

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2019

Vers un modèle hydrostatique d'écoulement du trafic

Sous la direction de
M. LAMIRAULT
M. MAIZIA
M. SERRHINI

Paul LEBRETON
Vincent NOUAILHAT

Vers un modèle hydrostatique d'écoulement du trafic

M. MAIZIA
M. SERRHINI

2018-2019

**Paul LEBRETON
Vincent NOUAILHAT**

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

Nous tenons à remercier sincèrement nos tuteurs pour l'accompagnement et l'aide qu'ils nous ont fourni.

Tout d'abord, nous adressons nos remerciements à M. Mindjid MAIZIA, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, Département Aménagement et Environnement, pour ses nombreux conseils et son suivi très assidu de l'avancement de notre PFE.

Nous remercions également M. Kamal SERRHINI, Enseignant-Chercheur à l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, Département Aménagement et Environnement, pour son suivi tout au long de ce semestre ainsi que le temps qu'il nous a accordé.

Nous tenons également à remercier M. Valentin LAMIRAULT, pour sa présence et sa disponibilité, et lui souhaitons bon courage pour la rédaction de sa thèse.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui nous ont apportés un soutien dans notre travail.

SOMMAIRE

Avertissement	2
Remerciements	4
Sommaire	5
Introduction	6
Synthèse bibliographique	7
Les modèles statique du trafic : du modèle gravitaire au modèle à quatre étapes	9
Le modèle gravitaire, une analogie entre trafic et gravitation	7
Modèle à quatre étapes	8
Limite du modèle à quatre étape	9
Les modèles d'écoulement dynamique d'un flot de véhicules	12
Les modèles microscopiques : principes et limites	10
Principes de l'approche microscopique	10
Limites du modèle microscopique	11
Les modèles macroscopiques : principes et limites	11
Principes de l'approche macroscopique	11
Limites du modèle macroscopique	13
Méthodologie de recherche	14
Résultats de recherche	19
Conclusion	23
Bibliographie	25
Table des illustrations	26
Table des annexes	27
Annexes	28

INTRODUCTION

Depuis une soixantaine d'années, la modélisation des déplacements urbains est un outil d'aide à la décision particulièrement décisif des politiques de transport [Debizet, 2011].

Face à des préoccupations environnementales grandissantes et devant l'ampleur des pollutions entraînées par la congestion, cette dernière est de moins en moins tolérée par les municipalités et par les usagers de la route. Pourtant, actuellement, les voies rapides urbaines de la majorité des principales agglomérations font face à une congestion importante et croissante. Ce phénomène représente d'une part une perte de temps importante pour les usagers, et d'autre part une pollution - sonore et environnementale - supplémentaire [Costesque, 2012].

Grâce à une modélisation du trafic plus fine, permettant de mieux appréhender, de mieux comprendre et donc de mieux anticiper les trajets, les gestionnaires du réseau sont en capacité de limiter cette congestion, source de nuisances pour tous. On comprend alors facilement l'intérêt grandissant que les professionnels et autres gestionnaires du réseau portent aux modélisations du trafic.

C'est ainsi que, dans le but de mieux comprendre et reproduire ce phénomène réel complexe, des modèles de transport sont apparus et désormais, de plus en plus d'acteurs proposent et vendent des logiciels permettant de simuler le trafic sur un réseau. [Debizet, 2011 ; Deymier et Nicolas, 2005]. Deux grandes familles de modélisations - appelées modèles d'affectation et modèles d'écoulement - ont peu à peu vu le jour, prenant la problématique du transport sous des angles différents [Bonnell, 2002]. Toutefois, bien que tout à fait opérationnels et efficaces, ces modèles ne permettent pas de représenter la réalité du trafic urbain routier.

Ainsi dans certains modèles, l'échelle d'étude étant particulièrement large, le nombre de véhicules étudié devient rapidement trop important. Cela ne permet pas la prise en compte de tous les éléments nécessaires à la prédiction et à la description de leurs trajectoires individuelles, et donc d'en déduire un comportement microscopique. A l'inverse, dans d'autres modèles, le nombre de véhicules étudié étant trop faible, il est impossible de leur appliquer les principes de la physique des milieux continus, comme pratiqué, de manière générale, pour les fluides [Costesque, 2012].

L'objectif de ce Projet de Fin d'Études est de proposer un nouveau modèle d'écoulement du trafic, appelé modèle hydrostatique, permettant de dépasser les modélisations traditionnelles du trafic. L'étude des limites du modèle présenté sera effectuée dans une perspective d'amélioration critique du modèle.

La première partie de ce projet consiste en une synthèse bibliographique de la modélisation du trafic routier. Cet état de l'art permettra de dégager les grands avantages et les grandes limites de chaque modèle et ainsi de poser les bases du modèle hydrostatique. La seconde partie du projet consiste en une présentation détaillée de la méthode suivie permettant de réaliser l'analogie fondatrice de notre travail. Suite à cela, une partie de projet est dédiée à la présentation des résultats obtenus via le modèle hydrostatique. Enfin, dans une dernière partie, les principaux résultats obtenus seront étudiés dans une discussion exposant les limites du modèle.

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Le trafic routier, décrit de manière triviale, correspond au “processus de transport depuis une origine et vers une destination par le moyen des infrastructures routières” [Costeseque, 2013]. Le trafic routier est souvent considéré comme étant la somme des comportements individuels des usagers sur un réseau, cherchant à rejoindre leur destination respective, depuis leur point d’origine.

La simulation du trafic, qui s’attache à décrire le comportement du trafic sur un réseau, repose sur deux grandes familles de modèles. On distingue en effet généralement :

- Les modélisations statiques du trafic
- Les modélisations dynamiques d’écoulement du trafic

Ces modèles permettent l’observation d’un même phénomène, avec une approche différente. Ainsi, ils sont tous deux utilisés, mais pas par les mêmes entités et pas pour les mêmes raisons. Dans un premier temps, les modèles statique, donnant la mesure globale des flux entre deux masses de population seront étudiés. Viendra dans un second temps l’étude des modèles dynamique d’écoulement, qui considèrent le trafic comme un flot s’écoulant sur un réseau.

Les modèles statiques du trafic : du modèle gravitaire au modèle à quatre étapes

Historiquement, les modèles statiques sont les modèles les plus anciens permettant la mise en place d’études de planification [Bonnell, 2002]. C’est véritablement grâce à l’invention du modèle gravitaire que la modélisation des déplacements urbains prit son essor. Cette nouvelle manière de modéliser les déplacements a donné naissance aux modèles “à quatre étapes”, modèles encore en vigueur aujourd’hui. Dans cette partie, les modèles gravitaires ainsi que le modèle à quatre étapes seront étudiés.

Le modèle gravitaire, une analogie entre trafic et gravitation

L’approche gravitaire est l’approche la plus utilisée pour modéliser le trafic [D’Aubigny et al., 2007 ; Enault, 2012]. Ce modèle repose sur l’hypothèse suivante : les échanges entre origines et destinations dépendent des capacités de génération et d’attraction des lieux ainsi que de la distance les séparant [Enault, 2012]. Cette popularité est due, entre autres, à l’évidence de son hypothèse de base, et à la relative simplicité de leur application mathématique [D’Aubigny et al. 2007].

La modélisation gravitaire permet de déterminer l’intensité d’une relation entre plusieurs entités géographiques (aires urbaines, villes, quartiers ...), ne prenant en compte que leur poids et leur distance l’une de l’autre. Cela nécessite que le territoire soit « découpé » en zones, pour lesquelles est affectée une population.

C’est William J. Reilly qui posa les bases de l’affectation statique du trafic dans son article *The Law of Retail Gravitation* en 1931, lorsqu’il fait une analogie entre le trafic et la loi de la gravitation universelle de Newton. [Bonnell, 2002 ; Moindrot, 1975].

Dans sa théorie, deux villes vont attirer les commerces d’un bourg plus petit, en fonction de :

- la population respective des deux villes, de manière proportionnelle (plus la population des villes est élevée, plus l’attraction exercée par les villes est forte).
- la distance séparant les villes au bourg, de manière inversement proportionnelle (plus la distance est grande, moins l’attraction exercée par les villes est forte).

Selon la Loi de Reilly, l'attraction d'une ville est fonction de sa population, et de la distance séparant la zone considérée à cette ville [Bonnell, 2002 ; Debizet, 2011 ; Moindrot, 1975].

Le modèle gravitaire peut donc s'exprimer de la manière suivante :

$$Q_i = G \frac{M_i M_j}{x_{ij} x_{ij}} = G \frac{M_i M_j}{x_{ij}^2}$$

Avec :

M_i : La population de la zone i étudiée

M_j : La population de la zone j étudiée

G : une constante

x_{ij} : La distance séparant les zones i et j étudiées

Q_i : Le débit routier émis à partir de la zone i vers la zone j

[Bonnell, 2002 ; Deymier et Nicolas, 2005 ; Enault, 2012]

Ainsi, le modèle gravitaire permet d'affirmer que la zone de chalandise d'une ville de 50 000 habitants et deux fois moins étendue que celle d'une ville de 100 000 habitants. Ce modèle, bien qu'approximatif, a posé les bases nécessaires, pour rendre compte des aires d'attraction urbaines. Les observations locales - correspondant à un module de distribution - (enquête OD, étude démographique, enquête ménage, etc.) permettent de caler les constantes du modèle. Le modèle gravitaire, traitant les flux du territoire zone à zone, permet également d'estimer les déplacements futurs via des hypothèses d'urbanisation future [Debizet, 2011].

