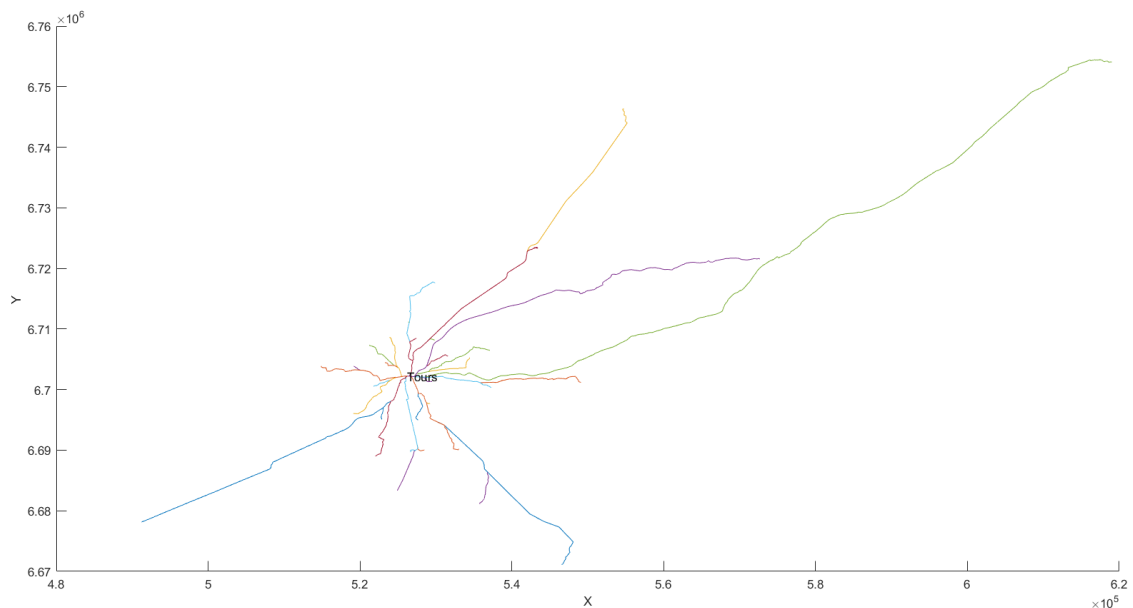


Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2019

Création d'une nouvelle topographie permettant l'écoulement d'un flot de véhicules



Sous la direction de
LAMIRAULT Valentin
MAÏZIA Mindjid
SERRHINI Kamal

AUDURIER Léa
SERRA Pacôme

Création d'une nouvelle topographie permettant l'écoulement d'un flot de véhicules

**Directeurs de recherche
LAMIRAULT Valentin
MAÏZIA Mindjid
SERRHINI Kamal**

**AUDURIER Léa
SERRA Pacôme**

2018-2019

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.

REMERCIEMENTS

Durant ce semestre, nous avons pu compter sur les conseils de nos directeurs de recherche que nous souhaitons remercier :

M. Mindjid MAIZIA, enseignant-chercheur à l'École Polytechnique de l'Université de Tours, Département Aménagement et Environnement, pour son encadrement, ses précieux conseils et pour le temps qu'il nous a accordé.

M. Kamal SERRHINI, enseignant-chercheur à l'École Polytechnique de l'Université de Tours, Département Aménagement et Environnement, pour son suivi tout au long de notre étude ainsi que pour ses conseils avisés.

M. Valentin LAMIRAULT, doctorant sur le « Développement d'un modèle multi-échelle et multimodal de déplacement sur la région Centre-Val de Loire » au sein du Département Aménagement et Environnement de l'École Polytechnique de l'Université de Tours, pour le temps et l'attention qu'il nous a accordé.

Enfin, nous remercions également toutes les autres personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Avertissement.....	3
Remerciements	5
Sommaire	6
Introduction	7
Etat de l'art	8
Définitions	8
Modèles de transport	9
Modèle statique	9
Modèle dynamique	10
Présentation de l'analogie	11
Méthodologie et modélisation	12
Création du relief	12
Modélisation des chemins	13
Résultats	15
Présentation des données d'entrée.....	15
Application au réseau de la région Centre-Val de Loire	16
Conclusion.....	18
Annexes	19
Annexe 1 : Tableaux des flux supérieurs à 100 au départ de Tours.....	19
Annexe 2 : Codes Matlab	20
Bibliographie	24
Table des illustrations.....	25

INTRODUCTION

Les migrations domicile-travail représentent la majorité des déplacements. En effet, les heures de pointe sur le trafic résultent de ces migrations alternantes. L'évaluation de ces flux quotidiens est donc un enjeu majeur pour les politiques publiques ainsi que pour le dimensionnement de voirie.

Il existe différents modèles pour simuler la demande de transport ceux-ci se divisent en deux philosophies. La première étudie le trafic de manière statique avec notamment le modèle gravitaire, et la seconde de manière dynamique, avec l'ingénierie du trafic.

L'enjeu de ce travail est de créer un nouveau modèle, reliant les deux philosophies grâce à une analogie entre l'hydrodynamique et le trafic routier. Le flot de véhicules se comporte de la même façon qu'un fluide et se déplace sur un axe à l'aide de la gravité. Pour mettre en place ce modèle, il est nécessaire d'étudier le comportement d'un fluide sur un axe, et d'élaborer un relief entre des villes afin de faire écouler ce liquide à l'image d'une rivière. Ce PFE s'intéresse à la construction du relief et l'applique au réseau routier de la région Centre-Val de Loire avec les mobilités domicile-travail au départ de Tours. Ce travail est donc à joindre avec un second PFE étudiant l'écoulement d'un liquide le long d'un axe, réalisé en parallèle de celui-ci par MM. Paul LEBRETON et Vincent NOUAILHAT, étudiants de l'École Polytechnique de l'Université de Tours, au Département Aménagement et Environnement.

Nous nous sommes donc posés la question suivante :

Dans quelles mesures l'utilisation de la mécanique des fluides permet de modéliser le déplacement d'un flot de véhicules sur un réseau routier ?

Ce projet de fin d'études étudie plus précisément la question :

Comment créer une nouvelle topographie permettant l'écoulement d'un flot de véhicules à l'aide de la gravité ?

L'hypothèse de départ est d'envisager la fusion des modèles statiques et dynamiques des transports en un nouveau modèle basé sur une analogie entre le trafic routier et l'hydrodynamique.

Ce mémoire s'articule en trois phases. Dans une première partie, l'état de l'art sur les modèles et les définitions de transport est présenté. Dans un deuxième temps, l'approche méthodologique effectuée est expliquée pour la mise en œuvre d'un relief. Enfin, les résultats issus de la modélisation sont appliqués au réseau routier de la région Centre-Val de Loire pour les flux domicile-travail supérieurs 100 au départ de la ville Tours.

Définitions

Pour cette étude, il semble indispensable de préciser quelques définitions concernant la mobilité issues essentiellement du dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement de M. Pierre MERLIN et Mme. Françoise CHOAY.

« Un **déplacement** correspond au mouvement d'une personne d'une origine à une destination.

Le **motif du déplacement** distingue :

- les déplacements entre le domicile et le lieu de travail ou migrations alternantes
- les déplacements scolaires (entre le domicile et le lieu d'études)
- les déplacements à titre professionnel (déplacements d'affaires)
- les déplacements pour achats
- les déplacements pour affaires personnelles
- les déplacements de loisirs (spectacles, promenades, sports, activités sociales, ...)
- les déplacements d'accompagnement (des enfants en particulier)

La **mobilité** est la propension d'une population à se déplacer. La mobilité à l'intérieur d'une agglomération est le plus souvent mesurée par le nombre moyen de déplacements (en excluant les déplacements effectués à pied en totalité) un jour de semaine par ménage ou par personne.

