



POLYTECH[®]
TOURS

Département
Aménagement et Environnement



Ecole d'ingénieurs
polytechnique
de l'université de Tours

CITERES
UMR 6173
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement, Paysage,
Environnement

Projet de Fin d'Etudes

Étude d'une seconde ligne de tramway à Tours : Conception d'un modèle mathématique pour déterminer les flux



2016-2017

S9&S10

Directeur de recherche

BAPTISTE Hervé

Benfadel Ali
Crosnier Maxime

Étude d'une seconde ligne de tramway à Tours : Conception d'un modèle mathématique pour déterminer les flux

**Directeur de recherche
BAPTISTE Hervé
2016/2017**

**Auteurs
BENFADEL Ali
CROSNIER Maxime**

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.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche et projet de fin d'études en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement, assurée par le département aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme et de l'aménagement, 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 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 Ingénierie du Projet d'Aménagement, Paysage et Environnement de l'UMR 6173 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.

Remerciements

Nous remercions notre directeur de recherche, monsieur Hervé Baptiste, qui nous a conseillés et orientés dans nos démarches. Il a su être flexible et à notre écoute pour que ce projet de recherche réponde au mieux à nos attentes.

Nous remercions tous les professeurs qui ont pu nous aider de près ou de loin dans nos démarches de recherche.

Enfin, merci aux bibliothécaires de nous avoir facilité et orienté nos lectures pour ce projet de recherche.

Sommaire

Table des matières

Tracé de la seconde ligne de tram	13
Modèle mathématique	16
Qu'est-ce qu'un modèle ?	16
Modèle développé	17
Génération.....	17
Distribution.....	19
Répartition modale.....	21
Conclusion	21
Bibliographie et webographie	23
Table des illustrations.....	24

CITERES

UMR 6173
*Cités, Territoires,
Environnement et
Sociétés*

*Equipe IPA-PE
Ingénierie du Projet
d'Aménagement,
Paysage,
Environnement*



35 allée Ferdinand de Lesseps
BP 30553
37205 TOURS cedex 3

Directeur de recherche :
BAPTISTE Hervé

BENFADEL Ali
CROSNIER Maxime
Projet de Fin d'Etudes
DA5
2016-2017

Étude d'une seconde ligne de tramway à Tours : Conception d'un modèle mathématique pour déterminer les flux

Résumé :

Ce projet de fin d'études apporte des éléments de réflexion supplémentaires sur la conception d'une seconde ligne de tram tourangelle. Plus précisément, ce rapport propose un tracé pour la future ligne de tramway sur Tours et propose un modèle mathématique pour estimer les flux d'un nouveau réseau de transports en commun. Actuellement, les élus se concertent pour choisir un tracé, mais aucune étude des flux générés par les tracés proposés n'a été réalisée. De plus, nous justifions la pertinence de concevoir une nouvelle ligne. Par ailleurs, cette étude s'organise en deux temps avec la détermination d'un nouveau tracé et la conception d'un modèle mathématique pour les transports qui estime les flux générés entre une origine et une destination. La seconde partie sera établie au second semestre et consistera à l'application du modèle mathématique sur la nouvelle ligne de tramway. La recherche et l'affectation de données d'entrées pour chaque arrêt seront les premières étapes. Ensuite, le modèle devra être calibré avec des données existantes pour représenter le plus réellement possible les futurs déplacements des usagers sur le réseau. Ce dernier sera appliqué sur le nouveau réseau de transports en commun.

Mots Clés : Transport urbain – Modèle mathématique – Calcul de flux – Tramway Tours

L'Observatoire de la mobilité 2016 piloté par l'Union des transports publics et ferroviaires (UTP) montre que les Français utilisent de plus en plus les transports publics de manière régulière. Si le bus reste d'assez loin le mode le plus utilisé, le tramway et le métro ont connu la progression la plus importante par rapport à 2015 (article localtis.info). Mais cela n'a pas toujours été d'actualité. Dans les années 1870, le tramway¹ s'impose peu à peu dans les grandes villes du monde². D'ailleurs, dans de nombreux pays, les lignes de trams fonctionnent toujours sur le réseau original³. Par ailleurs, la deuxième révolution industrielle⁴ a bouleversé nos sociétés en matière de mobilité. Le domaine des transports se voit complètement réorganisé avec le développement de l'automobile. La voiture a transformé le paysage urbain et a pris de plus en plus de place sur le territoire. En effet, dans les années 1920 les lignes de tramways ont laissé place aux voitures qui étaient bien plus pratiques et appréciées que ce dernier. Certaines lignes de trams ont donc été supprimées et l'automobile s'est imposée dans les villes du monde. Cependant, suite à l'augmentation du parc automobile, le phénomène de congestion dans les villes était inévitable et permit entre autres au tramway de se réinventer vers 1980 avec de nouvelles standardisations⁵. La ville de Tours n'a pas échappé à l'effervescence du tramway des années 1870. Une ligne conçue en 1877 a fonctionné jusqu'en 1949, puis a laissé place à l'automobile. Cependant, en 1990 des réflexions sur la réalisation d'une nouvelle ligne de tramway ont abouti à la création de la ligne actuelle en 2013⁶. Suite à cette première ligne et ces trois années de fonctionnement, le dialogue⁷ pour concevoir une seconde ligne est d'actualité.

De nombreux débats entre élus⁸, l'ADTT⁹ et Tours-Plus discutent des propositions de tracés, mais il semblerait au vu des recherches que ces propositions ne soient pas assez travaillées pour déterminer le projet final. Les débats sont donc ouverts, mais ne se concrétisent jamais sur le choix du projet et des pôles¹⁰ à desservir en priorités. D'ailleurs, de nombreuses questions se posent pour une future liaison avec le pôle de la gare de Saint-Pierre-des-Corps¹¹. Le manque d'études et

¹ Chemin de fer électrique destiné au transport urbain et suburbain des voyageurs et implanté en totalité ou en partie sur la chaussée des rues empruntées. Abréviation : tram. Source : dictionnaire Larousse

² Le premier tramway hippomobile (tracté par des chevaux) a été construit à New York en 1832. Suivirent ensuite les capitales des pays développés ; Paris, Bruxelles, Genève...

³ En France, le plus vieux réseau fonctionnant toujours est celui de St-Etienne qui tourne depuis 1881. Parfois tout le système est d'origine excepté les rames qui sont plus modernes.

⁴ La deuxième Révolution industrielle (1870-1913) est caractérisée par l'essor de l'électricité, du pétrole, de la mécanique et de la chimie.