Au modèle gravitaire s'ajoute une méthode d'affectation (précédée parfois par un module de répartition modale), qui permet d'estimer le trafic attendu sur chaque tronçon du réseau routier (prenant en compte les principales caractéristiques du réseau, à savoir la vitesse des véhicules et le débit sur une portion de route), suivant la méthode du chemin le plus court.

C'est grâce à la fusion du modèle gravitaire et d'un module d'affectation qu'est né le modèle à quatre étapes [Debizet, 2011].

La partie suivante va s'attacher à décrire le modèle à quatre étapes, modèle permettant l'évaluation du trafic sur l'ensemble du réseau routier.

Modèle à quatre étapes

Le modèle à quatre étapes est un modèle "universel" éprouvé et utilisé par de nombreux outils de simulation. Encore d'actualité aujourd'hui, car relativement utilisé, ce modèle est un outil permettant de prévoir la demande en déplacement sur un territoire d'étude. Ce modèle vise à prévoir une demande de déplacement futur, à partir de laquelle le trafic est calculé sur chaque tronçon du réseau. Il reprend les mêmes hypothèses que le modèle gravitaire, à savoir l'urbanisation future des différentes zones d'une agglomération.

Le modèle à quatre étapes permet de représenter le choix de l'individu en quatre étapes :

- Etape 1 : l'Étape de génération :

Définition : L'étape dite de génération correspond au choix de l'individu de se déplacer ou de ne pas se déplacer. Cette étape permet de déterminer le nombre de déplacements, réalisés par les individus, émis ou reçus par chacune des zones de l'aire d'étude.

- Etape 2 : l'Étape de distribution :

Définition : L'étape dite de distribution correspond au choix de la destination par l'individu.

A l'étape précédente, l'individu a décidé de se déplacer, à cette étape, il décide de sa destination. Cette étape permet de construire la matrice OD (Origines-Destinations) des déplacements, ainsi un volume de déplacements est attaché à chaque couple OD.

- Etape 3 : l'Étape de la répartition modale :

Définition : L'étape de la répartition modale n'est autre que le choix du mode de transport, réalisé par l'individu, pour effectuer son déplacement. Cette étape permet d'obtenir le nombre de déplacements par mode, pour chaque couple OD.

- Etape 4 : l'Étape de l'affectation :

Définition : L'étape d'affectation correspond au choix posé par l'individu de son itinéraire pour réaliser son déplacement, avec son mode de transport donné. Cette étape permet d'obtenir la charge de trafic sur chaque tronçon du réseau. Il s'agit ici d'une affectation statique. Elle ne permet que le calcul de plus court chemin, sans prendre en compte le phénomène de propagation du trafic.

[Bonnel, 2002 ; Debizet, 2011]

A la fin de ces quatre étapes, on connaît donc le nombre d'utilisateur ainsi que leur répartition modale sur chaque tronçon routier.

Les différentes étapes du modèle à quatre étapes sont résumées dans ce schéma.

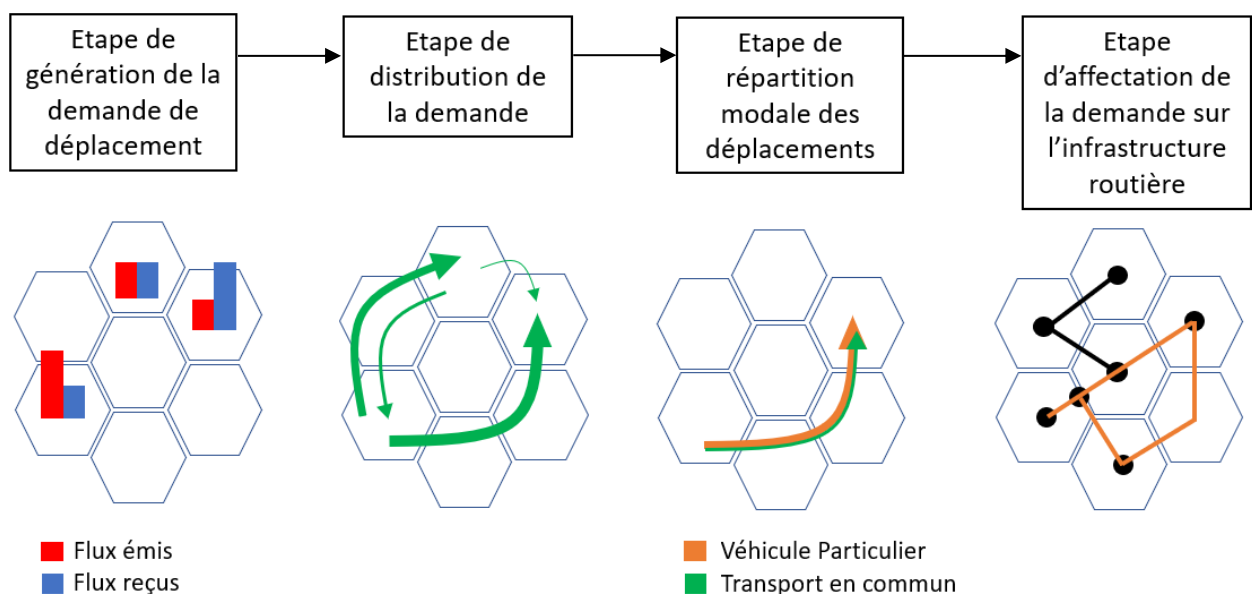


Figure 1: Schéma des quatre étapes. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT d'après Fibo, 2010

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A8le_de_d%C3%A9placements_MODUS

Ce modèle permet l'estimation du trafic futur sur le réseau selon différentes hypothèses d'élargissement de voies et/ou de création de nouvelles infrastructures. Toutefois, ce modèle présente une limite majeure.

Limite du modèle à quatre étapes

En effet, ce modèle n'introduit à aucun moment la notion de dynamique. Il se contente de renseigner le trafic sur un tronçon du réseau routier : il s'agit là d'un travail statique.

La prochaine partie de ce travail s'attachera à décrire les modèles d'écoulement dynamique des véhicules sur un réseau, proposant une approche différente de la modélisation du trafic.

Les modèles d'écoulement dynamique d'un flot de véhicules

Les modèles d'écoulement du trafic sont fondés sur une analogie avec les lois d'écoulement des fluides. Ces modèles introduisent la notion de dynamique. Il existe différents modèles permettant de considérer le trafic comme un flot. Cette partie va particulièrement traiter deux des modèles les plus répandus : le modèle microscopique et le modèle macroscopique, ainsi que de leurs limites respectives. L'impasse est volontairement faite sur les modèles mésoscopiques, modèles très proche des modèles macroscopiques, à la simple différence qu'ils sont appliqués à des ensembles finis de véhicules.

Les modèles microscopiques : principes et limites

Principes de l'approche microscopique

Les modèles microscopiques cherchent à reproduire le comportement de chaque couple véhicule-conducteur. La vision microscopique étudie donc l'ensemble des trajectoires individuelles des véhicules. Les variables utilisées pour décrire chaque trajectoire sont :

- La position du véhicule i au temps t , notée $x_i(t)$;
- La vitesse instantanée du véhicule i au temps t , notée $v_i(t) = \dot{x}_i(t)$;
- L'accélération du véhicule i au temps t , notée $a_i(t) = \ddot{x}_i(t)$;
- La longueur du véhicule i notée L_i ;
- L'interdistance entre le véhicule i et son véhicule leader ($i-1$) au temps t , notée $S_i(t) = x_{i-1}(t) - x_i(t)$;
- La vitesse relative du véhicule i par rapport à son véhicule leader ($i-1$) au temps t , notée $\hat{S}_i(t) = \dot{x}_{i-1}(t) - \dot{x}_i(t)$.

[Chanut, 2005]

Puisque chaque véhicule est individualisé, ce type de modèle s'approche le plus près possible du comportement réel des véhicules. Ces modèles visent à reproduire la façon dont réagit un véhicule en fonction de l'évolution de son environnement, c'est-à-dire, en fonction de :

- L'infrastructure sur laquelle il circule.
- Le comportement des véhicules qui l'entoure.

Pour ce faire, ces modèles sont basés sur l'analyse, relativement simplifiée, de la conduite réelle d'un conducteur. Ces analyses mettent en lumière les principaux comportements des conducteurs, qui sont :

- L'assimilation d'informations en provenance de leur environnement (vibrations du véhicule, indications de son tableau de bord - vitesse, tour par minute, niveau d'essence, etc. - position des véhicules environnants, etc.).
- Le traitement de toutes ces informations.
- La prise de décision.
- L'action, via une commande du véhicule.

[Costeseque, 2013 ; Chanut, 2005]

Ainsi, en fonction des informations que le conducteur perçoit via son environnement, ces actions peuvent être simplifiées à la gestion de l'accélération de son véhicule (celui-ci peut soit accélérer, soit freiner), et à la gestion de la direction de son véhicule (changement de voie ou non). Ainsi, l'action de conduire se décompose en sous-tâches : le contrôle de l'accélération, ou modèle de voiture-suiveuse, et le contrôle de la direction, ou modèle de changement de files [Bourrel, 2003 ; Costeseque 2013].

Les modèles microscopiques possèdent des limites, que la partie suivante va s'attacher à décrire.

Limites du modèle microscopique

Dans la modélisation microscopique, le trafic automobile est assimilé, comme observé précédemment, à un flot. Les véhicules sont alors identifiés à des particules en interaction. Cette modélisation, très utile, permet la simulation à petite échelle du trafic. Cependant, cette modélisation se révèle n'être plus cohérente pour certaines applications comme l'évaluation des réseaux, la planification ou encore la gestion du trafic, demandant une étude plus globale et moins "fine".

L'utilisation des modèles microscopiques est bien souvent limitée par la difficulté d'accès aux descriptions détaillées des dynamiques individuelles des véhicules.