Les **migrations alternantes** (**pendulaires** ou **quotidiennes**) constituent les déplacements quotidiens entre le domicile et le lieu de travail ou le lieu d'étude. La principale caractéristique des migrations alternantes est leur concentration dans le temps, aux heures de pointe, la majorité des horaires de travail étant semblable dans une agglomération.

Le **moyen de transport** (ou **mode de transport**) représente le mode de locomotion permettant de déplacer les personnes ou les marchandises. Les moyens de transport se distinguent entre ceux pour le transport de personnes, le transport de marchandises, les moyens de transport à grande distance (internationaux, intercontinentaux et intérieurs) et les moyens de transport urbains (intérieurs à une ville, une agglomération ou une région urbaine). Parmi les moyens de transport de personnes, il y a les moyens de transports collectifs ou transports en commun, dont le service est offert au public et les moyens de transport individuel.

Le **modèle de distribution géographique des déplacements** constitue un modèle qui permet de déterminer les flux T_{ij} entre chaque origine i et chaque destination j sous forme de matrice. »

(P. MERLIN et F. CHOAY, « Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement », 01/04/2015, 880p)

Un **flux** se rapporte au mouvement migratoire d'une origine à une destination d'une personne en une unité de temps donnée.

Un **flot** de véhicules désigne la quantité de véhicules se déplaçant ensemble en une unité de temps donnée.

Dans le cadre de ce PFE sont étudiées les migrations alternantes ayant un motif professionnel utilisant un moyen de transport individuel. Cela concerne les flux quotidiens reliant le domicile au lieu de travail en voiture particulière dans la région Centre-Val de Loire.

Modèles de transport

L'**accessibilité** rend compte de la possibilité des individus d'atteindre un lieu, une destination, par les systèmes de transport et l'occupation des sols [Geurs & Van Wee, 2004]. L'accessibilité peut déterminer des flux induits par des équipements, pour l'évaluer, différentes méthodes existent. Plusieurs modèles sont employés pour estimer la demande de transport [Lebacque, 2005]. Ces différents modèles se répartissent en deux philosophies: statique et dynamique.

Modèle statique

La modélisation de la demande de transport débute avec le **modèle gravitaire**. Ce modèle gravitaire résulte d'une analogie avec la loi de la gravitation universelle de Newton : les échanges entre deux zones, deux villes, seront proportionnels à la population présente dans ces zones et à l'inverse du carré de la distance qui les sépare [Bonnell, 2002].

$$T_{ij} = \frac{k \cdot P_i \cdot P_j}{D_{ij}^2}$$

T_{ij} : Nombre de migrants de i vers j
 k : Constante du niveau global de mobilité
 P_i et P_j : Population des zones i et j
 D_{ij} : Distance entre les zones i et j

Le modèle permet de prévoir sur une infrastructure envisagée, les déplacements futurs. Ainsi, grâce à ce modèle, l'évaluation du trafic futur sur l'ensemble du réseau routier est possible selon différents scénarii d'installations d'infrastructures ou d'élargissements de voiries existantes.

Le caractère universel du modèle permet son application d'une ville à une autre à travers le monde en modifiant uniquement les entrées du modèle, l'urbanisation et les infrastructures imaginées. Le modèle gravitaire fut développé aux Etats-Unis puis utilisé en France vers 1960 sous la forme du modèle dit à « quatre étapes » [Debizet, 2012 ; Enault, 2012].

Le modèle gravitaire ou de Reilly a donc donné naissance au **modèle à quatre étapes**. Ce dernier, encore en vigueur de nos jours, est un modèle permettant l'étude des déplacements futurs, d'estimer le potentiel de déplacements entre différentes zones urbaines [Debizet, 2011]. Il s'agit d'un modèle statique. En effet, les flux sont modélisés tout au long d'une période de temps donnée sur une zone d'étude. Le choix de la zone d'étude dépend de l'objectif de celle-ci (les déplacements domicile-travail au sein de la région Centre-Val de Loire dans notre étude).

Comme son nom l'indique, le modèle à quatre étapes s'effectue en quatre phases (Figure 1). La première permettant de quantifier la demande de déplacement. C'est l'étape dite de **génération**. Elle consiste à déterminer le nombre de déplacements émis ou attirés par les zones de l'aire d'étude. La seconde phase, celle de **distribution**, consiste à déterminer où va la demande à l'aide d'une matrice Origine-Destination (OD). Elle permet de connaître l'ensemble des déplacements entre les différentes zones, c'est une distribution spatiale.

Grâce à l'étape de **répartition modale**, chaque déplacement est connu. Cette phase de répartition permet de connaître les déplacements entre une origine et une destination selon les modes de transport proposés desservant la liaison (usage de la voiture particulière, les transports en commun, ou les modes doux (à pied, à vélo)). La dernière étape, dite d'**affectation**, permet d'affecter chaque demande de déplacement à un chemin en fonction de son mode de transport. L'estimation de la charge sur les différents arcs des réseaux de chacun des modes est effectuée. Ainsi, les débits sur les infrastructures, la fréquentation des services de transports en commun sont obtenus.

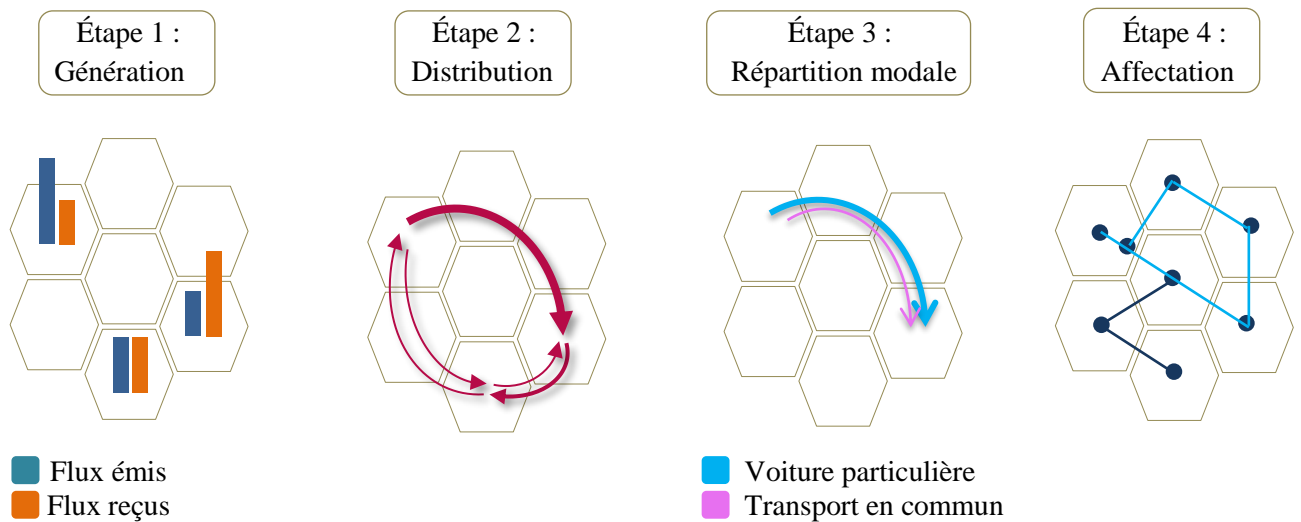


Figure 1 : Schéma du modèle à quatre étapes - Source : Debizet, 2011 - Réalisation : Léa AUDURIER

Le modèle gravitaire de Huff est considéré comme un modèle d'accessibilité, il délivre la probabilité qu'un individu en une origine i rejoigne une destination j . Dans le cas des déplacements domicile-travail, la probabilité des flux entre i et j repose sur le nombre d'emplois de chaque destination et du temps de trajet entre le lieu de résidence et le lieu travail.