⁵ Actuellement les tramways sont standardisés ; le type de traction, la longueur des tramways, leur capacité, la largeur des voies... sont des paramètres qui évoluent dans le temps. L'écartement des voies par exemple est standardisé à 1.40m, cependant elle n'est pas équivalente partout comme à St-Etienne où cette largeur est restée à un mètre. De plus, les standardisations sont différentes suivant les pays.

⁶ Inaugurée le 31 août 2013

⁷ Première réflexion pour une seconde ligne en 2010

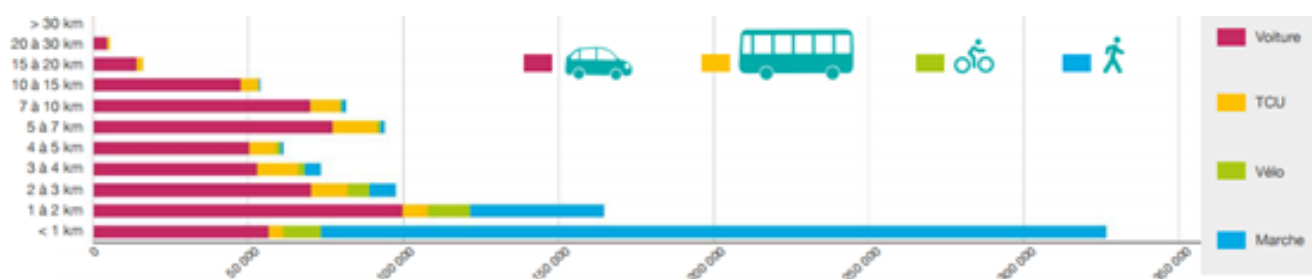
⁸ De nombreux élus communautaires militent pour l'installation d'une nouvelle ligne de tram qui permettrait de connecter leur commune à l'hypercentre. Chaque élu défend les intérêts de sa commune. Ainsi, pour Marie-France Beauvils (Maire de Saint-Pierre-des-Corps), le quartier de la Rabaterie, dernier quartier en renouvellement urbain, doit être desservi par une ligne de TCSP (tramway ou BHNS).

⁹ Association pour le développement du transport collectif en Touraine.

¹⁰ Gerard Paumier (Maire de Saint-Avertin) milite pour faire passer le tramway par le CHU Trousseau qu'il qualifie comme une « ville » de par sa taille et le nombre de personnes y travaillant.

¹¹ Christian Gatard (Maire de Chambray-les-Tours) remet en cause le fait d'une seconde ligne passant par Saint-Pierre-des-Corps et défend l'idée du tram-train.

d'analyses des tracés serait le problème majeur¹² au vu des réflexions qui n'aboutissent pas. En effet, aucune étude sur l'impact des flux engendrés par les nouveaux tracés proposés n'a été réalisée alors que celle-ci semble déterminante pour le choix de la future ligne. D'après les élus, une seconde ligne de tram est nécessaire, mais malgré une politique de transport orientée vers le développement de la part modale¹³ des transports en commun sur la ville, il semblerait que le développement du réseau de transport sur Tours soit en retard¹⁴. D'ailleurs, Le SRADDT¹⁵ Centre permet de fixer des objectifs sur vingt ans en matière de déplacements dans la région. Ces derniers concernent notamment une diminution de 5 % d'ici 2020 de la part modale de la voiture dans l'ensemble des agglomérations régionales, ainsi qu'une réduction de 40 % des émissions de gaz à effet de serre à atteindre pour 2020 par rapport à 1990¹⁶. D'autre part, le PDU¹⁷ encourage les mobilités alternatives à la voiture afin d'éviter l'autosolisme¹⁸. L'automobile domine encore à Tours, notamment sur les trajets de courtes distances¹⁹, ce qui laisse la possibilité aux modes alternatifs une marge de progression intéressante (Graphique 1)²⁰.



Graphique 1: Répartition modale selon la distance du déplacement sur le PTU (EMD 2008). Source PDU

Dans le but de baisser la part modale de la voiture de 8 % (tableau 1), il convient de reporter une part des déplacements automobiles sur tous les autres modes. La part de la marche à pied, déjà

¹² La diminution du budget des collectivités peut aussi être un problème majeur pour la réalisation d'un projet, mais celui-ci concerne principalement la conception physique du projet et non la détermination en amont. Des études de financement par tracé peuvent être réalisées pour aider dans la détermination du projet.

¹³ Répartition en pourcentage des différents modes de déplacement.

¹⁴ Comparaison avec trois villes de taille similaires à Tours dans un rayon de 100 km. Les villes d'Orléans et de Le Mans contiennent deux lignes de trams (les dernières lignes ont été installées en 2007 et en 2012). En parallèle, Angers décide d'élargir son réseau avec une seconde ligne de tramway qui devrait voir le jour en 2017.

¹⁵ Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire réalisé en 2011

¹⁶ D'autres orientations ont été fixées pour trouver une alternative à la voiture individuelle. La région souhaite une augmentation de 50 % de l'usage du TER et compte être une référence en termes de déplacements cyclables.

¹⁷ Plan de déplacements urbains, établi en 2013.

¹⁸ Fait de se déplacer seul dans un véhicule

¹⁹ 56 % des déplacements des habitants du SCoT (Schéma de Cohérence Territoriale) font moins de 3 kilomètres. Source Enquête Ménage Déplacement 2008.

²⁰ La marche prédomine pour les distances de moins d'un kilomètre. Toutefois, lorsque la distance devient plus importante, la voiture reprend l'ascendant, là où les transports en commun et le vélo constituent une alternative.

très bien représentée dans le bilan modal, devrait peu évoluer²¹ tandis que celle attribuée au vélo devrait quasiment doubler²². Quant aux transports collectifs, il est prévu une augmentation de 5%²³.

Parts modales	2008	Objectif 2023*
Voiture particulière	55 %	47 %
Transports collectifs	8 %	13 %
Marche à pied	30 %	30 %
Vélo	4 %	9 %
Deux-roues motorisés	1,5 %	1 %

Tableau 1: Objectifs de répartition modale des déplacements. * L'objectif 2023 est fixé sur la délimitation du Périmètre de Transports Urbains de 2012 (25 communes). Source PDU

En outre, le choix des élus pour une seconde ligne se porterait dans un premier temps sur une liaison Verdun-Trousseau²⁴. L'ADTT évoque quant à elle la conception d'une ligne est-ouest reliant la gare de Saint-Pierre-des-Corps et le CHRU Bretonneau en priorité. Néanmoins, certains points restent à éclaircir pour que les élus fassent un choix ; le financement²⁵ et le coût du projet, la réflexion sur une desserte efficace entre la gare de Tours et celle de Saint-Pierre-des-Corps et l'étude d'impact des flux engendré par une nouvelle ligne.