La force des modèles microscopiques, mais également leur faiblesse, réside dans le fait qu'ils offrent une grande richesse de détails, ce qui les rend difficile d'utilisation à large échelle et en temps réel. Ce modèle est donc bien adapté à la représentation des phénomènes locaux. Le trafic est bien décrit à petite échelle, mais au vu de ces trop nombreux paramètres, ce modèle ne permet pas de rendre compte des comportements à plus grande échelle.

De plus, les modèles microscopiques s'attachent à décrire le plus fidèlement possible le comportement du conducteur. Or le comportement humain est impossible à modéliser parfaitement dans toute sa complexité. Ainsi, ces modèles se basent sur des hypothèses simplificatrices :

- Les conducteurs sont identiques
 - Les conducteurs ne tiennent compte que des véhicules devant eux
 - Les conducteurs optimisent leur vitesse en permanence
 - Aucune prise en compte psychologique du conducteur : fatigue, stress, agressivité, baisse de l'attention ...
- [Costeseque, 2013]

Ces hypothèses, souvent critiquées, notamment par Boer et van Winsum, d'après [Bourrel, 2003] font l'impasse sur la flexibilité, l'adaptabilité et la non-rationalité de l'être humain. En bref, ces hypothèses ignorent la "nature humaine". Dans certains travaux, comme dans ceux réalisés par Bourrel dans [Bourrel, 2003], il est avancé que les équations utilisées dans les modèles microscopiques ne sont pas suffisantes pour décrire et appréhender, dans toute sa complexité, le trafic. Hancock avance même, d'après [Bourrel, 2003], qu'il faudrait, pour améliorer les modèles, introduire des éléments de psychologie du conducteur.

La partie suivante va présenter une nouvelle modélisation dynamique du trafic : la modélisation macroscopique du trafic.

Les modèles macroscopiques : principes et limites

Comme pour les modèles microscopiques, les modèles macroscopiques sont construits par analogie avec la dynamique des fluides. Ils reposent sur un constat de base : le comportement du trafic est proche de celui d'un fluide, lorsqu'il est observé à grande échelle. Ainsi, le trafic est considéré comme un flot homogène et continu de véhicules. Les articles fondateurs de ces modèles ont été rédigés par Lighthill et Whitham en 1955 et par Richards, en 1956, donnant le nom de modèle LWR au premier modèle macroscopique [Chanut, 2005 ; Bourrel, 2003]. Toutefois, contrairement aux modèles microscopiques, l'objet de ces modèles est de caractériser le comportement du trafic dans sa globalité et à une échelle d'étude relativement grande (minutes, pour le temps et centaines de mètres, pour la distance). Ces modèles sont très utilisés dans la modélisation de réseaux de tailles importantes. Ils sont également utiles dans la simulation du trafic en vue de la planification mais également en vue de la conception des infrastructures. Ils couvrent également la gestion dynamique du trafic [Chanut, 2005]. Cette partie va brosser les principes de base des modèles macroscopiques ainsi que leurs limites.

Principes de l'approche macroscopique

Les modèles macroscopiques du trafic caractérisent le comportement global des flots de véhicules via trois grandeurs physiques [Chanut, 2005]:

- le débit routier (Q) : le nombre de véhicules passant par un point par unité de temps, en nombre de véhicules par unité de temps.
- la concentration, ou la densité (K) : le nombre de véhicules circulant sur une section du réseau à un instant t , en nombre de véhicules par unité de longueur.
- la vitesse moyenne (V) de ces véhicules, la vitesse moyenne des véhicules sur une section du réseau, à un instant t , en unité de longueur par unité de temps.

Ces trois variables sont considérées comme étant continu en fonction du temps t et de l'espace.

Comme énoncé précédemment, la modélisation macroscopique du trafic est basée sur une analogie avec la mécanique des fluides. Analogie qui permet l'obtention d'une relation fondamentale, entre le débit, la concentration et la vitesse : $Q(x, t) = K(x, t) \cdot V(x, t)$ [Costeseque, 2013 ; Bourrel, 2003]

Dans le cas de modèles macroscopiques du premier ordre, ou modèle LWR, le flot est en équilibre constant au sein du tronçon. Ce modèle est le plus simple et le plus connu des modèles macroscopiques.

Dans un modèle du premier ordre, il existe un équilibre des flots entrants et sortants.

Il est alors possible d'exprimer une relation pour traduire cet équilibre des flots au sein d'un tronçon :

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} + \frac{\partial K(x, t)}{\partial t} = 0$$

[Bourrel, 2003 ; Costeseque, 2013]

Le nombre de voiture en entrée de section est le même que le nombre de véhicules en sortie de section, c'est-à-dire, on considère qu'il n'existe ni entrées, ni sorties sur le réseau étudié.

Les modèles d'ordres supérieurs, bien plus complexes, ne sont pas étudiés ici. Il convient tout de même de préciser que le modèle d'équilibre y est substitué par deux équations aux dérivées partielles.

Il existe une troisième relation liant toutes ces variables, qui permet de connaître, à concentration donnée, l'une des 2 autres variables décrivant le trafic.

Cette équation est donnée par : $V(x, t) = V_e(K(x, t))$

$$V = V_{eq}(K) \text{ ou } Q = Q_{eq}(K) \text{ ou } V = V_{eq}(Q)$$

[Chanut, 2005 ; Costeseque, 2013]

L'équation la plus employée est celle donnant le débit en fonction de la concentration. Dans le domaine de la modélisation du trafic routier, cette courbe est nommée "diagramme fondamental". Cette relation suppose que le trafic se trouve toujours dans un état d'équilibre.

Greenshields, en 1934, est le premier à proposer une forme parabolique de ce diagramme, sur la base de données de terrains [Bourrel, 2003].

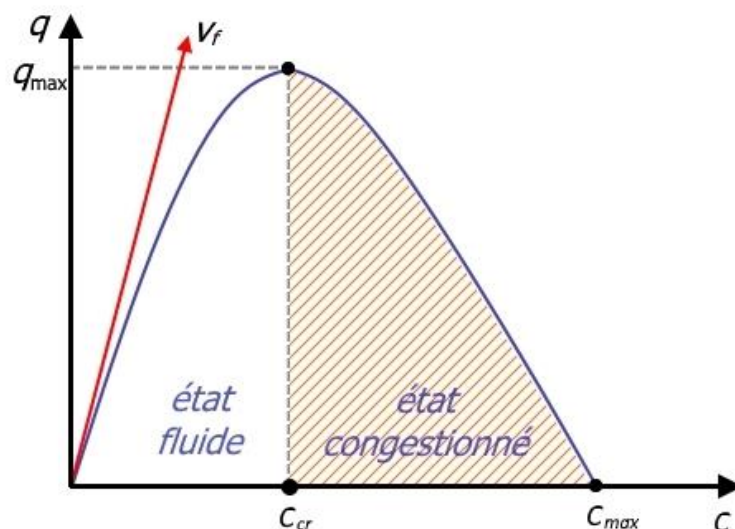


Figure 2 : Diagramme de Greenshields. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Quand la concentration est nulle, c'est-à-dire, quand aucun véhicule ne circule sur le tronçon observé, le débit est alors nul. Le débit augmente avec la concentration en véhicules, mais de moins en moins vite. En effet, les véhicules vont se "gêner" les uns les autres, jusqu'à atteindre la capacité maximale de l'infrastructure, où le débit est maximal. Une fois cette concentration critique passée, le débit diminue si la concentration en véhicules continue d'augmenter. Le débit devient nul lorsqu'on a atteint la concentration maximale du réseau. Cette situation correspond à un trafic totalement congestionné, où les voitures sont à l'arrêt.

Ce diagramme met en évidence deux états du trafic : le trafic « fluide », la concentration en véhicules est inférieure à la concentration dite critique, et le trafic « congestionné », où la concentration est supérieure à la concentration critique [Chanut, 2005 et Derbel, 2014].

Toutefois, ces modèles, bien que très performants, possèdent des limites, qui vont être explorées dans la partie suivante.

Limites du modèle macroscopique

Les modèles macroscopiques, défini dans cette partie, considèrent le trafic comme un flot de véhicules, par analogie avec la mécanique des fluides.

Ces modèles, particulièrement bien adaptés aux grandes échelles, se révèlent peu pertinent quand il s'agit de représenter le trafic de manière précise et à une échelle plus réduite.

Pour illustrer ces propos, prenons l'exemple d'une personne souhaitant décrire finement l'écoulement du trafic en un point spécifique du réseau. Il semble que l'utilisation du modèle macroscopique soit totalement inadaptée pour différentes raisons.

D'une part car il sera difficile de juger de la pertinence des indicateurs macroscopiques (comme la concentration ou le débit) étant donné la longueur de la section étudiée (quelques dizaines de mètres, tout au plus). D'autre part, la variabilité des comportements individuels ne sera pas retranscrite, du fait d'un nombre de véhicules considérés trop faible [Costeseque, 2012 et Bourrel, 2003].

Les modèles macroscopiques reposent, par l'analogie avec l'hydrodynamique, sur une hypothèse de continuité du flot de véhicules, hypothèse très simplificatrice. En effet, dans un fluide, on peut considérer que le nombre de particules, par litre par exemple, est tel que le fluide peut être considéré comme étant un milieu continu.

Or, d'après Lebacque [Lebacque, 2010], à l'échelle du kilomètre, la concentration maximum sur autoroute (telle que communiquée par les exploitants) vaut environ 180 véhicules par kilomètres par voie (soit environ 1 véhicules tous les 5 mètres). Au vu de ce faible nombre de "particules" constituant le flot du trafic, on ne peut pas considérer le flot de véhicules comme un fluide continu.