En France, jusqu'à la fin du XX^{ème} siècle, au sein des villes, se sont développés de façon croissante des modèles unimodaux ne prenant en compte dans la simulation des déplacements qu'un unique mode de transport. Un modèle fut appliqué pour la planification des infrastructures routières et un autre pour les transports en commun. La planification des transports fut ensuite réalisée avec une perception multimodale de la mobilité qui a conduit à l'adoption des modèles multimodaux, en vigueur à l'étranger. Ces modèles multimodaux ont supplanté ceux unimodaux au début des années 2000 en France [Bonnell, 2002 ; Debizet, 2011].

Le modèle statique possède des limites. En effet, il ne s'appuie pas sur une demande de transport qui évolue pendant la période d'étude. De plus, il ne prend pas en compte les interactions et les fluctuations de la demande de déplacements entre les différents pas de temps et distance du réseau. Il s'appuie uniquement sur des hypothèses de fonctionnement des déplacements.

Modèle dynamique

Le **modèle dynamique** s'oppose au modèle à 4 étapes. Ce modèle décrit l'écoulement d'un trafic sur un réseau. Pour cela, le déplacement des véhicules est simulé sur une route. Le débit, la vitesse du flot de véhicules, la capacité de l'infrastructure, et la concentration du trafic sont alors pris en compte. De plus, les interactions du flot de véhicules sont intégrées au modèle. En effet, les conducteurs ont conscience les uns des autres et vont

ainsi éviter les collisions en augmentant la distance de sécurité lors de vitesses élevées ou en diminuant la vitesse au fur et à mesure que la concentration augmente. Pour évaluer le trafic, le modèle dynamique comporte une échelle macroscopique et une échelle microscopique :

- Le niveau **macroscopique** décrit l'écoulement global du flot de véhicules. Le trafic est alors caractérisé par une densité de véhicules de manière à traduire son comportement général. Cela permet notamment d'expliquer les phénomènes de congestion. Ce niveau est utilisé pour la modélisation de réseau à petite échelle.
- Le niveau **microscopique** représente l'écoulement du flot sur le réseau à l'échelle du véhicule. L'objectif de cette échelle est de décrire le comportement d'un conducteur par rapport aux autres. La conduite doit alors être décrite par un coefficient d'agressivité correspondant à l'intensité des freinages et des accélérations des différents conducteurs en fonction de la situation. L'allure du conducteur sera impactée par sa conduite et par le véhicule qui le précède en respectant les lois mathématiques de poursuite. Ce modèle est principalement utilisé pour modéliser l'évolution du trafic à grande échelle tel que les changements de voie, les carrefours, les giratoires, les feux ...

Un niveau mésoscopique existe également entre les deux et peut représenter la modélisation d'automobiles par paquets. Cette échelle peut prendre en compte les échanges entre les Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI).

Les modèles dynamiques qu'ils soient à l'échelle macroscopique ou microscopique décrivent le déplacement de véhicule sur un réseau. Ces méthodes d'analyse du trafic ne prennent pas en compte la génération des flux et se concentrent sur l'étude de l'évolution du trafic.

Présentation de l'analogie

Les modèles dynamiques et statiques possèdent des limites bien distinctes. En effet, le modèle statique ne prend pas en compte l'évolution du trafic, alors que le modèle dynamique n'étudie pas la génération des flux et donc leur affectation.

L'hypothèse de départ est d'estimer possible la fusion des questions de génération des flux et de leur distribution du modèle statique et l'étude de l'écoulement du flot du modèle dynamique. Pour rendre possible cette fusion, nous créons un nouveau modèle basé sur l'analogie entre le trafic routier et l'hydrodynamique.

Il est supposé que les véhicules se comportent comme un fluide qui coule le long d'un axe. Une goutte d'eau sur un axe représente un véhicule sur une route et se déplace sur celui-ci grâce à la gravité. Pour démontrer cette analogie, un premier binôme travaille sur le comportement d'un fluide sur un axe, le second élabore dans ce PFE les chemins en relief entre les villes afin de faire écouler ce liquide. L'altitude des chemins est considérée selon les flux domicile-travail entre les communes. En effet une ville génératrice de mobilités professionnelles sera une commune en haut de la pente, et les villes attractrices, sources d'emplois, seront en bas de la pente. Grâce à cette représentation l'écoulement du fluide est envisageable.

METHODOLOGIE ET MODELISATION

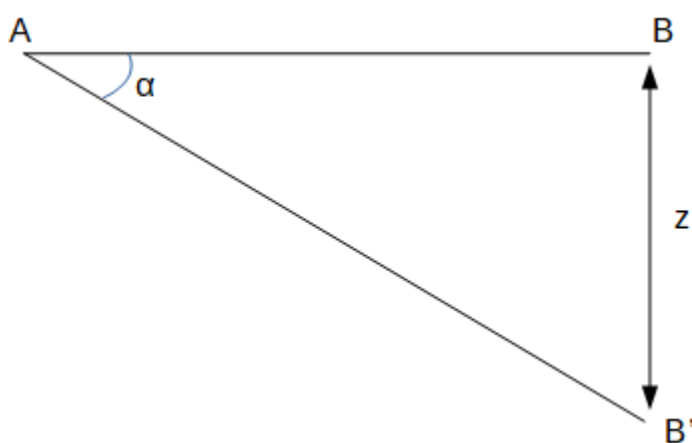
Création du relief

L'analogie entre le déplacement de véhicules et l'écoulement d'un fluide pose certains problèmes. En effet, une automobile peut se déplacer sur un axe sans relief, alors qu'un liquide ne subissant pas de pression n'en est pas capable. Pour permettre le déplacement du fluide, deux options sont possibles : soit une pression est appliquée au liquide, à l'aide d'une pompe par exemple, soit un relief est créé et le liquide coule à l'image d'une rivière. Nous avons modélisé un relief car celui-ci permet une analogie directe avec le modèle gravitaire. Nous pouvons aisément imaginer une ville génératrice de flux, en hauteur, et une ville attractrice de flux, plus basse, qui attirerait les flux. Ce déplacement serait permis par la gravitation.

Le relief permet ainsi une représentation de la zone d'étude en trois dimensions. Les axes x et y représentent les coordonnées géographiques actuelles des villes. Cependant, l'axe z n'a aucune signification topographique. Il convient donc de déterminer sa valeur. Ce relief permettant le déplacement de l'eau, deux villes ayant des échanges devront avoir une hauteur différente, la ville génératrice en haut et celle attractrice en bas. Deux villes n'échangeant pas de flux auront donc la même hauteur. De cette représentation découle une importante contradiction. Les villes sont à la fois génératrices et attractrices de flux. En effet, une ville ne peut pas à la fois être plus basse et plus haute qu'une autre ville. Pour répondre à ce problème, l'analogie avec l'hydrodynamique est valable pour un seul pôle générateur à la fois.

La valeur du z sur l'axe étant déterminée en fonction des échanges entre la commune génératrice de flux et les communes réceptrices. Cette hauteur varie en fonction de la quantité de personnes transitant d'une ville à une autre. Cependant, la distance entre deux villes entre également en jeu, à l'image du modèle gravitaire de Huff incluant la distance entre deux points.

Pour expliquer le calcul de hauteur prenons une ville A génératrice et une ville B réceptrice (Figure 2).



L'angle α est déterminé par le flot entre A et B. Par exemple, 1° correspond à un nombre de voyageurs et α ne peut pas être supérieur ou égale à 90° . Le point B' est l'image du point B avec une hauteur appliquée. À l'aide des formules de trigonométrie, nous obtenons comme hauteur z entre B et B' :

$$z = \tan(\alpha) * AB.$$

Plus les flux entre A et B sont importants, plus la hauteur z sera grande. La longueur AB' représente donc une homothétie de AB dont le rapport est déterminé par le flot de véhicules entre la commune A et la commune B.