La mise en place d'une seconde ligne de tramway est un enjeu politique fort pour l'agglomération. Le projet doit répondre aux attentes des élus et de la population. Le sujet est un objet symbolique de politiques locales qui œuvrent pour le développement durable et la qualité de vie des habitants. Malgré la qualité et l'acceptation par la population de la première ligne, celle-ci ne dessert pas tous les bassins de population. Au-delà du fait qu'un tramway permette de servir des pôles générateurs de flux, ce dernier est une alternative à la voiture individuelle, mais surtout redynamise l'activité urbaine. La mise en place d'une telle infrastructure réduit l'espace au sol dédié à la voiture, ce qui en limite sa circulation. Certaines villes²⁶ choisissent de faire passer la ligne sur des axes où l'affluence est considérable. En transports, les boulevards urbains sont un moyen « d'ouvrir l'artère de circulation à tous les modes, de réduire les nuisances de la circulation automobile et de modérer les vitesses de circulation sans pénaliser la fluidité du trafic ». Dans le cas d'un tramway, le boulevard urbain apaise la circulation. En somme, une seconde ligne de tramway s'avère être la bonne option, car cette dernière permettra d'améliorer la mobilité, de redynamiser les commerces,

²¹ Certaines actions avec entre autres un plan piéton mis en place dans la ville devraient maintenir les 30% des déplacements à pied.

²² Un plan vélo et l'aménagement de nouvelles voies cyclables devraient permettre à la part modale des vélos d'augmenter à 9% d'ici 2023.

²³ Une partie de cette augmentation peut être attribuée à l'effet de la première ligne de tramway. Le reste proviendra de la cohérence de la politique mise en place dans le cadre du PDU avec le développement d'axes forts et performants des TCSP

²⁴ Le réseau de tram donnerait un « Y inversé » et une halte ferroviaire à Verdun compléterait ce dernier.

²⁵ Le 4 mai 2016, lors d'une séance de conseil communautaire, la Chambre régionale des comptes recommande à la collectivité de reconsidérer ses projets, car l'état actuel de la dette et la baisse de l'épargne ne permettent pas la mise en œuvre d'une nouvelle ligne de tramway. Cependant, Christian Gatard émet des réserves sur ce jugement, car il n'y a alors aucune étude, ni de plan de financement qui a été fixé. Selon lui, il existe d'autres solutions qu'un financement par la dette.

²⁶ Marseille, Grenoble, Nice

de revaloriser les secteurs traversés (économiques ou résidentiels) ou encore de fortifier le lien entre la périphérie et le centre. Un tramway donne l'image d'une ville dynamique, performante et durable²⁷.

Ce projet de fin d'études porte donc sur l'évaluation et l'étude des flux d'une seconde ligne de tram sur la ville de Tours. D'ailleurs, de nombreuses lignes ont été proposées, mais nous avons choisi de réaliser notre propre tracé, car ces dernières n'étaient pas entièrement satisfaisantes. Déterminé intuitivement à l'aide des débats, du PDU et de la connaissance que nous avons de la ville et de son réseau de transport, notre tracé nous permettra d'évaluer les flux d'une nouvelle ligne²⁸. Cependant, ce projet ne concerne pas réellement la détermination précise et définie du tracé. Il est ici pour proposer la conception²⁹ d'un modèle mathématique pour estimer les flux d'une ligne de transport. Ce modèle pourra être appliqué pour chaque tracé³⁰ et apportera des éléments supplémentaires pour la prise de décision finale du projet.

D'après cette première contextualisation, la conception d'une seconde ligne de tramway est en projet pour la ville de Tours. Ce rapport présente ensuite une présentation brève du tracé et le protocole pour réaliser ce dernier. Nous verrons comment et quels bassins de population seront desservis par la seconde ligne de tramway. Enfin, nous aborderons le cœur du sujet portant sur le modèle mathématique. À l'aide de fonctions et de variables, le modèle permettra d'analyser le plus réellement possible les flux d'une nouvelle ligne de tram.

²⁷ *Nouvelles idéologies urbaines*, Hélène Reigner, Thierry Brenac et Frédérique Hernandez

²⁸ Application réalisée au second semestre

²⁹ Les modèles existants ne nous satisfaisaient pas complètement, un nouveau modèle a donc été conçu à l'aide de différentes lectures

³⁰ L'application du modèle sur le tracé présenté sera réalisée à l'aide de base de données de l'INSEE.

Tracé de la seconde ligne de tram

Comme émis précédemment, l'étude ne porte pas spécifiquement sur la conception d'un tracé. Ce dernier permet de contextualiser les grandes idées des élus et de l'ADTT. En revanche, le modèle mathématique présenté dans ce rapport sera appliqué sur la base de ce tracé au second semestre. Le tracé proposé (carte 2) a été réalisé à l'aide du PDU, du réseau de transport en commun actuel³¹, de l'urbanisation ou encore de la taille des routes. En amont, des pôles générateurs ou attracteurs de flux ont été identifiés grâce à la carte 1 présentant le réseau urbain à développer du PDU. Les pôles générateurs sont généralement des bassins de population, des quartiers non desservis par la première ligne et les pôles d'attraction représentent des zones de rencontre³².

Cinq pôles générateurs de flux non desservis par la première ligne ont été identifiés. L'objectif est de les connecter au centre-ville de Tours qui structure le réseau de transport de la ville. Ce centre-ville correspond à la place Jean Jaurès et au pôle d'échange de la gare SNCF³³.

Le premier pôle retenu est situé sur La Riche. Il est centré sur un pôle santé incluant l'hôpital Bretonneau et la faculté de médecine où de nombreux salariés ainsi que des étudiants³⁴ se déplacent quotidiennement pour accéder à ce site. Inclus dans ce pôle à desservir, la zone commerciale « La Riche Soleil » qui est très peu desservie actuellement.

Le deuxième pôle est un quartier résidentiel situé à Saint-Pierre-des-Corps. Il s'agit de la Rabaterie, où près de 5000 habitants y résident. De plus, ce quartier est le seul en renouvellement urbain qui n'est pas relié au réseau de tramway.

Le troisième pôle est celui du centre commercial des Atlantes qui constitue une zone d'attraction importante, car d'autres infrastructures telles que le parc des expositions et le stade de la Vallée du Cher se situent autour. Par ailleurs, inclus dans ce pôle et le deuxième, la gare de Saint-Pierre-des-Corps qui rencontre des difficultés³⁵ pour se relier avec la gare de Tours.