De plus, de par leur échelle d'étude, les modèles macroscopiques ne prennent pas en compte le caractère unique de chaque véhicule. Ainsi, les mêmes critiques exprimées précédemment pour les modèles microscopiques peuvent être émises pour les modèles macroscopiques : le comportement plus ou moins agressif des conducteurs, la fatigue, le stress, les temps de réponse à un stimulus, etc. ne sont pas pris en compte. Les conducteurs ont des comportements tellement différents que leur réponse face à une même situation peut varier du tout au tout. De plus, les véhicules n'ont pas les mêmes caractéristiques (poids lourd, ou véhicule léger par exemple) : différence de capacité d'accélération, vitesse, occupation de voie différente ... De cette diversité de comportement résulte, en réalité, une forte variabilité des caractéristiques de l'écoulement [Costeseque, 2012 et Bourrel, 2003].

Dans cette partie, une description vient d'être donnée des différents modèles - et plus précisément de leurs principes et limites - permettant la modélisation du trafic. De ces différents modèles, certaines caractéristiques vont être conservées, pour poser les bases d'un nouveau modèle. La partie suivante va donc s'attacher à décrire la manière dont a été mené le travail de recherche permettant la réalisation du modèle hydrostatique.

METHODOLOGIE DE RECHERCHE

L'objectif de ce travail est d'obtenir la vitesse des véhicules circulant sur le réseau grâce à une analogie avec la mécanique des fluides. Pour obtenir ce résultat, il faudra effectuer une "fusion" des deux théories de modélisation du trafic. Ainsi, à partir du modèle d'affectation statique et du modèle d'écoulement dynamique du trafic, un nouveau modèle va être proposé, qui conservera certaines des spécificités des deux autres modèles, et qui permettra de s'acquitter de certaines de leurs limites respectives.

Cette partie va s'attacher à explorer quelles caractéristiques, issues des modèles présentés précédemment, le nouveau modèle héritera.

Tout d'abord, le modèle hydrostatique reprend les grands principes du modèle gravitaire. Il traite bien d'une relation prenant en compte la distance séparant deux nœuds, ainsi que l'attraction et la génération de chacun de ces nœuds. Toutefois, le modèle gravitaire traite de l'intensité de la relation entre chaque nœud, alors que le modèle hydrostatique traite de la vitesse entre chaque nœud. En revanche, tout comme le modèle gravitaire, le déplacement de flux est observé de façon statique.

Comme tous les modèles d'affectation, le modèle proposé héritera de plusieurs étapes du modèle à quatre étapes, à savoir la génération, la distribution et l'affectation. En effet, le modèle proposé nécessite en entrée une matrice Origine-Destination, ce qui correspond aux étapes une et deux du modèle à quatre étapes. De plus, le modèle héritera également de l'étape d'affectation, étape correspondant au choix posé par l'individu de son itinéraire, via l'utilisation de la fonction dijkstra. Dans le modèle, l'hypothèse émise est que l'individu choisit toujours l'itinéraire le plus court pour se rendre d'un point A à un point B. Néanmoins, le modèle à quatre étapes compte une étape numéro trois, dite de répartition modale, que le modèle hydrostatique ne prend pas pleinement en compte, puisque ce modèle ne s'intéresse qu'aux déplacements effectués en voiture.

Ensuite, du modèle d'écoulement microscopique, il semble nécessaire de conserver une hypothèse simplificatrice importante, à savoir : les conducteurs sont considérés comme étant identiques, et la "psychologie" du conducteur n'est pas prise en compte. Cette simplification permet de considérer tous les véhicules comme identiques, se déplaçant à la même vitesse, ou ayant une même accélération. En revanche, le modèle microscopique traite une échelle beaucoup trop réduite pour notre modèle, cette caractéristique ne sera donc pas retenue. De plus, dans le modèle microscopique, chaque véhicule est vu comme une entité à part entière ayant des caractéristiques propres (vitesse, position, accélération ...). Ce niveau de détail n'est pas nécessaire, puisque le modèle hydrostatique considérera l'ensemble des véhicules comme un flot.

Enfin, grâce à l'analogie avec la mécanique des fluides, ce nouveau modèle héritera de l'hypothèse de continuité des flux, présente dans les modèles macroscopique d'écoulement. Cette simplification permet de traiter un flux comme une seule entité, comme un ensemble, et non plus comme un ensemble de particules indépendantes les unes des autres. Le flux peut alors être considéré comme un flot, continu et homogène, composé de particules immatérielles. Ainsi, ce flot est décrit par trois variables : le débit, la concentration et la vitesse. Néanmoins, le modèle macroscopique intègre la dimension dynamique, ce que le modèle présenté ici ne proposera pas.

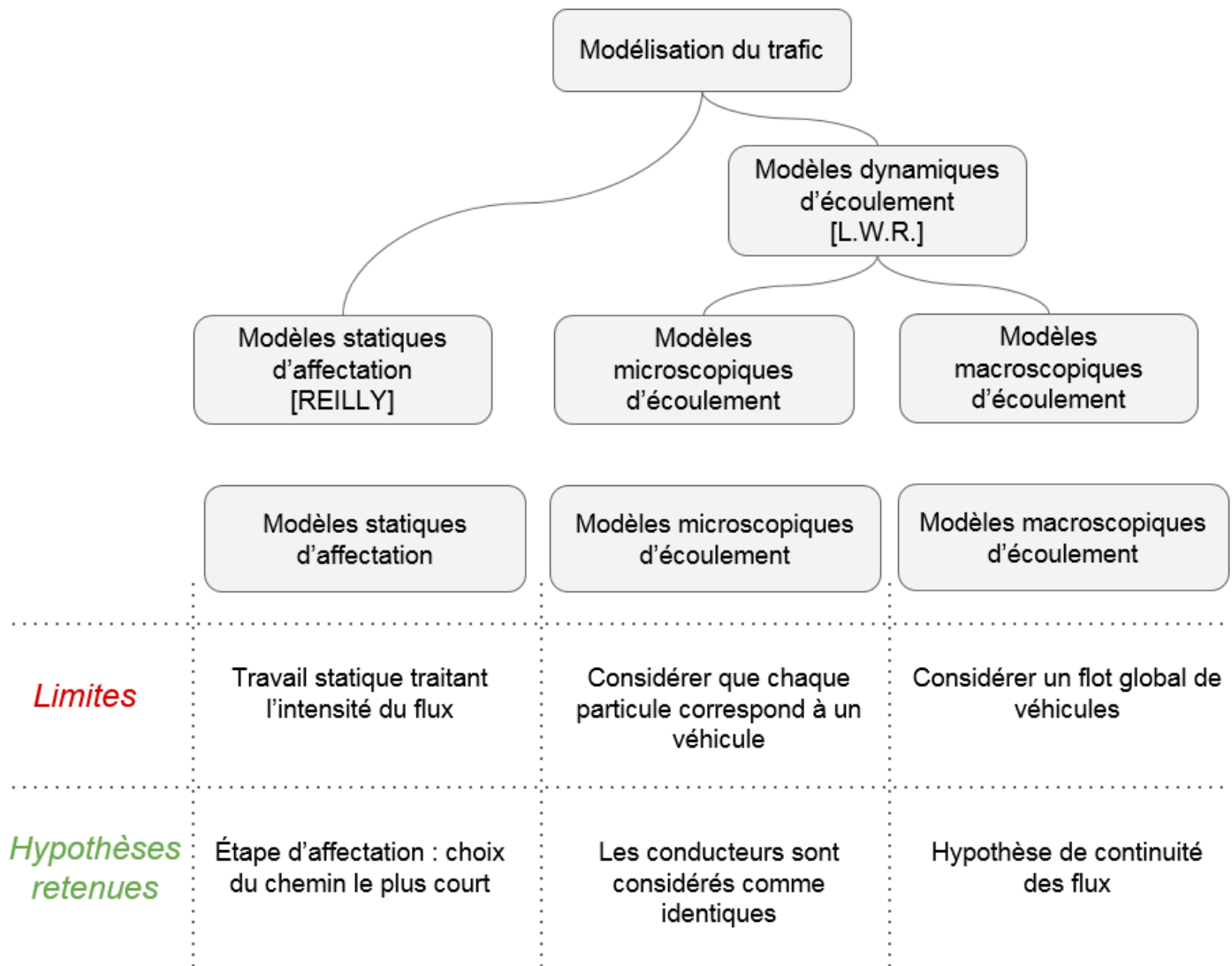


Figure 3: Les différentes théories de la modélisation du trafic et les hypothèses retenues permettant de poser les bases du modèle hydrostatique d'écoulement du trafic. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Comme évoqué précédemment, le modèle hydrostatique considère le trafic comme un fluide. Après avoir vu de quels modèles, et de quelles caractéristiques le modèle hydrostatique a hérité, la partie suivante va décrire comment a été réalisée l'analogie avec l'hydrodynamique et comment elle a été mise en œuvre.

Mais avant de mener une réflexion sur un réseau routier, le premier pas a été de travailler sur un modèle d'écoulement hydrodynamique. Le réseau devient alors une conduite, d'un certain diamètre, et l'objet étudié est un fluide en déplacement. L'objectif est alors d'obtenir la vitesse en tout point de la conduite.

Il s'agit ici de travailler sur l'écoulement d'un fluide visqueux dans une conduite cylindrique horizontale, de longueur L et de rayon R .

Avant de commencer des recherches concernant la vitesse, il est nécessaire d'étudier le régime d'écoulement du fluide en question. Il en existe deux : le régime laminaire (a) et le régime turbulent (b). Le premier régime exprime le déplacement du fluide parallèlement à la conduite, c'est à dire que deux particules de fluide voisines à un instant initial seront toujours voisines à l'instant suivant. Dans un écoulement turbulent, les particules de fluide ne sont plus du tout organisées.