Figure 2 : Schéma de la représentation de z - Réalisation : Pacôme SERRA

Pour la représentation des flux, nous placerons la ville génératrice à l'altitude zéro et les communes réceptrices à des altitudes négatives. L'axe z étant maintenant déterminé et la hauteur des villes calculée, il est nécessaire d'appliquer ce calcul au réseau.

Modélisation des chemins

Le réseau à l'échelle de la région Centre-Val de Loire est trop compliqué pour analyser tous les chemins empruntés par les voyageurs. Nous avons donc fait l'hypothèse que la totalité des flux emprunte le chemin le plus court entre deux villes. Le tracé de ce chemin est obtenu à l'aide de l'algorithme de Dijkstra. En théorie des graphes, cet algorithme permet de déterminer le plus court chemin pour se déplacer d'une ville à une autre lorsque le réseau routier, dans notre cas, est connu. La distance de chaque arc du réseau est prise en compte pour établir le plus court chemin.

Une fois les chemins reliant les villes obtenus, nous pouvons déterminer leurs altitudes. Pour obtenir celles-ci, une interpolation linéaire entre la hauteur du point d'origine et celle du point de destination doit être faite. Cependant, certains axes peuvent être empruntés par plusieurs flux. Une question se pose alors : quelle hauteur doit-être affectée au tronçon en commun ? Pour répondre à cette question prenons un exemple avec trois communes : la commune A génératrice de déplacements, les communes B et C réceptrices de flux. Les flux depuis A empruntent la même route pour se rendre à B ou C, mais la commune B est plus proche et échange davantage de flux avec la commune A.

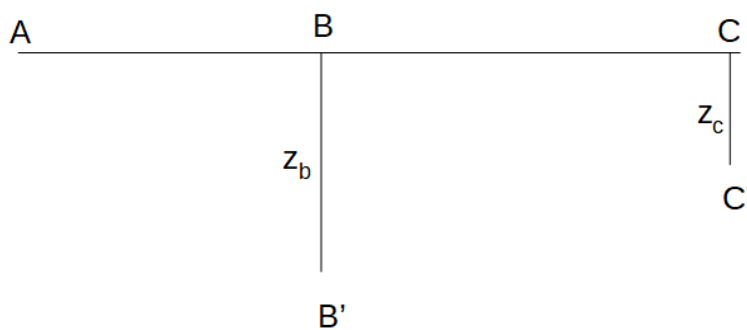


Figure 3 : Schéma des hauteurs associées - Réalisation : Pacôme SERRA

Sur la figure ci-contre (Figure 3) B' et C' sont les images respectives des points B et C avec les hauteurs z_b et z_c déterminées à l'aide de la formule présentée précédemment.

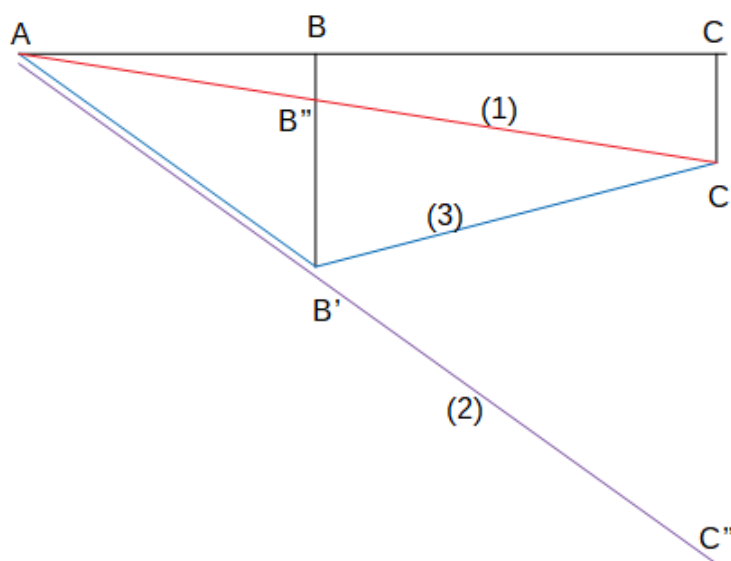
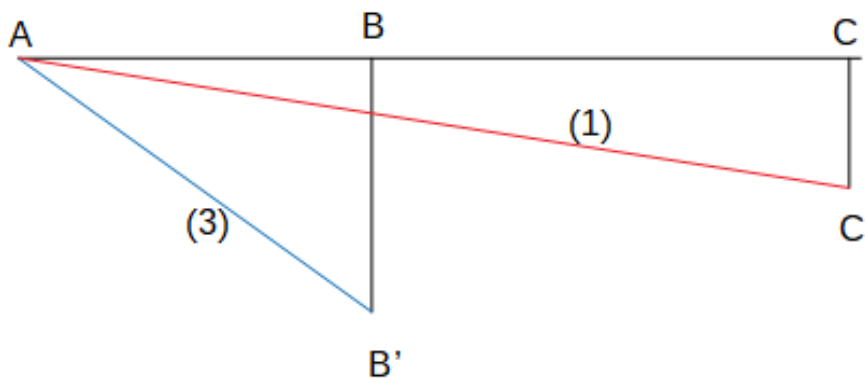


Figure 4 : Schéma des différents chemins en fonction de l'interpolation - Réalisation : Pacôme SERRA

Sur la figure 4, la droite (1) représente la route de A à C' si l'interpolation linéaire était faite en fonction de C' et la droite (2) si l'interpolation linéaire était faite en fonction de B'. B'' l'image de B en fonction de la droite (1) n'est pas égale à B', de même pour C'' en fonction de la droite (2). Si l'interpolation de la hauteur de la route était faite uniquement en fonction de l'un des deux points, la hauteur de l'autre point serait erronée. L'interpolation ne peut donc pas se faire uniquement en fonction du point B' ou C'.

Une autre alternative serait d'effectuer l'interpolation en fonction de la hauteur du point B', puis du point C', cela est représenté par le chemin (3). Cependant, cette représentation ne serait pas en accord avec l'analogie. En effet, le liquide coule de haut en bas, et ne pourrait donc pas aller de B' à C'. Ces trois représentations ne peuvent donc pas être utilisées pour déterminer l'altitude de l'axe.

Afin de respecter la position des villes en trois dimensions et de maintenir l'analogie de l'écoulement d'un fluide, le choix a été fait d'interpoler l'altitude des axes en fonction des flux séparément. Prenons l'exemple ci-dessous (Figure 5), la droite (1) représente le chemin entre A et C' en fonction de la hauteur de ce dernier; de même la droite (3) représente le tronçon entre A et B'. Le flux entre A et B' emprunte donc l'axe (3) et celui entre A et C' l'axe (1).



*Figure 5 : Schéma de l'utilisation de chemins distincts
- Réalisation : Pacôme SERRA*

Cette représentation revient à estimer que les flux de A à B et de A à C empruntent des chemins différents. En généralisant à l'ensemble des flux, il existe autant de chemins que de destinations.

Une fois le modèle obtenu, nous souhaitons l'appliquer au réseau routier de la région Centre-Val de Loire pour les flux domicile-travail au départ de la ville Tours.

Présentation des données d'entrée

Le réseau routier et les communes de la région Centre-Val de Loire proviennent des BD_TOPO de l'IGN (2015) des départements du Cher (18), de l'Eure-et-Loir (28), de l'Indre (36), de l'Indre-et-Loire (37), du Loir-et-Cher (41), et du Loiret (45) (Figure 6). Le réseau routier a été modifié dans le but de représenter uniquement les routes empruntées par les actifs en voiture particulière, ainsi par exemple les « escaliers » ou les « pistes cyclables » ont été exclus.