Un quatrième pôle est constitué du quartier des Fontaines³⁶, l'ESCEM³⁷ et le centre aquatique du lac.

Pour finir, un cinquième pôle inclut le campus de Grandmont³⁸, l'hôpital Trousseau et un centre commercial à Chambray-les-Tours. Cette zone est actuellement desservie par le BHNS³⁹.

³¹ Le réseau est constitué de 29 lignes régulières, dont une ligne de tramway, un BHNS et trois lignes fréquentes. 75 % de la fréquentation du réseau est représentée par ces 5 lignes. Source : la nouvelle république 30/08/14.

³² Université, hôpital, gare, centre commercial, parc des expositions...

³³ 5000 et 5400 voyageurs quotidiens exclusivement sur la ligne de tram actuelle. Source : la nouvelle république 30/09/14.

³⁴ 5000 étudiants. Source PDU.

³⁵ Difficultés pour relier la gare de Tours et de nombreux débats sur les solutions proposées (tram, tram-train, téléphérique...).

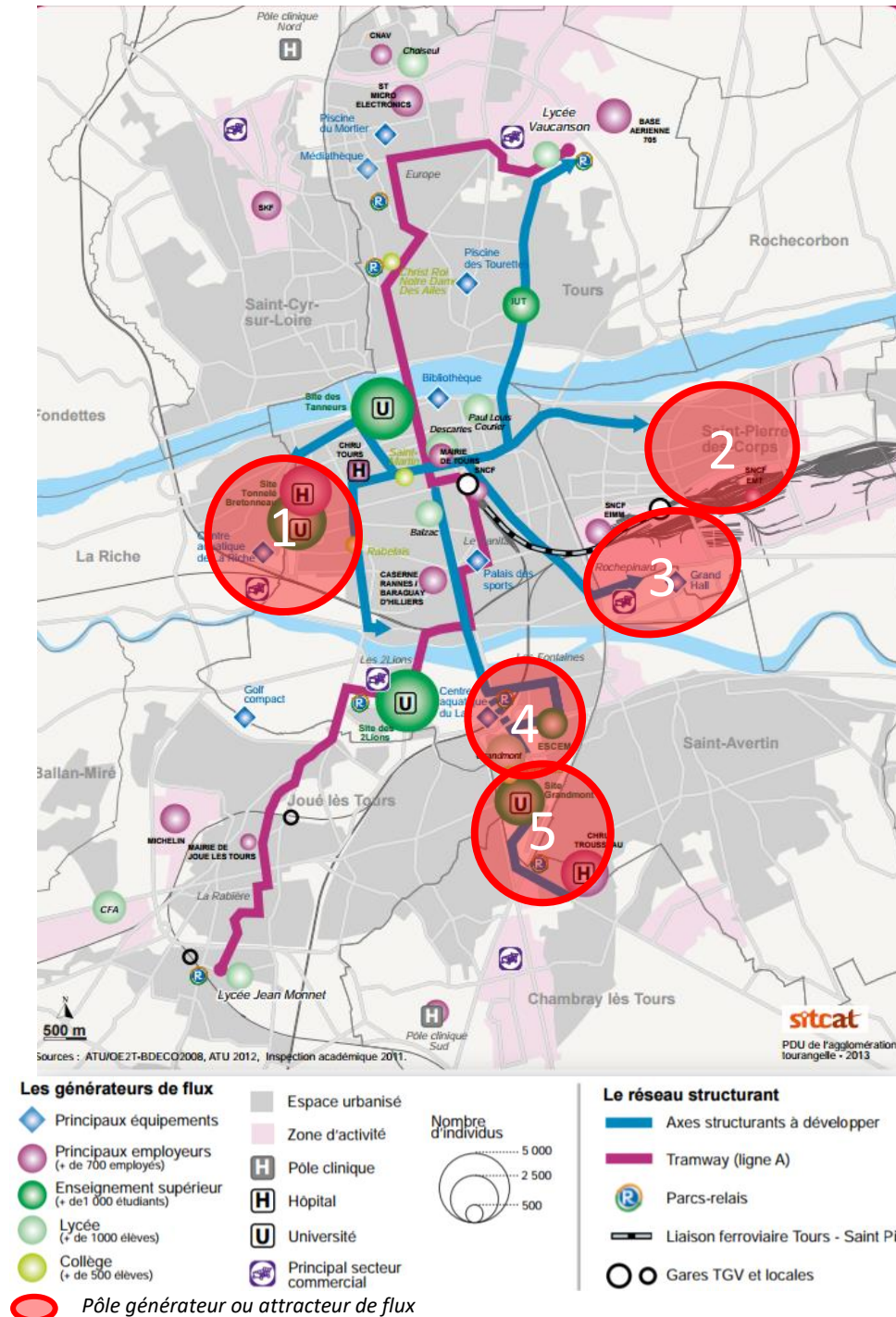
³⁶ Quartier avec de nombreux logements sociaux faisant partie de la politique de la ville. En 2015, 22% des actifs étaient au chômage. Une nouvelle ligne permettrait au quartier de s'ouvrir sur le centre urbain et offrir de nouvelles possibilités aux 6500 habitants du quartier.

³⁷ École Supérieure de Commerce Et de Marketing, 947 étudiants en 2014.