Afin de faire l'analogie avec un trafic routier, il est nécessaire que l'écoulement du fluide soit en régime laminaire. En effet, les déplacements des particules de fluide parallèles à la conduite peuvent assez facilement faire référence à un tronçon routier constitué de plusieurs voies, où les véhicules se déplacent sur chacune des voies de circulation.

Cette partie va décrire l'écoulement théorique d'un fluide visqueux dans une conduite cylindrique.

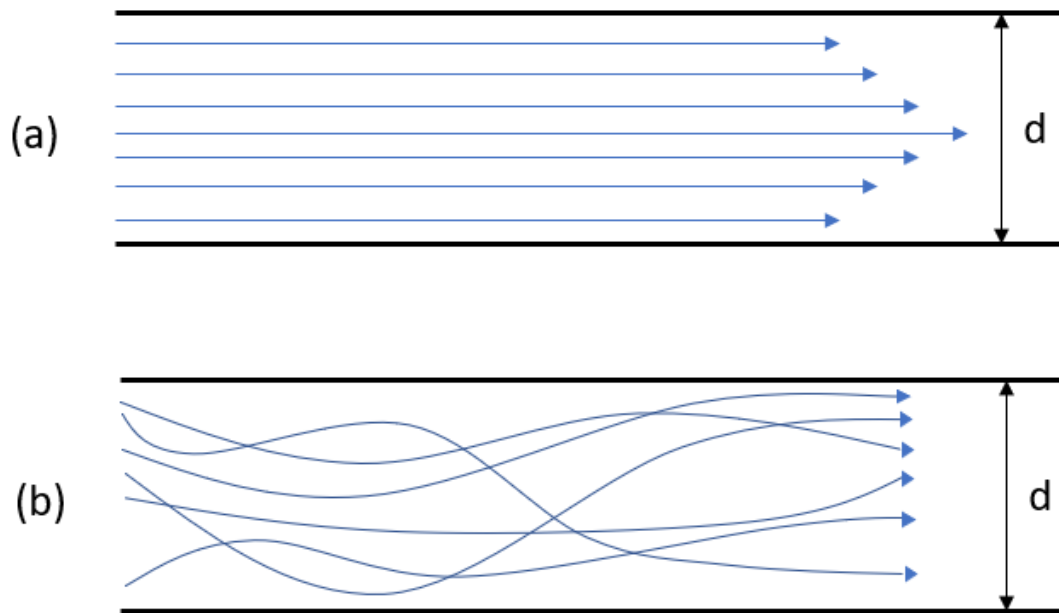


Figure 4: Représentation des régimes laminaire et turbulent. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Considérons la portion de conduite, de rayon R et de longueur L , dans laquelle circule un fluide. On considère P_e et P_s , les pressions en entrée et en sortie de la conduite.

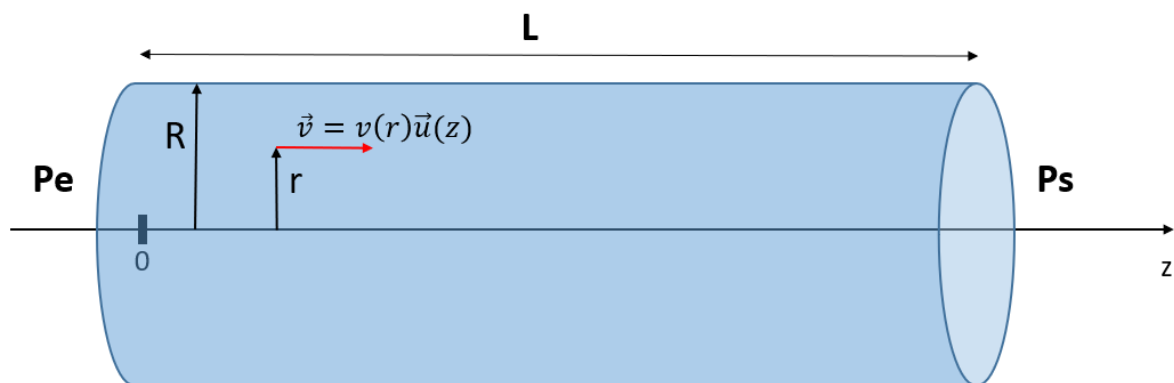


Figure 5: Schéma représentant la conduite étudiée, de rayon R et de longueur L . Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

En régime stationnaire, la variation de quantité de mouvement est nulle, la somme des forces qui s'exercent alors sur ce système l'est également, en découle alors :

$$F = 0$$

La force de pression s'exprime ainsi : $\pi.r^2.P$

Le travail sur la conduite consiste alors à soustraire la force de pression en aval, $\pi.r^2.P_s$, à la force de pression en amont, $\pi.r^2.P_e$, auxquelles s'ajoute la force de frottement visqueux F , s'exerçant sur la surface latérale du cylindre.

En résulte l'équation suivante : $\pi.r^2.P_e - \pi.r^2.P_s + F = 0$

Pour un fluide visqueux newtonien, la force de viscosité F vaut : $F = \eta . d_v(r) d_r . 2\pi r . L$

D'où : $\pi . r^2 . P_e - \pi . r^2 . P_s + \eta . d_v(r) d_r . 2\pi r . L = 0$

Isoler la dérivée permet d'obtenir : $d_v(r)d_r = -Pe - Ps. 2. \eta. L. r$

Enfin, par intégration, le champ des vitesses est donné par :

$$V(r) = \frac{Pe - Ps}{4\eta L} \cdot (R^2 - r^2)$$

Le résultat présenté est l'équation de Poiseuille, permettant d'obtenir le champ des vitesses d'écoulement d'un fluide visqueux dans une canalisation. L'étape suivante est alors de passer de l'écoulement d'un fluide à un flot de véhicules en déplacement.

Mais avant de faire l'analogie à un flot de véhicule, il convient tout d'abord de modifier le support de l'écoulement. L'étude ne portera plus sur un cylindre, correspondant à une conduite, mais sur un axe, représentant un tronçon du réseau routier.

Une hypothèse est ici posée : le trafic est un ensemble composé de véhicules de taille négligeable comparée à celle du réseau routier. C'est cette hypothèse, appelée hypothèse de continuité des flux, qui permet l'analogie avec la mécanique des fluides.

Il s'agit alors d'appliquer une équation de mécanique des fluides à un axe. En découle alors quelques modifications sur le calcul de la vitesse.

La somme de forces extérieures est toujours égale à zéro, considérant que le travail s'effectue toujours en régime laminaire.

$$F = 0$$

Travaillant cette fois sur un axe, l'équation des forces se présente de cette façon : $Pe - Ps + F = 0$

La force de viscosité vient elle aussi à être modifiée. Projetée initialement sur un cylindre, son équation projetée sur un axe devient : $F = \eta. d_v(r)d_r. L$

Les pressions en entrée et en sortie sont dorénavant appelées concentration en entrée (C_e) et concentration en sortie (C_s), faisant référence à la concentration de trafic sur une portion de route.

Ces modifications, dues au passage d'un cylindre à un axe, permettent ainsi d'obtenir une nouvelle formule, calculant la vitesse sur un axe :

$$v(r) = \frac{C_e - C_s}{\eta. L}$$

Cette étude permet d'exprimer la vitesse d'un objet en déplacement sur un axe. Néanmoins, afin de conforter l'analogie avec un système d'écoulement de fluide, il est nécessaire d'y intégrer la notion de pente. Jusqu'à maintenant, le système était considéré comme horizontal, ce sont les forces de pression qui permettaient un déplacement.

De plus, ce travail de recherche sera utilisé dans le but d'une modélisation 3D des flux domicile-travail, avec, pour axe Z, le poids des indicateurs attirant ou générant des déplacements. Deux villes qui n'ont pas le même poids en termes d'indicateurs ne se trouveront donc pas à la même altitude. C'est donc pour cela qu'une pente est introduite dans notre modèle de calcul.

Enfin, dans le cadre d'un écoulement de fluide, la pente devra être négative (c'est-à-dire, dans un repère orthonormé, le coefficient directeur de la droite est négatif), sans ça, cette dernière s'opposerait au déplacement. Intégrer une pente va avoir un impact sur la vitesse calculée.

S'appuyant sur le principe de la gravité, le flot en déplacement sera impacté de cette façon :

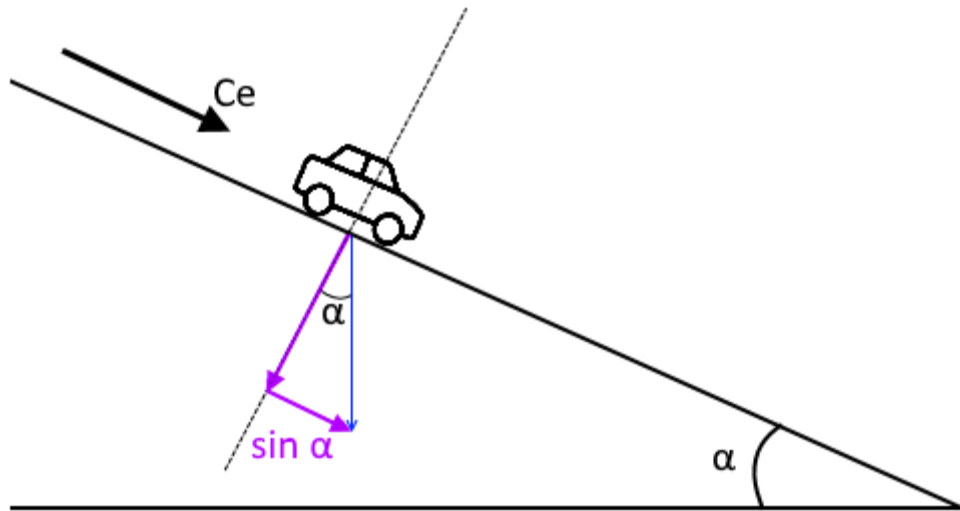


Figure 6: Mise en évidence du rôle de la pente. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

C'est donc le sinus de l'angle de la pente qui sera introduit dans le calcul de vitesse. C'est cet angle qui va accompagner le déplacement du flot, et qui va impacter la vitesse.