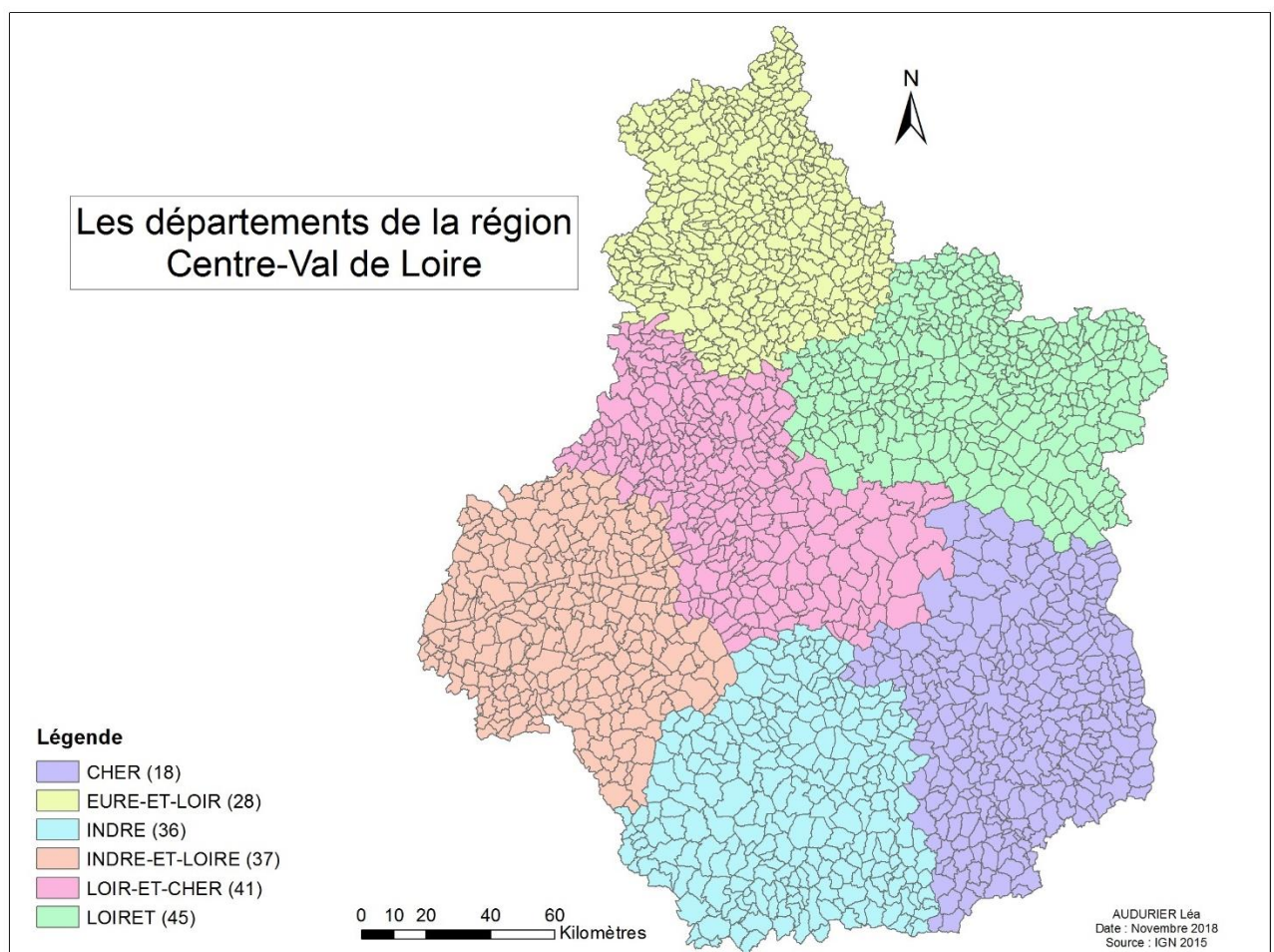


Figure 6 : Carte de la région Centre-Val de Loire - Réalisation Léa AUDURIER avec ArcMap

Les flux domicile-travail décrivant le nombre de personnes se déplaçant de leur commune de résidence à leur lieu de travail sont issus de l'INSEE. Ces données proviennent du recensement de la population de 2010 et seuls les flux professionnels entre deux communes supérieurs à 100 sont fournis. Le fichier a été modifié afin de conserver seulement les déplacements professionnels au sein de la région Centre-Val de Loire.

Application au réseau de la région Centre-Val de Loire

La méthodologie appliquée au réseau routier de la région Centre-Val de Loire permet de modéliser uniquement un cas à la fois. Une seule commune peut ainsi être génératrice de flux par carte. L'exemple exploité représente les mobilités professionnelles issues de Tours vers les autres villes de la région Centre-Val de Loire. Il existe 33 communes employant plus de 100 Tourangeaux dans la région [Annexe 1]. Sur la carte suivante (Figure 7), les 33 chemins empruntés sont représentés en fonction de la quantité des flux au départ de la ville de Tours.

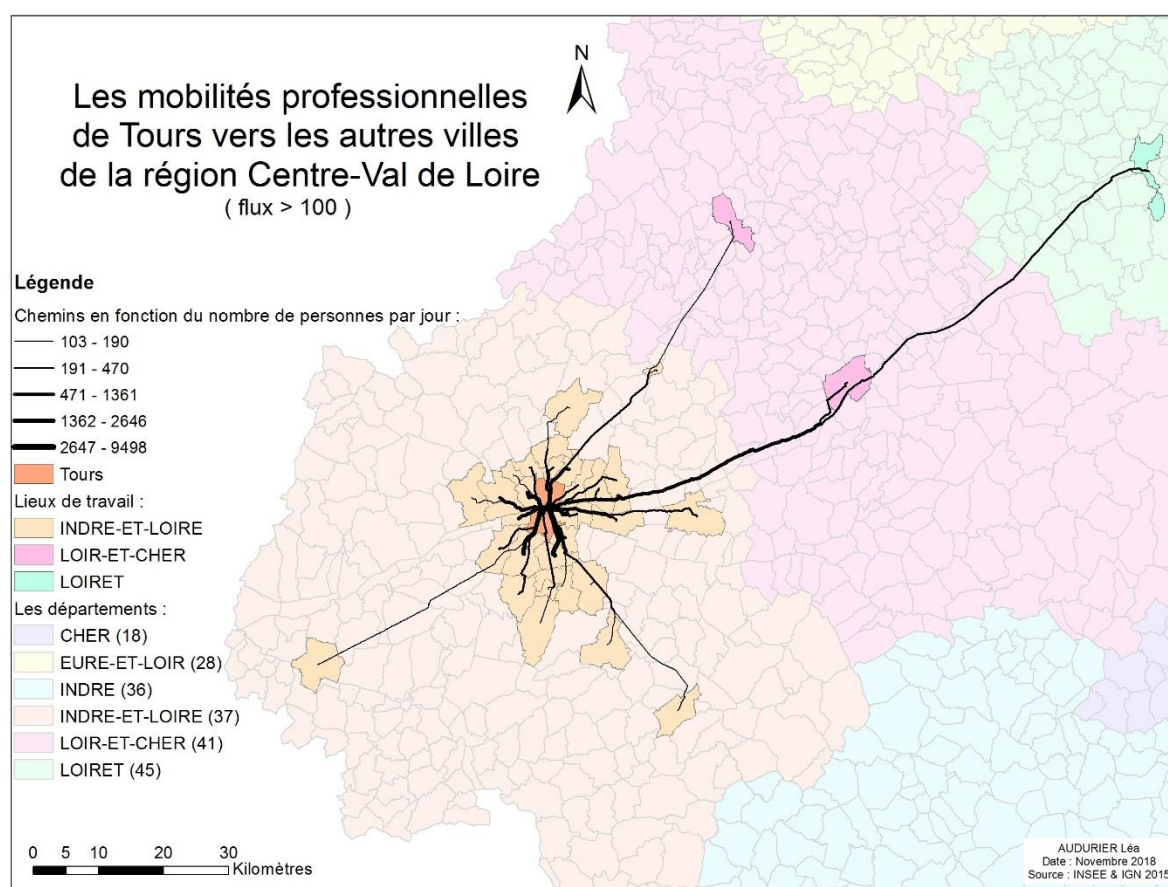


Figure 7 : Carte des chemins empruntés par les flux domicile-travail au départ de Tours - Réalisation Léa AUDURIER avec ArcMAP