³⁸ 2500 étudiants. Source : PDU

³⁹ Bus à Haut Niveau de Service

Etude d'une seconde ligne de tramway à Tours



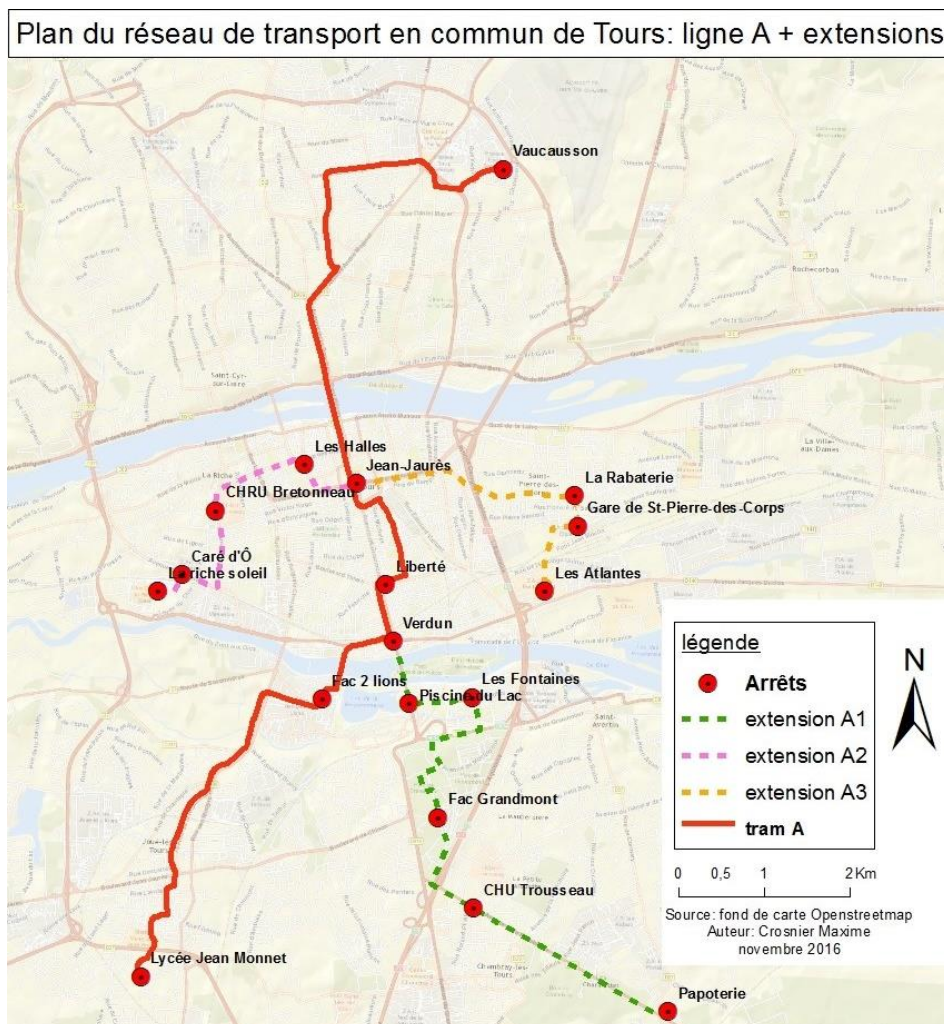
Carte 1: réseau structurant fil bleu à développer. Source PDU

Pour desservir ces pôles, le tracé devra connecter l'est et l'ouest de Tours avec La Riche et Saint-Pierre-des-Corps, puis le sud de la ville avec Chambray-lès-Tours. Une ligne est-ouest reliée au pôle Jean Jaurès est proposée avec les centres commerciaux des Atlantes et de la Riche Soleil comme terminus. D'ailleurs, au vu de la surface disponible, des parcs relais peuvent être construits à proximité⁴⁰ pour favoriser l'intermodalité⁴¹. De plus, ce tracé servira la gare de Saint-Pierre-des-Corps actuellement peu desservie par les transports en commun tout comme le quartier de la Rabaterie qui

⁴⁰ Ceci ne constituant pas un objet de recherche dans notre PFE, ce point n'a pas été développé.

⁴¹ Fait de combiner différents moyens de transport pour un même trajet.

sera lui aussi connecté sur cette ligne. Même si le tracé n'est que brièvement décrit, il est important de souligner la contrainte technique particulière⁴² pour franchir les voies ferrées. Dans un second temps, une extension de la première ligne connectée à Verdun⁴³ permettra de relier le pôle de Grandmont incluant l'hôpital Troussseau. La ligne est ensuite prolongée jusqu'à la Papoterie pour relier la zone industrielle. D'ailleurs, cette extension remplacera le BHNS reliant actuellement ce pôle au centre-ville.



Carte 2: tracé de la ligne de tram actuelle et les extensions proposées

Le tracé choisi a donc été dessiné en fonction des pôles retenus et non desservi par la ligne de tram actuelle. Ces pôles sont des zones potentielles d'attraction et d'émission de flux. De plus, des routes⁴⁴ ont été retenues pour le passage du tramway en fonction de leur taille et de leur localisation. Au vu des nombreuses possibilités, des choix arbitraires ont donc alimenté le tracé final.

⁴² Cette contrainte devra être remédiée à l'aide d'un ouvrage d'art. Ce dernier peut représenter une charge lourde dans les finances du projet, mais ce point n'est pas détaillé dans ce rapport.

⁴³ Arrêt de tram actuel avec 1800 montées quotidiennes en 2013. Source : la nouvelle république 23/09/2014.

⁴⁴ Ce projet ne concerne pas l'étude d'impact du tramway sur le réseau routier. Les routes ont donc été sélectionnées selon leur taille sans préoccupation des coûts financiers ni des déviations engendrées.

Modèle mathématique

L'objectif est donc d'évaluer les flux d'une nouvelle ligne à l'aide d'un modèle mathématique. Composé d'une série d'équations, il décrit des relations entre variables d'une manière précise afin d'estimer une finalité. Pour ce cas d'étude, il permet d'anticiper la mise en place d'une infrastructure de TCSP⁴⁵ non disposée, et ainsi, d'en calculer les flux probables. À partir de modèles existants, nous avons conçu un modèle agrégé selon les différentes stations des lignes de transports collectifs. L'essence même de ce modèle est l'interaction entre les différentes zones. Le modèle présenté est inspiré du modèle de la DREIF (MODUS) qui se rapproche le plus de la réalité que nous voulons représenter et du modèle d'HUFF. Le second objectif est de créer un modèle adaptable à différentes lignes de TCSP⁴⁶. Le modèle défini à l'aide d'hypothèses devra donc être adaptable. En effet, il faut choisir des paramètres adaptés à la taille de la ville et au type de réseau de transport en commun présent sur le territoire.

Par ailleurs, il existe actuellement de nombreuses méthodes pour étudier les flux d'un réseau de transport en commun. Effectivement, certains logiciels utilisent des modèles (comme Citylab) et sont capables d'obtenir les résultats recherchés. Toutefois, cette option est peu réalisable, car le coût de ces plateformes est conséquent. De plus, ce sont de véritables boîtes noires qui ne permettent pas de connaître le calibrage ou les hypothèses choisis pour obtenir les résultats. Ces logiciels sont donc peu adaptables et n'offrent pas le contrôle désiré sur les paramètres. Nous vous décrivons dans un premier temps ce qu'est un modèle de transports et quels sont leurs objectifs, puis nous détaillerons le modèle qui fait l'objet de notre application sur la ville de Tours.

Qu'est-ce qu'un modèle ?