Donc, la formule finale obtenue après analogie avec la mécanique des fluides est la suivante :

$$v(r) = \frac{Ce - Cs}{\eta \cdot L} \cdot \sin \alpha$$

La formule permettant le calcul de vitesse étant obtenue, il convient maintenant de l'appliquer, dans un premier temps, à un réseau théorique, afin de la valider.

RESULTATS DE RECHERCHE

Après avoir réalisé l'analogie avec la mécanique des fluides, il convient de confronter la formule obtenue à un réseau simplifié [voir figure n°6].

Les données d'entrée sont les suivantes : une matrice d'adjacence [Annexe n°1], qui permet de définir le réseau, une matrice de flux [Annexe n°2], qui détermine la charge du trafic sur chaque tronçon du réseau d'un nœud à un autre, un angle, ainsi que les coordonnées de chaque nœud du réseau.

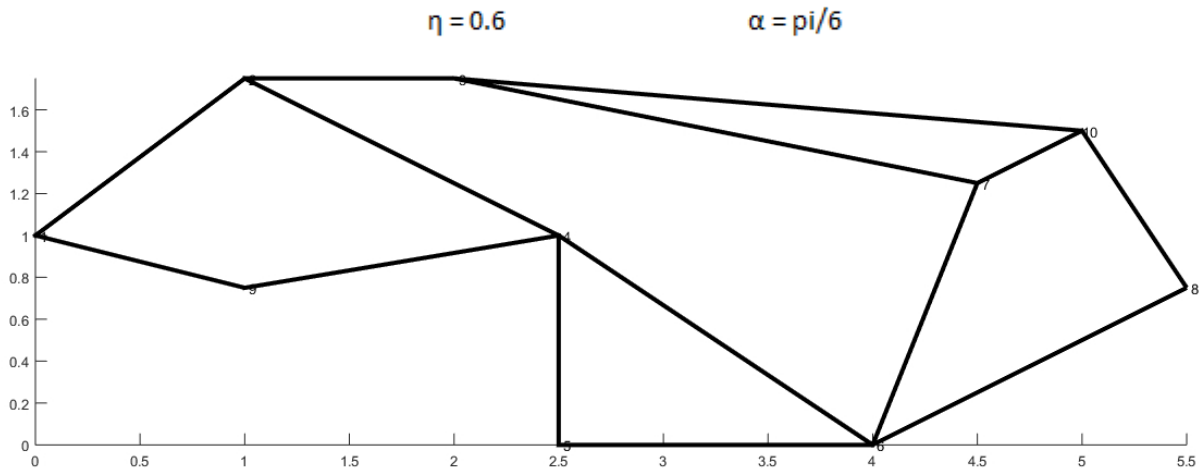


Figure 7: Réseau théorique. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Il convient de rappeler que l'hypothèse suivante est posée : un individu choisit son itinéraire en fonction du plus court chemin à parcourir. Le but est alors d'obtenir une vitesse attribuée à chaque nœud du réseau.

La première étape est de générer une matrice des flux cumulés, permettant d'obtenir les flux cumulés sur chaque arc, selon le chemin le plus court à parcourir - grâce à l'algorithme Dijkstra - [Annexe n°3], appliqué à la matrice des distances. Cette matrice des flux cumulés est présentée en annexe [Annexe n°4].

Dans la partie suivante, le but est d'obtenir, à partir de cette matrice des flux cumulés, les vitesses à chaque nœud du réseau, grâce à l'application de la formule obtenue précédemment : $v(r) = \frac{C_e - C_s}{\eta \cdot L} \cdot \sin \alpha$

Avec C_e , la concentration cumulée en entrée du nœud et C_s , la concentration cumulée en sortie du nœud.

Le résultat de l'application de cette formule est présenté en annexe [Annexe n°5].

Les vitesses observées sont en réalité affectées aux arcs du réseau, entre deux nœuds. Or, l'objectif est d'obtenir une vitesse à chaque nœud du réseau. C'est donc la suite du travail, affecter la vitesse des arcs sur chaque nœuds en aval. Cependant, dans le cas où plusieurs arcs sont issus du même nœud, la matrice de vitesse indique deux vitesses différentes. Cela s'explique par le fait que la vitesse est calculée grâce à une distance qui sépare deux points, or cette distance n'est pas la même entre tous les points du réseau. Il faut pourtant attribuer une seule vitesse à chaque nœud.

Dans le cas où il n'y a qu'une seule valeur de vitesse pour un nœud, alors elle sera attribuée au nœud en aval. Dans le cas où plusieurs valeurs de vitesses sont présentes pour un seul et même nœud, ne sera alors retenue que la valeur maximale de la vitesse.

En effet, le choix de garder la valeur maximale peut se justifier par la réalité du terrain. En général, le flot de véhicules de plus faible valeur s'adapte à la vitesse du flot de véhicules le plus important. L'exemple type étant la bretelle d'autoroute : le flot moins important s'adaptant à la vitesse du flot plus important circulant sur

l'autoroute. Toutefois, prendre la valeur minimale aurait également eu du sens, tout dépend du réseau topologique.

Le tableau des vitesses en chaque nœud est alors obtenu :

	1
1	68,16
2	102,30
3	26,11
4	90,90
5	8,00
6	73,09
7	183,00
8	0,00
9	96,86
10	88,20

Figure 8: Table des vitesses obtenues. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Chaque nœud est désormais décrit par une vitesse. Une représentation visuelle des vitesses est réalisée sur le graphe présenté ci-dessous. Utiliser un dégradé de couleurs permet de visualiser la différence de vitesse entre les nœuds du réseau. Le bleu foncé correspond à des vitesses de déplacements très faibles tandis que les couleurs plus chaudes (jaune orangé) correspondent à des vitesses de déplacements plus élevées.

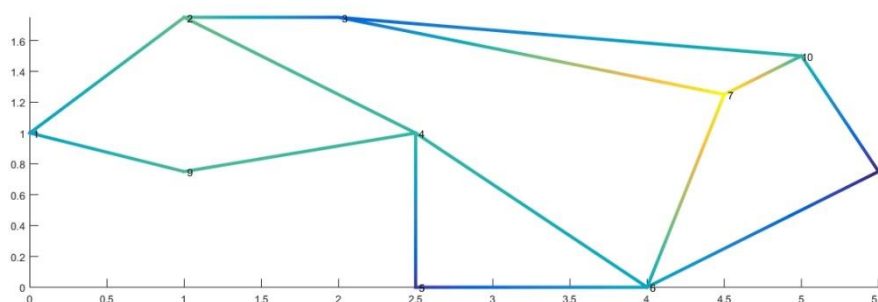


Figure 9 : Vitesses projetées sur un réseau simplifié. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Le code développé permet donc d'obtenir les vitesses des véhicules aux nœuds d'un réseau fictif. Réseau dont les caractéristiques, via la matrice d'adjacence, la matrice des flux et les coordonnées des nœuds, sont données en entrée du code. Toutefois, la fonction `polyadjacence` [Annexe n°7], développée par M. MAIZIA, permet d'extraire, d'un SIG au format shapefile, tous les nœuds du réseau dans leurs coordonnées de projection, et permet de créer automatiquement la matrice d'adjacence du réseau. De même, cette fonction effectue un travail sur les distances séparant chaque point, en calculant les distances deux à deux. Les résultats obtenus sont alors une matrice d'adjacence du réseau, ainsi qu'une matrice de distance, entre tous les points reliés du réseau. Ainsi, il suffit de récupérer ces matrices et de les intégrer au programme développé ci-dessus afin de calculer les vitesses de déplacement sur chaque nœud d'un réseau réel.

La même méthode a été appliquée sur le réseau routier réel suivant, les graphes ci-dessous représentent respectivement le réseau topologique et le réseau topologique auquel a été affecté les vitesses de déplacement des véhicules.

