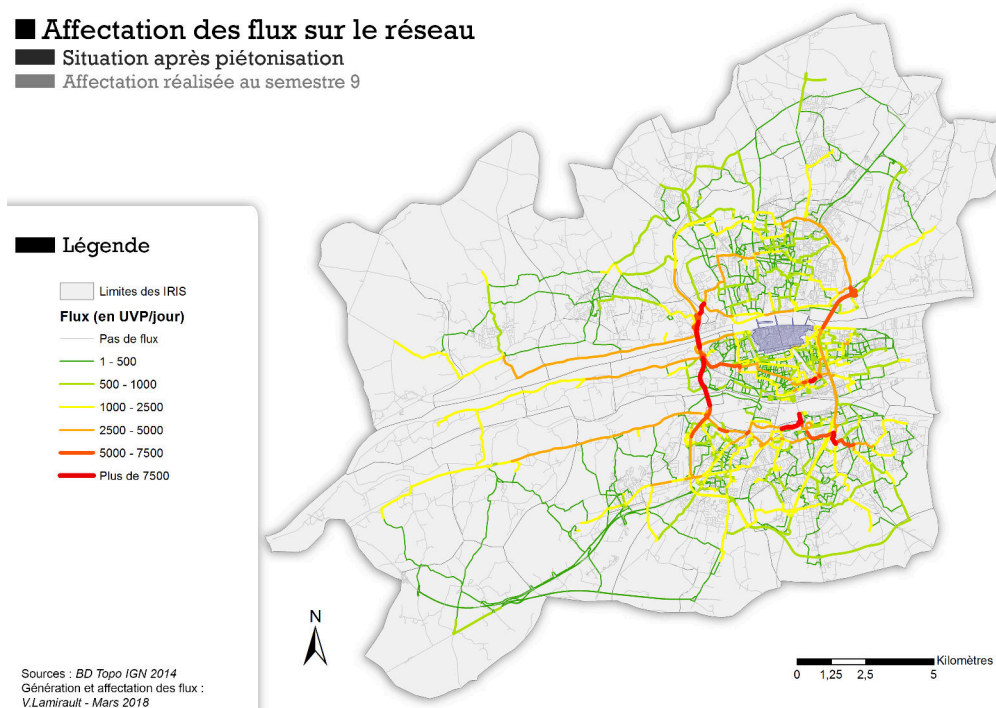


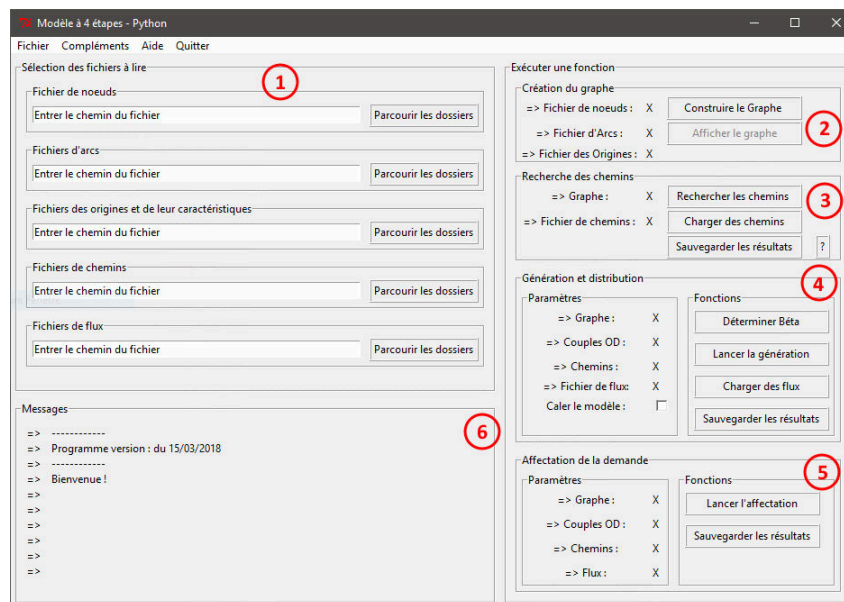
FIGURE 3.15 – Carte représentant les flux affectés au semestre 9 après piétonisation



Annexe 3 : Logiciel de modélisation

Comme pour la modélisation réalisée au semestre 9, l'ensemble des étapes décrites dans ce dossier ont été implémentées dans le langage python. La totalité du code ne sera pas détaillé ici en revanche un aperçu de l'interface conçue spécifiquement pour ce projet est donné. Bien que le programme se nomme "modèle à 4 étapes", il ne permet pas de réaliser l'étape de choix modal non étudiée dans le cadre de ce projet.