En transport, un modèle est composé de formules mathématiques dans le but de représenter au mieux le rapport entre l'offre et la demande de transports. On appelle souvent les modèles de planification « modèles de prévisions ». Effectivement, ces modèles sont utilisés dans le but de prévoir les effets d'une infrastructure de transport. Autrement dit, ils sont appliqués en amont d'un projet et servent d'outils pour l'aide à la décision des politiques locales.

Les modèles séquentiels à quatre étapes sont le plus couramment choisis lorsqu'il s'agit d'évaluer des projets d'infrastructures de transports. Leur fonctionnement se base sur des étapes qui s'opèrent de manière consécutive. Les quatre étapes se répartissent selon le schéma suivant :

⁴⁵ Transport en commun en site propre. Les systèmes de transports circulent sur des voies prioritaires.

⁴⁶ Sous-entendue des lignes de bus ou tramway d'un territoire similaire à Tours.

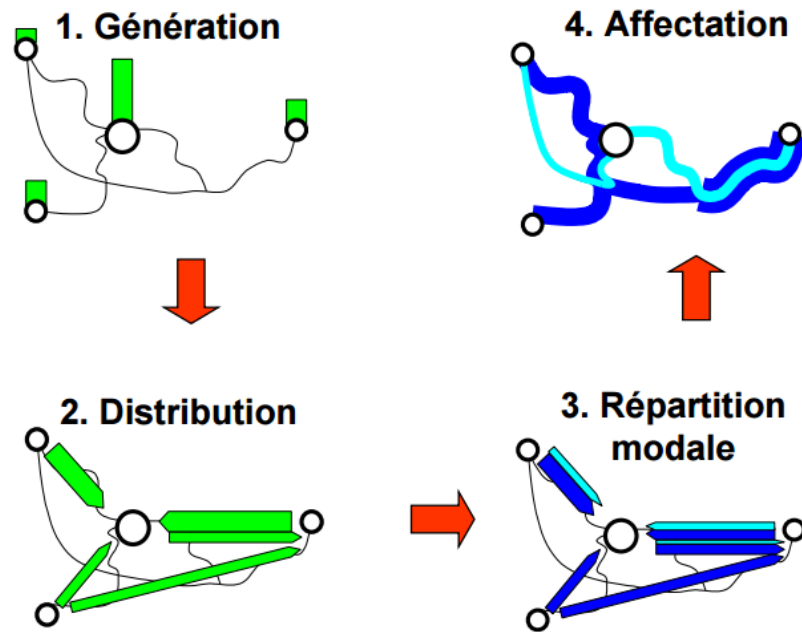


Figure 1 : les quatre étapes du modèle séquentiel (source : CERTU)

La génération détermine le volume de déplacements qui va s'effectuer sur chaque zone. Ces déplacements s'organisent en deux parties distinctes : les flux entrants et sortants. Les flux entrants correspondent aux déplacements attirés par une zone alors que les flux sortants représentent les déplacements émis. Ces déplacements peuvent être organisés par motifs de déplacements (domicile-travail, domicile-loisir...).

L'étape de la distribution consiste à déterminer la matrice Origine-Destination de chaque zone. Cette étape évalue les flux probables d'utilisateurs entre une zone (i) et (j). En somme, les deux premières étapes ne différencient pas les différents modes de transport. C'est pourquoi l'étape de la répartition modale segmente tous les déplacements entre les différents modes⁴⁷. Enfin, l'affectation évalue quel réseau routier ou quelle ligne de transport en commun sera le plus apte à être utilisées.

De manière générale, les modèles se répartissent en deux catégories. Tout d'abord, les modèles agrégés sont composés de zones. Cette agrégation peut se faire par département, commune ou encore par quartier. On émet dans ce cas l'hypothèse que le comportement d'un agent est représentatif pour l'ensemble des agents de la zone. L'approche désagrégée permet d'étudier plus finement les comportements de chaque individu. Pour cela, le modèle utilise des enquêtes de déplacements.

Modèle développé

Génération

Le volume de déplacement sur chacun des arrêts d'un réseau est d'une part, une somme d'utilisateurs appelée émission⁴⁸ affectée sur chaque arrêt d'origine et une somme de réception⁴⁹ affectée sur les destinations. Par ailleurs, l'affectation des données par arrêt se fera à l'aide d'une

⁴⁷ Véhicule particulier, transport en commun, cyclable, etc.

⁴⁸ L'émission représente la quantité de personnes susceptible de se déplacer.

⁴⁹ La réception peut être qualifiée d'attraction. Pour un usager, cela représente la cause de son déplacement.

zone d'attraction autour de chaque arrêt⁵⁰. L'émission et la réception sont donc les données d'entrées déterminant les volumes de déplacement. Pour représenter au mieux la réalité des déplacements d'un territoire, les usagers doivent être segmentés par motifs de déplacements. Ces motifs non orientés sont de l'ordre de cinq :

- Domicile
- Travail / étude
- Loisirs
- Achats
- Affaires personnelles⁵¹

Ces motifs peuvent ensuite être orientés Domicile-Travail, Travail-Achat, Loisir-Domicile... Cette segmentation permet de représenter au mieux la réalité des déplacements ou d'étudier ces derniers par motifs. Pour une estimation générale des flux sur un réseau de transport en commun, le cumul total des déplacements par arrêts et de tous les motifs doivent être estimés pour représenter au mieux la réalité⁵². En outre, cette segmentation par déplacements a été inspirée par le modèle MODUS⁵³.

MODUS est un modèle de déplacements qui a pour objectif d'étudier le système de transport dans la région parisienne. Ce dernier ayant déjà fait ses preuves aurait pu être repris pour notre étude de cas. Cependant, la complexité de ce dernier et l'affectation sur le territoire francilien⁵⁴ n'auraient pas permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour une petite métropole⁵⁵ comme Tours. D'autre part, ce modèle multimodal intégrant trois modes de déplacement⁵⁶ est notamment utilisé pour évaluer l'efficacité et l'utilité d'un projet d'infrastructure routier ou TCSP. Ce modèle a contribué à l'élaboration du Schéma Directeur de la Région Île-de-France de 1994. Chaque déplacement est croisé entre un type d'usagers (captifs des TC/ non captifs) et un motif de déplacement. Seule la segmentation par motifs a donc été reprise pour notre modèle, mais nous renvoyons le lecteur à la thèse de Thierno AW (*Modèles pour le zonage et la génération des déplacements*) pour plus de détails sur cette étape.