Les modélisations suivantes (Figure 8 & Figure 9) présentent le relief en fonction des flux pour les trajets domicile-travail à partir de la commune de Tours [Annexe 2]. Les communes ne recevant pas de flux de Tours ne sont pas affichées dans la modélisation. Chaque trait de couleur représente le plus court chemin des actifs de leur commune de résidence, Tours, vers leurs lieux de travail. L'altitude de la ville de Tours est fixée à zéro et les communes réceptrices ont des altitudes négatives. Bien que certains chemins utilisent les mêmes tronçons de routes, ils ne se superposent pas dans le relief. Le flot de véhicules peut alors être étudié comme une rivière qui coule depuis une source (Tours), vers l'aval (la destination).

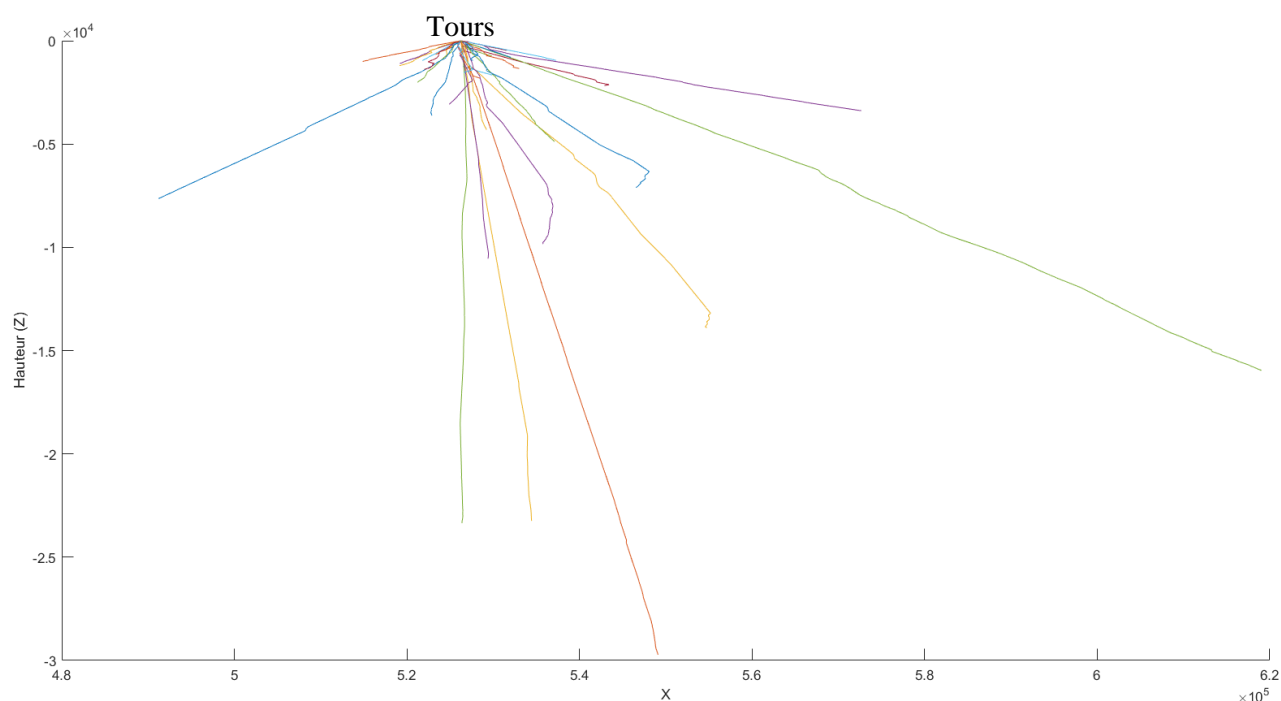


Figure 8 : Relief en fonction des flux au départ de Tours - Réalisation Pacôme SERRA avec Matlab

Le déplacement de flots de véhicules via la mécanique des fluides est applicable sur ce réseau en relief. Il est possible de visualiser l'ordre d'arrivée des flux au départ de Tours vers leur destination. L'ensemble des flux ayant une altitude plus élevée (villes recevant moins de flux) rejoindra les lieux de travail plus rapidement que ceux sur des chemins avec une altitude plus faible (communes réceptrices de davantage de flux).

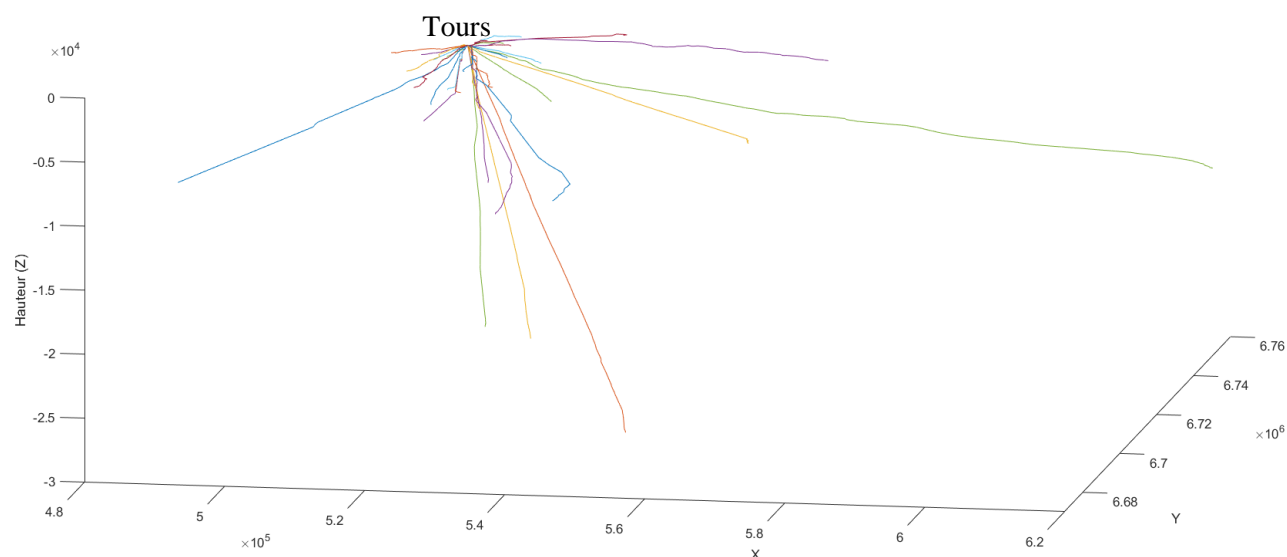


Figure 9 : Relief en 3D - Réalisation Pacôme SERRA avec Matlab

Ce modèle a été appliqué aux flux depuis Tours. Cependant, il est tout à fait possible d'effectuer cette analyse avec comme origine les 2 336 autres communes de la région Centre-Val de Loire ou des villes d'autres régions, ou encore à une échelle inter-régionale.

CONCLUSION

L'objectif de ce PFE fut de créer un nouveau modèle simulant le trafic routier en intégrant à la fois l'évolution dynamique et l'affectation des flux respectivement présentes dans les modèles dynamiques et statiques. Pour cela, nous avons fait une analogie entre l'hydrodynamique et le trafic routier en supposant qu'un flot de véhicule se comporte de la même façon qu'un liquide sur un axe.