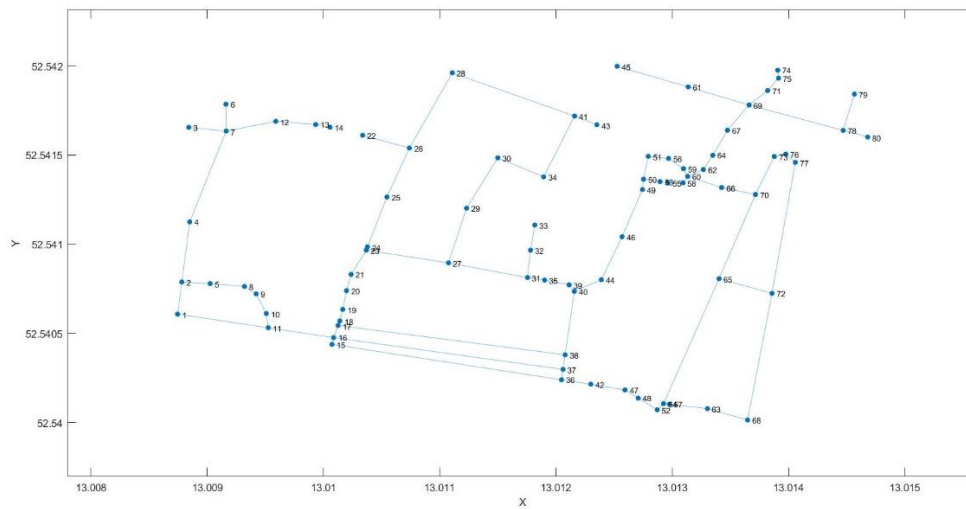


Figure 10 : Réseau routier topologique réel. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

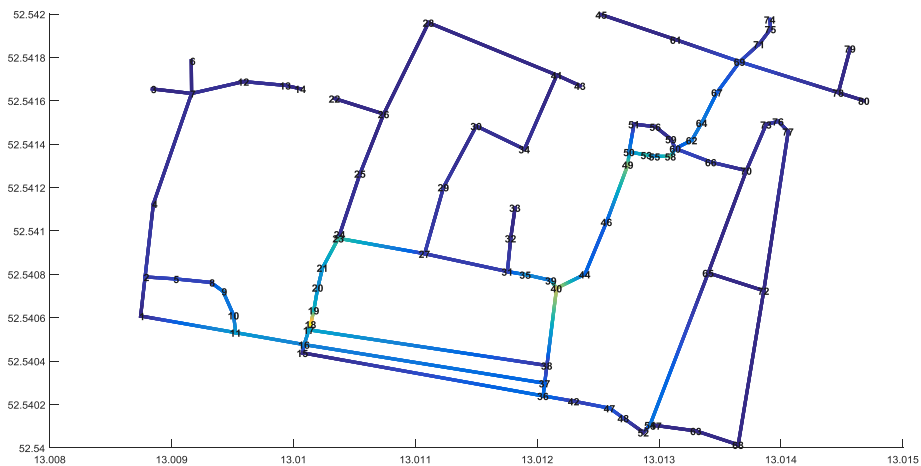


Figure 11 : Réseau topologique réel auquel a été affectée la vitesse des déplacements des véhicules. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Pour conclure, à partir d'un réseau et d'une matrice des flux donnée entre chaque points, le code présenté permet d'obtenir les vitesses d'écoulement d'un flot de véhicules en chaque nœud du réseau.

Finalement, les différentes étapes permettant la mise en place du modèle hydrostatique peuvent être représentées en un schéma :

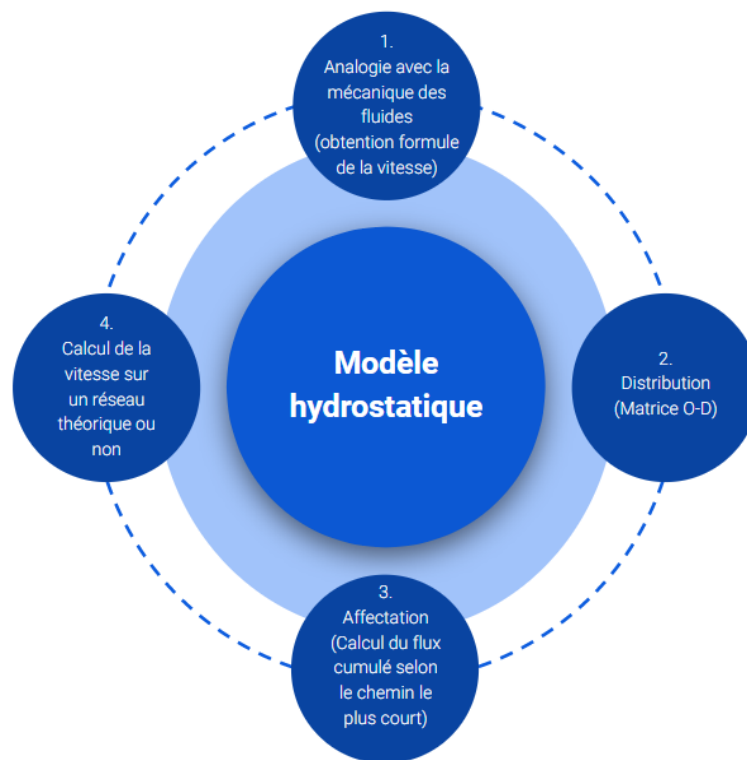


Figure 12 : Différentes étapes du modèle hydrostatique. Réalisation : LEBRETON et NOUAILHAT

Les résultats obtenus et présentés dans cette partie sont intéressants. Toutefois, il convient de préciser que ce modèle est limité. La fin de ce travail de recherche va s'attacher, d'une part, à décrire les principales limites du modèle mis en place et, d'autre part, à rappeler dans quel cadre ce projet s'inscrit.

CONCLUSION

Tout d'abord, il convient de rappeler l'objectif énoncé en introduction de ce projet de recherche. L'objectif était de proposer un nouveau modèle d'écoulement du trafic permettant de dépasser les modélisations traditionnelles du trafic. Ce modèle devait ainsi permettre d'obtenir les vitesses de déplacement des véhicules en chacun des nœuds d'un réseau routier. L'étude des limites du modèle devait également être présentée dans une perspective d'amélioration critique du modèle. Au terme de ce travail, il convient de préciser que cet objectif a été atteint.

Ce modèle présente des avantages, résidant notamment dans sa simplicité de formulation et d'utilisation. Toutefois, ce modèle possède évidemment des limites qui vont être recensées ici.

Tout d'abord, le modèle met en évidence le fait que la vitesse de déplacement sur un tronçon est fonction de la concentration de véhicule en entrée de chaque nœud, et de la distance à parcourir. Or, il est évident que la durée de déplacement d'un véhicule dépend d'un nombre très important d'autres variables : nombre de poids lourds sur la voie, véhicules anormalement lents, accidents, congestion, conducteurs particulièrement "agressifs" ou "prudents" ... Le modèle ne prend pas en compte le fait que chaque couple véhicule-conducteur est unique. Evidemment, dans la réalité, chaque voiture possède des propriétés et caractéristiques bien distinctes, ce qui entraîne des vitesses de circulation tout à fait disparates. De même, le modèle hydrostatique d'écoulement du trafic ne prend pas en compte la largeur ou le rétrécissement des voies. En effet, un conducteur a tendance à accélérer sur les voies plus larges, lié à un sentiment de sécurité accru. A contrario, une voie qui se rétrécit entraîne inévitablement un ralentissement des vitesses sur le tronçon concerné. Ce phénomène est lié à la conscience que chaque conducteur a de son entourage.

Une limite observable du modèle hydrodynamique réside dans l'expression de sa vitesse. En étudiant cette expression, on observe que, plus la concentration de véhicules en entrée est élevée, plus la vitesse au nœud augmente, et cela, de manière infinie. Il conviendrait de poser un "garde-fou" - ou "facteur limitant" - entraînant, si la concentration de véhicules par kilomètre est trop élevée, la stagnation voir même la diminution de la vitesse des véhicules au nœud. La prise en compte de ce facteur permettrait une modélisation plus proche de la réalité. Ce cas correspondrait alors à une congestion partielle ou totale du trafic.

De plus, la limite majeure à laquelle fait face le modèle hydrostatique réside dans ses hypothèses de départ. D'une part, le flux de véhicules a été considéré comme étant continu. Or, en réalité, les distances de sécurité représentant une distance non-négligeable par rapport au réseau, le flux ne peut ainsi pas être considéré comme continu. D'autre part, la taille des voitures n'étant pas négligeable par rapport à la taille d'un réseau routier, une voiture ne peut pas, raisonnablement, être assimilée à particule de taille négligeable. Ainsi donc, l'hypothèse de continuité du flux, sur laquelle repose l'analogie avec la mécanique des fluides, simplifie peut-être de manière exagérée, la réalité.

Par ailleurs, il convient de préciser que ce travail s'inscrit dans un cadre plus large. En effet, ce projet représente le point de départ d'une thèse, que va réaliser M. Valentin LAMIRAULT, au sein du Département Aménagement et Environnement de l'école Polytechnique de l'Université de Tours. Dans son travail, il va s'intéresser au développement d'un modèle multiéchelle et multimodal de déplacements sur la région Centre-Val de Loire.

Par la mise en place d'une analogie entre les équations régissant la mécanique des fluides et l'écoulement du trafic, ce projet de fin d'études est une première approche, une "base de matières" pour la thèse de M. LAMIRAULT. D'autre part, ce projet soulève ses propres critiques, que M. LAMIRAULT devra considérer pour améliorer et dépasser ce modèle. De plus, le présent travail est à mettre en relation avec le Projet de Fin d'Etudes de M. Pacôme SERRA et de Mme. Léa AUDURIER, tous deux étudiants au Département Aménagement et Environnement de l'école Polytechnique de l'Université de Tours. En effet, ces derniers travaillent sur la création d'un réseau en relief permettant l'écoulement du trafic comme un fluide. Finalement, le travail de M. LAMIRAULT sera également de mettre en commun, dans sa thèse, ces deux projets de fin d'études.

Enfin, il convient de mentionner que dans le domaine du trafic, il n'existe pas véritablement de modèle "universel", capable de décrire de manière parfaite les déplacements des usagers. Chaque modèle étant le reflet d'une certaine vision du trafic et surtout, chaque modèle étant fondé sur des hypothèses simplifiant le comportement des flux de voyageurs. Ainsi, le modèle hydrostatique n'échappe pas à la règle en proposant une nouvelle approche du problème des transports, issu d'une certaine vision du trafic.