Des données d'entrées devront donc alimenter le modèle pour estimer les flux en fonction des hypothèses et de la finalité⁵⁷ choisies. Le tableau ci-dessous présente un exemple de données d'entrées que nous pourrions affecter sur les arrêts pour la future application du modèle.

⁵⁰ Cette zone d'attraction est généralement limitée à un périmètre de 5 minutes à pieds autour de l'arrêt. Les données utilisées seront donc situées dans ce périmètre et affectées à un seul arrêt. De plus, si des données chevauchent deux zones d'attractions, le choix de l'affectation se fera par la distance euclidienne la plus courte d'un arrêt à la donnée voulue.

⁵¹ Médecin, la poste, banque...

⁵² Seuls les motifs orientés les plus importants en termes de déplacement peuvent être pris en compte

⁵³ Modèle de déplacements urbains et suburbains, appartenant à la DREIF (Direction Régionale de l'Équipement Île-de-France)

⁵⁴ Découpé en 1289 zones de nature différente (infracommunales, monocommunales ou supra-communales) selon la densité de population. À cela est ajouté près de 34 zones de cordon routier et 12 zones de cordon TC

⁵⁵ Tours ne possède pas le statut de métropole, mais pourrait l'obtenir prochainement. Selon les réglementations, le statut de métropole peut être accordé aux ensembles de plus de 400 000 habitants dans une aire urbaine de plus de 650 000 habitants.

⁵⁶ Voiture particulière, transport en commun et modes doux

⁵⁷ Les flux peuvent être estimés suivant une temporalité journalière, horaire... avec la prise en compte en totalité ou en partie des motifs de déplacements suivant les hypothèses de l'utilisateur.

Motif	Données d'émission	Données de réception
Travail	Nombre d'actifs	Nombre d'emplois
Études	Nombre d'étudiants	Nombre de place disponible pour les études
Achats	Population totale	Surface commerciale (m ²)
Loisirs	Population totale	Nombre de stade, patinoire, piscine, salle de sport ou autre
Affaires personnelles	Population totale	Population totale, nombre de bâtiment

Tableau 2: données d'entrées par motifs non-orientés

Distribution

La distribution des volumes de déplacements sur un réseau va se réaliser en fonctions de la distance entre les arrêts et un poids qui leur sera affecté en fonction de la réception. Ces deux paramètres nous donneront la probabilité qu'un usager se rende sur une destination depuis son origine. De plus, des paramètres de calage permettront d'affiner le modèle avec des données réelles. En effet, le modèle doit être calé pour représenter au mieux la réalité des flux sur un réseau. Les étapes de la conception du modèle avec les fonctions mathématiques et les variables sont présentées ci-dessous. Ce dernier permet bien d'estimer les flux entre une origine et une destination d'un réseau de transport en commun, tout en décomposant les motifs de déplacements.

Formulation du modèle

$$F_{i,j} = \sum F_{i,j,m}$$

$F_{i,j}$: Flux entre une origine (i) et une destination (j) en personne

$F_{i,j,m}$: Flux par motifs de déplacements entre une origine (i) et une destination (j) en personne

$$F_{i,j,m} = E_{i,m} \cdot P_{i,j,m}$$

$E_{i,m}$: Émission par motifs de déplacements d'une origine (i) en personne

$P_{i,j,m}$: Probabilité par motifs de déplacements qu'un usager d'origine (i) se rende à une destination (j)

Avec :

$$P_{i,j,m} = \frac{\varphi_{R,j,m}}{C_{i,j}^\alpha}$$

$\varphi_{R,j,m}$: Part de réception d'utilisateur par motifs de déplacements sur une destination (j) en pourcentage

$C_{i,j}$: Coût entre une origine (i) et une destination (j)⁵⁸

α : Coefficient pour le calage du modèle

D'où

$$F_{i,j,m} = E_{i,m} \cdot \left(\frac{\varphi_{R,j,m}}{C_{i,j}^\alpha} \right)$$

Et

$$\varphi_{R,j,m} = \frac{R_{j,m}}{\sum R_{j,m}}$$

$R_{j,m}$: Réception par motifs de déplacements d'une destination (j)⁵⁹

D'où

$$F_{i,j,m} = E_{i,m} \cdot \left(\frac{R_{j,m}}{C_{i,j}^\alpha \cdot \sum R_{j,m}} \right)$$

Cette formulation du modèle nous paraissait correcte. Cependant après quelques exemples réalisés avec des valeurs arbitraires, nous nous sommes rendu compte que notre modèle n'était pas valable. Nous avons donc pris du recul et comparé notre modèle avec un des modèles étudiés en cours, dont le modèle d'HUFF. Ce dernier est aussi un modèle probabiliste qui mesure la probabilité de déplacements d'un individu de se diriger vers une destination. La masse d'usagers par arrêt est donc développée avec une matrice de probabilité. La formulation de cette dernière est la suivante.

$$F_{ij} = n_i \cdot \left(\frac{W_j / D_{ij}^\alpha}{\sum (W_j / D_{ij}^\alpha)} \right)$$

Avec :

F_{ij} = flux probable d'usager entre une origine (i) et une destination (j)

n_i = nombre d'usagers se déplaçant depuis une origine (i)

D_{ij} = distance entre i et j qui s'exprime en temps ou mètres

W_j = poids du lieu de destination

α = paramètre de calibrage

⁵⁸ Le coût peut être représenté sous forme de distance métrique, temporel en seconde, monétaire, environnemental en émission de CO₂ ...

⁵⁹ La réception peut être évaluée en nombre de personnes ou en surface

Finalement en observant notre modèle on s'aperçoit que ce dernier est assez similaire au modèle d'HUFF. En regardant de plus près notre formule, on remarque que la somme des distances entre les origines et destination n'est pas considérée dans notre probabilité. C'est pourquoi, notre modèle ne donnait pas de résultats cohérents, car plus une destination est éloignée d'une origine, moins d'usagers sont probables de s'y déplacer. En outre, c'est bien le cas dans le modèle d'HUFF, mais le fait que cette distance soit divisée par la totalité des distances entre arrêts permet de diminuer cet effet d'éloignement.

En utilisant le modèle d'HUFF, tout en conservant la segmentation des usagers par motifs de déplacements, nous pouvons rectifier l'erreur et obtenir la formulation finale de notre modèle.

$$F_{i,j,m} = E_{i,m} \cdot \left(\frac{\frac{R_{j,m}}{C_{i,j}^\alpha}}{\sum \left(\frac{R_{j,m}}{C_{i,j}^\alpha} \right)} \right)$$

La particularité de notre modèle est que la probabilité pour qu'un individu se déplace vers un lieu défini est estimée en fonction des autres destinations présentant le même critère de déplacements.