À travers ce PFE, nous avons étudié le trafic résultant du flot d'actifs interurbains à l'échelle de la région Centre-Val de Loire. Cette étude explique également la méthodologie pour créer un relief afin de permettre l'écoulement d'un fluide sur les pentes. Ce relief modélise les plus courts chemins entre la commune d'origine et les destinations, il est appliqué aux déplacements domicile-travail au départ de Tours au sein de la région Centre-Val de Loire. Il est évidemment possible de modifier les données d'entrée du modèle et le choix du chemin emprunté.

L'analogie avec l'hydrodynamique génère différentes limites. Nous avons admis qu'il existait dans la modélisation autant de chemins que de destinations. Ainsi, les flux ne sont pas en mesure de se cumuler sur un axe. De plus, il est nécessaire de mentionner que le comportement des molécules dans un liquide est différent de celui des conducteurs. Effectivement, dans un liquide les molécules n'ont pas conscience des autres, alors que les conducteurs ajustent la vitesse de leur véhicule en fonction de la concentration du trafic et de la voirie.

Ce modèle de transport possède donc des limites, il est judicieux de rappeler que les modèles présentés dans l'état de l'art en recensent également, ainsi il n'existe pas de modèle universel pour décrire le déplacement des voyageurs.

Il serait pertinent d'effectuer la méthodologie pour plusieurs scénarii. Par exemple, en l'appliquant à un autre réseau pour des déplacements avec des motifs multiples. Néanmoins, afin d'obtenir un modèle plus complet, ce PFE est à mettre en relation avec celui de MM. Paul LEBRETON et Vincent NOUAILHAT intitulé « Vers un modèle hydrostatique d'écoulement du trafic », se rapportant au comportement d'un fluide le long d'un axe, réalisé en parallèle de celui-ci. En effet, ces études ont un point de départ commun : la thèse en cours de M. Valentin LAMIRAULT sur le développement d'un modèle multi-échelle et multimodal de déplacement sur la région Centre-Val de Loire. Ces deux projets de fin d'études se positionnent comme une première approche pour cette thèse.

Annexe 1 : Tableaux des flux supérieurs à 100 au départ de Tours

CODE INSEE	COMMUNE RESIDENCE	X	Y
37 261	Tours	526 235,6	6 702 226,3

CODE INSEE	COMMUNE TRAVAIL	X	Y	FLUX
37 003	Amboise	549 098,5	6 701 206,9	288
37 054	Chanceaux-sur-Choisille	526 384,2	6 711 180,2	127
37 063	Château-Renault	542 892,8	6 723 398,5	188
37 273	La Ville-aux-Dames	532 057,0	6 701 713,5	223
37 156	Montlouis-sur-Loire	537 271,7	6 700 350,1	415
37 172	Notre-Dame-d'Oé	527 420,1	6 708 485,8	326
37 175	Nouzilly	529 875,3	6 717 598,1	147
37 179	Parçay-Meslay	529 819,9	6 708 161,3	653
37 203	Rochecorbon	531 583,8	6 705 525,6	248
37 270	Vernou-sur-Brenne	537 087,5	6 706 463,5	207
37 281	Vouvray	534 442,6	6 705 273,3	254
37 050	Chambray-lès-Tours	527 640,5	6 694 965,4	1993
37 104	Esvres	533 015,2	6 690 222,7	184
37 132	Loches	546 553,9	6 671 136,4	131
37 154	Montbazoin	526 643,7	6 689 736,8	190
37 159	Monts	522 022,1	6 689 039,6	219
37 208	Saint-Avertin	529 218,3	6 697 695,6	1024
37 233	Saint-Pierre-des-Corps	529 409,3	6 701 264,9	2075
37 250	Sorigny	524 909,6	6 683 331,1	150
37 254	Tauxigny	535 788,1	6 681 134,3	151
37 266	Veigné	528 480,3	6 690 032,7	109
37 018	Ballan-Miré	519 129,3	6 696 050,8	229
37 072	Chinon	491 212,9	6 678 130,1	145
37 122	Joué-lès-Tours	522 887,2	6 695 088,7	1971
37 195	La Riche	521 795,1	6 700 536,2	610
37 109	Fondettes	519 189,7	6 703 853,7	593
37 151	La Membrolle-sur-Choisille	521 218,8	6 707 324,0	137
37 139	Luynes	514 875,8	6 703 887,3	124
37 152	Mettray	523 910,4	6 708 672,9	289
37 214	Saint-Cyr-sur-Loire	523 327,3	6 704 506,8	1503
41 018	Blois	572 639,9	6 721 515,0	417
41 269	Vendôme	554 753,2	6 746 329,4	103
45 234	Orléans	619 016,9	6 754 069,2	235

Annexe 2 : Codes Matlab (possible à partir de la version 2015b)

Fonction calculant le relief des chemins à partir des flux, de la position des villes et du réseau

Réalisation : Pacôme SERRA

```
function z1=relief(G,flxc,xy)
for i= 1: length(flxc)
    rute =shortestpath(graph(G),flxc(i,1),flxc(i,2)); % Détermination du chemin le plus court
    z=zeros(1,length(rute)); % Initialisation de la hauteur de départ à 0
    for k = 2:length(rute)
        z(k)=z(k-1)-G(rute(k-1),rute(k))*tan(flxc(i,3)*70/max(flxc(:,3))*pi/180); % Calcul de la hauteur le long
        du chemin
    end
    plot3(xy(rute,1),xy(rute,2),z);
    hold on
    z1(i)=z(length(rute));
end
end
```

Fonction extrayant les points et les routes d'un réseau pour créer une matrice d'adjacence

Réalisation : Mindjid MAÏZIA

```
function [vertices,faces,adjacence,idfaces,idnodes]=polyadjacence(XY)
vertices=cell2mat(XY);
xyi=inf(numel(XY),size(vertices,2));
xyj=inf(numel(XY),size(vertices,2));
s=inf(size(vertices,1),1);
cpt=1;
for i=1:numel(XY);
    xyi(i,:)=XY{i}(1,:);
    xyj(i,:)=XY{i}(end,:);
    n=size(XY{i},1);
    s(cpt:cpt+n-1)=i;
    cpt=cpt+n;
end
idpt=s;
arc=[s(1:end-1) s(2:end)];
faces=[1:numel(s)-1;2:numel(s)]';
id=arc(:,1)==arc(:,2);
faces(id==0,:)=[];

[vertices,i,j]=unique(vertices,'rows');
faces=j(faces);
idpt=idpt(i);
```

```

faces=unique(faces,'rows');

pt=find(isnan(vertices(:,1)));
f=sum(ismember(faces,pt),2)>0;
faces(f,:)=[];
vertices(pt,:)=[];
idpt(pt)=[];
arc(f,:)=[];

[k,~,j]=unique(faces);
faces=reshape(j,size(faces));
[pt,i]=unique(faces(:));
idnodes=inf(size(vertices,1),1);
idnodes=idpt;
idfaces=idnodes(faces(:,1));

adj=faces;
adj=[adj;adj(:,[2 1])];
adj(:,3)=1;
n=size(vertices,1);
adj(end+1,:)= [n n inf];
adjacence=spconvert(adj);

```

Code appliquant la fonction polyadjacence pour créer une matrice d'adjacence

Réalisation : Mindjid MAÏZIA

```

pthnm='F:\PFE\'; % Emplacement du réseau routier sur l'ordinateur
flnm='route_centre';
import=shaperead([pthnm flnm]);
XY=import.ncst;
[xy,arc,adjacence,idfaces,idnodes]=polyadjacence(XY);
% Calcul des distances 2 à 2
xi=xy(arc(:,1),1);yi=xy(arc(:,1),2);
xj=xy(arc(:,2),1);yj=xy(arc(:,2),2);
dij=sqrt((xi-xj).^2+(yi-yj).^2);

n = size(xy,1); % Nombre de sommets du réseau
Dij=[arc dij];
Dij(end+1,:)= [n n 0]; % Représentation verticale
Dijc=spconvert(Dij);
Dijc=Dijc+Dijc'; % Création d'une matrice d'adjacence