BIBLIOGRAPHIE

BONNEL, Patrick, Prévision de la demande de transport, Economie et finances, Université Lumière – Lyon II, 2002

BOURREL, Emmanuel, Modélisation dynamique de l'écoulement du trafic routier, du macroscopique au microscopique, INSA Lyon, 2003

COSTESEQUE, Guillaume, Modélisation du trafic routier : passage du microscopique au macroscopique, Chaire Abertis, 2012

COSTESEQUE, Guillaume, Modélisation et simulation dans le contexte du trafic routier, Epistémologies et pratiques de la modélisation et de la simulation, Tome 1, 2013 (Source: <http://www-sop.inria.fr/members/Guillaume.Costeseque/chap30-costeseque.pdf>)

CHANUT, Stéphane, Modélisation dynamique macroscopique de l'écoulement d'un trafic routier hétérogène poids lourds et véhicules légers, INSA Lyon, 2005

DEBIZET, Gilles, L'évolution de la modélisation des déplacements urbains en France 1960-2005, Le poids de l'organisation institutionnelle des transports, Flux, 2011

DERBEL, Oussama, Modélisation microscopique et macroscopique du trafic : Impact des véhicules automatisés sur la sécurité du conducteur, Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2014

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

D'AUBIGNY G. et al., 2000, « Approche poissonnienne des modèles d'interaction spatiale », Cybergeog : European Journal of Geography, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, article 126, mis en ligne le 09 mars 2000, modifié le 07 juin 2007

ENAULT, Cyril, Simulation de l'étalement urbain de Dijon en 2030 : approche systémique de la dynamique gravitaire ville-transport, Cybergeog, 2012

LEBACQUE Jean-Patrick, ARON Maurice, AGUILERA Vincent, Modélisation du trafic, Les Collections de l'inrets, 2006

LEBACQUE, Jean-Patrick, Les modèles du trafic routier : de la théorie à la gestion des infrastructures, 2010

MOINDROT, Claude. La délimitation des aires d'influence métropolitaine par un modèle de gravité. Le Centre-Ouest de la France. In: *Espace géographique*, tome 4, n°3, 1975. pp. 197-207. (Source : https://www.persee.fr/doc/spgeo_0046-2497_1975_num_4_3_1558)

STRAGIOTTI Pierre, FABRIES-VERFAILLIE Maryse, La France des villes : le temps des métropoles ?, Bréal, 2000

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Schéma des quatre étapes	9
Figure 2 : Diagramme de Greenshields	12
Figure 3: Les différentes théories de la modélisation du trafic et les hypothèses retenues permettant de poser les bases du modèle hydrostatique d'écoulement du trafic	15
Figure 4: Représentation des régimes laminaire et turbulent	16
Figure 5: Schéma représentant la conduite étudiée	16
Figure 6: Mise en évidence du rôle de la pente	18
Figure 7: Réseau théorique.....	19
Figure 8: Table des vitesses obtenues	20
Figure 9 : Vitesses projetées sur un réseau simplifié	20
Figure 10 : Réseau routier topologique réel	21
Figure 11 : Réseau topologique réel auquel a été affectée la vitesse des déplacements des véhicules	21
Figure 12 : Différentes étapes du modèle hydrostatique.....	22

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1: Matrice d'adjacence.....	28
Annexe 2: Matrice des flux.....	28
Annexe 3: Matrice des distances.....	28
Annexe 4: Matrice des flux cumulés.....	28
Annexe 5: Matrice des vitesses.....	29
Annexe 6: Code 'vitesse modèle hydrostatique'.....	30
Annexe 7: Code 'polyadjacence'.....	31

ANNEXES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0
2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0

Annexe 1: Matrice d'adjacence

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	89	33	22	99	35	91	0	10	71
2	90	0	75	10	74	0	21	50	19	0
3	0	35	0	62	32	7	39	45	95	96
4	8	0	29	0	61	42	67	49	0	0
5	13	0	34	0	0	24	0	0	39	16
6	0	85	91	91	12	0	18	37	29	56
7	10	80	4	32	58	81	0	89	8	80
8	69	0	70	0	88	38	100	0	20	0
9	93	79	21	1	69	52	71	42	0	100
10	15	84	83	50	25	0	0	81	30	0

Annexe 2: Matrice des flux

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	1,25	0	0	0	0	0	0	1,03	0
2	0	0	1	1,68	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	2,55	0	0	3,01
4	0	0	0	0	1	1,80	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	1,5	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	1,35	1,68	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,56
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	1,52	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0,90	0	0

Annexe 3: Matrice des distances

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	284	0	0	0	0	0	0	166	0
2	0	0	341	84	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	151	0	0	262
4	0	0	0	0	303	458	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	40	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	328	128	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	341
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	491	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	265	0	0

Annexe 4: Matrice des flux cumulés

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	68,16	0	0	0	0	0	0	48,31	0
2	0	0	102,30	15,03	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	17,77	0	0	26,11
4	0	0	0	0	90,90	76,22	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	73,09	22,90	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	183,00
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	96,86	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	88,20	0	0

Annexe 5: Matrice des vitesses

```

% Calcul des distances entre chaque noeuds reliés par un arc
for i=1:size(xL)
    for j=1:size(yL)
        if L(i,j)~=1
            dist(i,j) = (( xy(i,1) - xy(j,1) ).^2 + ( xy(i,2) - xy(j,2) ).^2).^0.5;
        end
    end
end

% Génération d'une matrice de flux cumulés par le chemin emprunté le plus court
flxcum=zeros(length(flx));
for s= 1:length(L)
    for d=1:length(L)
        if flx(s,d)~=0
            [C,rute]=dijkstra(L,xy,s,d); % Chemin le plus court
            for k=1:length(rute)-1
                flxcum(rute(k),rute(k+1)) = flxcum(rute(k),rute(k+1))+flx(rute(1),rute(length(rute)));
            end
        end
    end
end

v=[];
% Calcul de la vitesse
for i=1:length(flx)
    for j=1:length(flx)
        if L(i,j)~=0
            % Application de la formule développée dans le travail de recherche
            v(i,j)= (flxcum(i,j))/((n)*dist(i,j))*sin(alpha);
        else
            v(i,j)=0;
        end
    end
end

V=[];
% Génération de la matrice des vitesses affectée à chaque nœud
for a=1:length(v)
    for b=1:length(v)
        if v(a,b)~=0
            V = max(v,[],2); % Seule la vitesse maximale au nœud est conservée
        end
    end
end

% Représentation des vitesses affectées au graphe via un dégradé de couleurs
[I,J]=find(L>0);
patch('vertices',[x(:) y(:)],'faces',[I J],'EdgeColor','interp','FaceVertexCdata',V,...
    'LineWidth',3)
text(x,y,num2str([1:numel(x)]))

axis image

```

Annexe 6: Code 'vitesse modèle hydrostatique', développé sous MATLAB par LEBRETON et NOUAILHAT

```

function [vertices,faces,adjacence,idfaces,idnodes]=polyadjacence(XY)
% Produit la matrices d'adjacence d'un réseau et convertit les polygones en
face
% Exemple :

% Importation d'un fichier réseau au format ARCGIS
pthnm='\Mes documents toaster\Mes Données\1D et 2D ArcGis\';
flnm='zone_etude';
import=shaperead([pthnm flnm]);
XY=import.ncst;

% Extraction de l'adjacence du réseau
[xy,arc,adjacence,idfaces,idnodes]=polyadjacence(XY);

% Calcul de la distance 2 a 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);

% Représentation matricielle de la distance
n = size(xy,1); % Nombre de sommets du réseau
Dij=[arc dij];
Dij(end+1,:)=[n n 0]; % Représentation verticale
Dijc=spconvert(Dij); % Représentation matricielle (économe en mémoire, sans
les zeros)
Dijf=full(Dijc); % Représentation matricielle standard (avec les zeros)
% Attention la matrice n'est pas symétrique!

%Définition l'ensemble des origines et des destinations
I=find(ismember(xy,xyI,'rows'));
J=find(ismember(xy,xyJ,'rows'));

```

Annexe 7: Code 'polyadjacence', développé sous MATLAB par M. MAÏZIA

Directeurs de recherche :

Mindjid MAIZIA
Kamal SERRHINI

Paul LEBRETON
Vincent NOUAILHAT
PFE/DAE5
RESEAU
2018-2019

Directeurs de recherche :

Mindjid MAIZIA
Kamal SERRHINI

Paul LEBRETON
Vincent NOUAILHAT
PFE/DAE5
RESEAU
2018-2019

**Titre : Vers
un modèle**

hydrostatique d'écoulement du trafic routier

Résumé :

La modélisation du trafic est devenue, depuis une soixantaine d'années, un enjeu majeur pour la compréhension et la gestion du trafic, notamment en milieu urbain parfois fortement congestionné. De nombreux modèles ont été mis au point ces dernières années, dans le but de mieux comprendre et reproduire ce phénomène réel complexe.

Actuellement, les modèles les plus connus sont les modèles statiques à quatre étapes, et les modèles d'écoulement dynamique microscopique et macroscopique. Ces différents modèles, bien que très utilisés actuellement, possèdent quelques limites.

L'objectif de ce Projet de Fin d'Études est donc de proposer un nouveau modèle d'écoulement du trafic, appelé modèle hydrostatique, permettant de dépasser les modélisations traditionnelles du trafic, tout en gardant leurs principales qualités.

Ce modèle est fondé sur une analogie avec la mécanique des fluides. Ainsi, le flux de véhicules est vu comme un flot de particules de taille négligeable, s'écoulant sur le réseau routier. Finalement, ce modèle permet d'obtenir la vitesse d'écoulement d'un flot de véhicules en tout nœud du réseau.

Ce travail s'attachera également à appliquer ce modèle théorique à des réseaux routiers, théorique puis réel. Enfin, l'étude des limites du modèle hydrostatique sera effectuée dans une perspective d'amélioration critique du modèle.

Mots Clés : flux, flot, modélisation, trafic, écoulement, statique, modèle gravitaire, modèle microscopique, modèle macroscopique