Répartition modale

Le modèle présenté estime donc tous les déplacements d'une origine vers une destination. Pour l'étude des flux d'un réseau de transport en commun, il n'est pas nécessaire d'estimer tous ces flux. L'étape de choix modal se réalise en fonction des besoins de l'étude. Dans notre cas, ce sont les transports en commun qui sont analysés. C'est pourquoi suite à l'application du modèle mathématique nous proposons d'attribuer la part modale des transports en commun en fonction des distances (cf. graphique 1). Cette étape permettra de ventiler les flux sur chaque mode de déplacements (voiture, cyclable, transports collectifs...). Les nouveaux flux estimés pour les transports en commun entre une origine et une destination seront donc moins importants⁶⁰. La formule appliquée pour cette étape est la suivante :

$$T_{i,j}(M) = F_{i,j} * D_{i,j}$$

$T_{i,j}(M)$: Flux entre une origine (i) et une origine (j) selon le mode de transport M

$D_{i,j}$: Part modale (pour un mode choisi) pour chaque distance entre (i) et (j)

Conclusion

Ce projet de fin d'études semestrialisé propose donc un modèle mathématique déterminant des flux d'une origine à une destination. En fonction des motifs de déplacements, de la probabilité sur chaque arrêt pour qu'un usager s'y rendre et du choix modal approprié, il est possible d'estimer

⁶⁰ Les flux initiaux représentent 100% des déplacements tandis que les nouveaux flux représenteront seulement la part modale des transports en commun

les flux d'un réseau de transport. Il serait intéressant maintenant de savoir si ce modèle mathématique est bien représentatif de la réalité et adaptable, quel que soit le réseau étudié. En outre, le modèle doit dans un premier temps être calibré grâce à un réseau ou une ligne de transport avec les données réelles. Ce calibrage permettra d'affiner le modèle pour une évaluation plus réaliste des flux. Une fois le modèle calé, il sera possible de le mettre en application et d'estimer les flux d'un réseau ou d'une ligne de transport en commun. L'estimation pourrait ensuite aider les politiques à déterminer des projets de nouvelles lignes de transport. Pour le cas de la ville de Tours et de sa future ligne de tram, aucune étude des flux n'a été réalisée. Le modèle pourra donc être appliqué et alimenter les réflexions sur le projet de la nouvelle ligne.

À la suite de cette première partie de projet de fin d'études, nous allons pouvoir utiliser le modèle conçu pour estimer les flux générés par la nouvelle ligne. Nous serons en mesure d'observer l'impact de notre tracé sur le réseau de transport en appliquant le modèle avec et sans la nouvelle ligne. Par ailleurs, cette application se fera sur l'ensemble ou la majorité du réseau de transport en commun. En amont, nos travaux de recherches se concentreront sur la recherche de données en fonction des choix et des hypothèses retenues pour les motifs de déplacements et l'application du modèle mathématique.

Bibliographie et webographie

Rapports :

- AW, Thierno. « Modèles pour le zonage et la génération des déplacements ». Thèse, Paris-est, 2008.
http://www.lvmt.fr/IMG/pdf/Modele_pour_le_zonage_et_la_generation_des_deplacements.pdf.
- AW, Thierno. « Modélisation des transports pour la simulation et la prospective en Ile-de-France ». Enseignement, Ecole des ponts ParisTech, s. d.
- Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. « Le renouveau du tramway en France ». Rapport.
http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/11001-2_Renouveau-tramway-France_FR.pdf.
- SETRA. « Calage et validation des modèles de trafic ». Guide méthodologique, juillet 2010.
- Sitcat. « Plan de Déplacements Urbains de l'agglomération tourangelle ». PDU. Tours, 2013.

Sites web

- « 37degres-mag ». Consulté le 15 octobre 2016. <http://www.37degres-mag.fr/actualites/tramway-une-deuxieme-ligne-pour-2022/>.
- « Histoire-pour-tous ». Consulté le 13 octobre 2016. <http://www.histoire-pour-tous.fr/inventions/286-invention-du-tramway.html>.
- « La nouvelle République ». Consulté le 10 novembre 2016. <http://www.lanouvellerepublique.fr/Indre-et-Loire/Actualite/24-Heures/n/Contenus/Articles/2014/09/23/Tous-les-chiffres-du-tramway-2055927#>.
- « La nouvelle République ». Consulté le 10 novembre 2016. <http://www.lanouvellerepublique.fr/Indre-et-Loire/Actualite/24-Heures/n/Contenus/Articles/2014/08/30/Jusqu-a-55.000-voyages-dans-le-tram-les-jours-de-pointe-2027724>.
- « La nouvelle République ». Consulté le 10 novembre 2016. <http://www.lanouvellerepublique.fr/Indre-et-Loire/Actualite/24-Heures/n/Contenus/Articles/2016/08/31/Tram-trois-ans-apres-il-fait-presque-l-unaninite-2823314>.
- « larotative ». Consulté le 16 octobre 2016. <https://larotative.info/l-objectif-de-frequentation-du.html>.
- « Localtis ». Consulté le 10 novembre 2016. <http://www.localtis.info/cs/ContentServer?pagename=Localtis/LOCActu/ArticleActualite&ji=1250271808030&cid=1250271802449>.
- « Wikipédia ». Consulté le 12 octobre 2016. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ancien_tramway_de_Tours.
- « amtuir ». Consulté le 10 octobre 2016. <http://www.amtuir.org/>.

Ouvrages :

- Philippe Mathis. *Graphes et réseaux. Modélisation multiniveau*. Hermes Science Publications, 2003.
- Reigner, Hélène, Thierry Brenac, et Frédérique Hernandez. *Nouvelles idéologies urbaines*. Espace et territoires, s. d.

Conférence :

- Nakache, Francis. « Conférence vers des transports moins chers ». Tours, 27 octobre 2016.

Table des illustrations

Carte 1: réseau structurant fil bleu à développer. Source PDU	14
Carte 2: tracé de la ligne de tram actuelle et les extensions proposées.....	15
Tableau 1: Objectifs de répartition modale des déplacements. L'objectif 2023 est fixé sur la délimitation du Périmètre de Transports Urbains de 2012 (25 communes). Source PDU	11
Tableau 2: données d'entrées par motifs non-orientés.....	19
Figure 1 : les quatre étapes du modèle séquentiel (source : CERTU)	17
Figure 2 : formule du modèle de HUFF (source : http://desktop.arcgis.com/fr/)	Erreur ! Signet non défini.