```

Code appliquant la fonction relief aux flux domicile-travail partant de Tours

Réalisation : Pacôme SERRA

```

% Déterminer l'ensemble des origines et des destinations
xyI=roundn(xy,-1); % Arrondi des coordonnées pour les faire coïncider
xyI=[526235.6 6702226.3]; % Point de départ
xyJ=[549098.5 6701206.9
526384.2 6711180.2
542892.8 6723398.5
532057 6701713.5
537271.7 6700350.1
527420.1 6708485.8
529875.3 6717598.1
529819.9 6708161.3
531583.8 6705525.6
537087.5 6706463.5
534442.6 6705273.3
527640.5 6694965.4
533015.2 6690222.7
546553.9 6671136.4
526643.7 6689736.8
522022.1 6689039.6
529218.3 6697695.6
529409.3 6701264.9
524909.6 6683331.1
535788.1 6681134.3
528480.3 6690032.7
519129.3 6696050.8
491212.9 6678130.1
522887.2 6695088.7
521795.1 6700536.2
519189.7 6703853.7
521218.8 6707324
514875.8 6703887.3
523910.4 6708672.9
523327.3 6704506.8
572639.9 6721515
554753.2 6746329.4
619016.9 6754069.2]; % Points d'arrivée
I=find(ismember(xyI,xyI,'rows')); % Trouver le numéro du point de départ dans le graphe
J=find(ismember(xyI,xyJ,'rows')); % Trouver le numéro des points d'arrivée dans le graphe

% Déterminer des flux
flx=[288
127
188
223
415
326
147
653

```

```

248
207
254
1993
184
131
190
219
1024
2075
150
151
109
229
145
1971
610
593
137
124
289
1503
417
103
235];
flxc=[];
for i=1:length(flz)
    flxc(i,1)=I; % Ajout du point d'origine dans la table des flux
    flxc(i,2)=J(i); % Ajout du point de destination dans la table des flux
    flxc(i,3)=flz(i); % Ajout des flux dans la table des flux
end

% Calcul de la hauteur et affichage
z=relief(Dijc,flxc,xy1);

```

BIBLIOGRAPHIE

BONNEL, Patrick. *Prévision de la demande de transport*. Economies et finances. Université Lumière - Lyon II, 2002. [consulté le 20/11/2018] Disponible sur : https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/268919/filename/HDR_Bonnel_Patrick.pdf

CHANUT, Stéphane. *Modélisation dynamique macroscopique de l'écoulement d'un trafic routier hétérogène poids lourds et véhicules légers*. 298 p. Thèse. INSA de Lyon, 2005. [consulté le 03/12/2018] Disponible sur: http://theses.insa-lyon.fr/publication/2005ISAL0040/these.pdf?fbclid=IwAR0x87B7iZAJ1AcD-QcvP8ORJ-Ndve9tB22QAtzJnHhEQ-xTK8YT8WBup_g

COHEN, Simon, DANECH-PAJOUH, Mehdi. *Initiation à l'ingénierie du trafic routier*. 122 p. Support de cours. 2000. [consulté le 01/12/2018] Disponible sur : http://mdpdanech.free.fr/PDF-rap/initiation-traffic.pdf?fbclid=IwAR0Z_S9oDZq2PtnKE55Y51JgxlQVnlkPkjZUJeBLR6J_dj6BK33YvYDvgY

DEBIZET, Gilles. *Crise ou mutation de l'expertise en transport et mobilité ? Action publique face à la mobilité*. L'Harmattan, pp.139-162, 2010, Logiques sociales.

DEBIZET, Gilles. *L'évolution de la modélisation des déplacements urbains en France 1960-2005 : Le poids de l'organisation institutionnelle des transports*. Flux, 2011/3 n° 85-86, p. 8 - 21.

DEYMIER, Ghislaine, NICOLAS, Jean-Pierre. *Modèles d'interaction entre transport et urbanisme : état de l'art et choix du modèle pour le projet SIMBAD*. 50 p. Rapport intermédiaire n°1. Rapport de recherche. 2005.

ENAULT, Cyril. *Simulation de l'étalement urbain de Dijon en 2030 : approche systémique de la dynamique gravitaire ville-transport*. Cybergeog : European Journal of Geography [en ligne], n° 592, 2012. [consulté le 25/11/2018] Disponible sur : <https://journals.openedition.org/cybergeog/25157>

GEURS, Karst T., VAN WEE, Bert. *Accessibility evaluation of land-use and transport strategies : review and research directions*. Journal of Transport Geography, 2004, n°12. p. 127 - 140.

LEBACQUE, Jean-Patrick. *Simulation et modélisation des transports*. Forum Simulations et Transports, Paris, 2005. [consulté le 25/11/2018] Disponible sur : <http://actions-incitatives.ifsttar.fr/fileadmin/uploads/recherches/geri/ntic/NTIC7-20janv05/presLEBACQUE.pdf>

MAÏZIA, Mindjid. *Systèmes Urbains et Transport*. 198 p. Manuel pour l'ingénieur dans le domaine des transports urbains. Université de Tours : EPU-DAE.

MERLIN, Pierre, CHOAY, Françoise. *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Quadrige, 2015 [4^{ème} édition]. 880 p.

MINT MOUSTAPHA, Jyda. *Modélisation mathématique et simulation du trafic routier : analyse statistique de modèles d'insertion et simulation probabiliste d'un modèle cinétique*. 137 p. Université Paris-Est, 2014. [consulté le 03/12/2018] Disponible sur : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01144601/document?fbclid=IwAR0ORYUR0RPbn52hvJSfb1_nGcMDKOPQcXm71Smvz_Dl1xg4zDRUfe_oaqVI

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Schéma du modèle à quatre étapes	10
Figure 2 : Schéma de la représentation de z	12
Figure 3 : Schéma des hauteurs associées	13
Figure 4 : Schéma des différents chemins en fonction de l'interpolation	13
Figure 5 : Schéma de l'utilisation de chemins distincts	14
Figure 6 : Carte de la région Centre-Val de Loire	15
Figure 7 : Carte des chemins empruntés par les flux domicile-travail au départ de Tours	16
Figure 8 : Relief en fonction des flux au départ de Tours	17
Figure 9 : Relief en 3D	17

Directeurs de recherche :

LAMIRAULT Valentin
MAÏZIA Mindjid
SERRHINI Kamal

AUDURIER Léa
SERRA Pacôme
PFE/DAE5
Réseau
2018-2019

Création d'une nouvelle topographie permettant l'écoulement d'un flot de véhicules

Résumé :

À l'origine des heures de pointe quotidiennes sur le trafic routier, les déplacements domicile-travail parcourent des distances de plus en plus grandes. L'objectif de ce travail est d'étudier le trafic résultant du flot d'actifs interurbains à l'échelle de la région Centre-Val de Loire.

Ce PFE étudie la création d'un nouveau modèle simulant le trafic routier. Celui-ci intègre à la fois l'évolution dynamique et l'affectation des flux respectivement présentes dans les modèles dynamiques et statiques. Pour se faire, une analogie entre le trafic routier et l'hydrodynamique est élaborée. Il est supposé qu'un flot de véhicules se comporte de la même façon qu'un liquide sur un axe. La gravité permettant l'écoulement de ce liquide, nécessite des pentes. Un relief modélisant les chemins les plus courts entre une origine et une destination est donc créé et appliqué aux déplacements domicile-travail au départ de Tours au sein de la région Centre-Val de Loire.

Mots Clés : flux domicile-travail, modélisation, relief