FIGURE 3.16 – Interface de l'application "modèle à 4 étapes"



1. Zone pour indiquer l'emplacement des fichiers à charger pour chacune des étapes.
2. Création du graphe : il s'agit d'un préalable à toutes les étapes. L'ensemble des fichiers nécessaire au fonctionnement de cette étape est indiqué sur la gauche de l'encadré.
3. Recherche de chemins : dans le cas où on ne réalise pas toutes les étapes d'un coup il peut être utile de rechercher les plus courts chemins pour chaque couple origine-destination et de sauvegarder les résultats (ce processus est le plus couteux en terme de temps de calcul). Dans le cas de ce projet, cela a permis de réaliser les simulation de l'étape de génération/distribution très rapidement. De même pour la première itération de chaque affectation ces données sont également très utiles.
4. Génération et distribution : cette encadré permet de réaliser l'étape de génération-distribution. On peut également caler le modèle en générant les flux pour plusieurs valeurs du frein au déplacement en indiquant une valeur minimum, une valeur maximum et un pas. En connaissant

les chemins les plus courts (et donc les distances) cette étape est plutôt rapide. Il faut environ 5 minutes pour générer les flux pour une trentaine de valeurs du frein au déplacement. Les résultats obtenus peuvent être exportés à l'aide du bouton de sauvegarde pour être ensuite utilisés dans un tableur par exemple.

5. Affectation de la demande : cet encadré permet de lancer le processus d'affectation. En appuyant sur le bouton "lancer affectation", une fenêtre apparaît et demande combien d'itérations réaliser. Tout comme pour la génération et la distribution des flux, les résultats peuvent être enregistrés pour être exploités sur un tableur. Il peuvent également être utilisés par un SIG en ayant au préalable remplacer les points par des virgules.
6. Cet encadré donne des précisions sur les programmes lancés, leur état d'avancement et si ils se sont terminés. Il rappelle par exemple les paramètres de béta entrés, donne l'emplacement exacte des fichiers chargés et indique certaines erreurs possibles.

Directeur de recherche
Baptiste Hervé

LAMIRAULT Valentin
Projet de Fin d'Etudes
DAE5 2017-2018

La piétonisation du centre-ville de Tours et ses conséquences :
Raffinement et calage du modèle.

Résumé : Ce projet est la continuité de celui réalisé au semestre 9 par Blanloeil Félix et Lamirault Valentin. Ce projet simulait, notamment grâce au modèle de Huff, la demande de transport avant et après piétonisation d'une vaste zone dans le centre-ville de Tours. L'impact de cette piétonisation était aussi étudié au niveau du stationnement.

Le projet réalisé pour le semestre 10 reprend les différents éléments développés précédemment et propose des pistes de raffinement et de calage. Ainsi les différentes étapes du modèle à 4 étapes sont passées en revue. Un des paramètres du modèle de Huff utilisé pour générer et distribuer les déplacements est ainsi calé. Un nouveau motif de déplacement est intégré à la simulation. Une partie se concentre sur les relations liant la capacité, le débit, la vitesse et la concentration. Ces relations sont ensuite utilisées pour améliorer l'étape d'affectation et obtenir de nouveaux résultats. Enfin la question du stationnement est abordée à travers la modélisation de l'offre et de l'occupation de cette offre avant et après piétonisation du secteur sauvegardé.

Mots clé : Voiture, centre-ville, piétonisation, modélisation, modèle de Huff, stationnement, calage, capacité, mobilité, modèle à quatre étapes