



HAL
open science

Régulation, fiabilité et qualité de service des réseaux de transports multimodaux

Neila Bhourri

► **To cite this version:**

Neila Bhourri. Régulation, fiabilité et qualité de service des réseaux de transports multimodaux. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Paris-Est, 2018. tel-03566150

HAL Id: tel-03566150

<https://hal.science/tel-03566150>

Submitted on 11 Feb 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Université Paris-Est
Habilitation à Diriger des Recherches

Régulation, fiabilité et qualité de service des réseaux de transports multimodaux

Spécialité : Sciences et Technologie de l'Information et de la Communication

Neïla BHOURI

IFSTTAR/COSYS/GRETTIA

Soutenance le 14 septembre 2018

Rapporteurs :

Hassane ABOUAÏSSA, Maître de conférences -HDR à l'Université d'Artois, France

Hani MAHMASSANI, Directeur du Northwestern University Transportation Center, États-Unis

Feng PENG - CHU, Professeur, Université d'Evry Val d'Essonne, France

Examineurs et Invités

Nour-Eddin EL FAOUZI, Directeur de recherche, IFSTTAR, France

Habib HAJ-SALEM, Directeur de recherche, IFSTTAR, France

Jean-Patrick LEBACQUE, Ingénieur général des Ponts, des Eaux et des Forêts, France

Saïd MAMMAR, Professeur, Université d'Evry Val d'Essonne, France

Markos PAPAGEORGIOU, Professeur, Technical University of Crete, Grèce

Gérard SCÉMAMA, Directeur de recherche émérite, France

Todor STOÏLOV, Professeur, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgarie

Table des matières

PRESENTATION DU DOCUMENT	9
INTRODUCTION GENERALE.....	11
SIGLES.....	13
BILAN DES ACTIVITES	15
1. PRODUCTION SCIENTIFIQUE	17
2. PRODUCTION DE LA RECHERCHE	18
3. EXPERIENCE EN ENSEIGNEMENT.....	18
4. CINQ ARTICLES REPRESENTATIFS DE MES RECHERCHES	19
5. CURRICULUM VITAE.....	21
5.1 <i>Information administrative :</i>	21
5.2 <i>Diplômes</i>	21
5.3 <i>Activités professionnelles</i>	22
5.4 <i>Vacations (enseignement)</i>	22
6. FORMATIONS SUIVIES	23
7. ENCADREMENTS	23
7.1 <i>Thèses</i>	23
7.2 <i>Stages</i>	24
8. RAYONNEMENT ET DIFFUSION DE LA CULTURE SCIENTIFIQUE.....	25
8.1 <i>Collaborations nationales et internationales</i>	25
8.2 <i>Expertise</i>	28
8.3 <i>Organisation d'évènements scientifiques</i>	29
8.4 <i>Participation à des jurys</i>	29
8.5 <i>Expertises pour revues et conférences</i>	30
8.6 <i>Participation aux instances</i>	31
8.7 <i>Prix</i>	31
9. DETAILS DES PROJETS	32
10. LISTE DE PUBLICATIONS	36
SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE.....	47
CHAPITRE A : ESTIMATION ET CALIBRAGE DES VARIABLES DU TRAFIC.....	49
1. PRELIMINAIRES	50
2. PROBLEMATIQUES DE MES RECHERCHES.....	50
3. ESTIMATION DE L'ETAT DU TRAFIC A PARTIR DE CAPTEURS DE TYPE BOUCLE	51
3.1 <i>Filtre de Kalman</i>	51
3.2 <i>Application à l'estimation de la densité du trafic</i>	52
4. UNSCENTED KALMAN FILTER OU FILTRE DE KALMAN CONTRAINT.....	54
4.1 <i>Le modèle de trafic</i>	55
4.2 <i>Le filtre de Kalman étendu (EKF)</i>	56
4.3 <i>Unscented Transformation</i>	57
4.4 <i>Interval Unscented Kalman Filter (IUKF)</i>	58
4.5 <i>Projected Interval Unscented Kalman Filte (PIUKF)</i>	59
4.6 <i>Principaux résultats</i>	60

5.	AJUSTEMENT AUTOMATIQUE ET EN TEMPS REEL DE LA CONSIGNE POUR ALINEA	62
5.1	<i>La stratégie de contrôle d'accès ALINEA</i>	63
5.2	<i>Méthode dérivative</i>	63
5.3	<i>Filtre de Kalman (FK)</i>	64
5.4	<i>Méthode d'optimisation en ligne</i>	64
6.	MES CONTRIBUTIONS A LA RECHERCHE SUR CETTE THEMATIQUE	65
7.	PERSPECTIVES	66
8.	BIBLIOGRAPHIE	66
9.	MES PUBLICATIONS POUR CE CHAPITRE	68
CHAPITRE B : CONTROLE D'ACCES AUTOROUTIER.....		71
1.	PRELIMINAIRES	73
2.	PROBLEMATIQUES DE MES RECHERCHES	73
3.	COMMANDE OPTIMALE	74
4.	COMMANDE HEURISTIQUE	76
4.1	<i>Application Cinq accès de l'autoroute A6</i>	76
4.2	<i>Soixante-quinze accès du réseau d'Île-de-France</i>	79
5.	MES CONTRIBUTIONS A LA RECHERCHE SUR CETTE THEMATIQUE	82
6.	PERSPECTIVES	82
7.	BIBLIOGRAPHIE	82
8.	MES PUBLICATIONS POUR CE CHAPITRE	84
CHAPITRE C : REGULATION DU TRAFIC URBAIN MULTIMODAL.....		86
1.	PRELIMINAIRES	87
2.	PROBLEMATIQUES DE MES RECHERCHES	88
3.	OBJECTIFS ET ENJEUX D'UNE PRIORITE AUX FEUX POUR LES AUTOBUS	89
4.	CLASSIFICATION DES SYSTEMES DE REGULATION EN FONCTION DE LEUR MODE DE PRISE EN COMPTE DES BUS.....	90
5.	COMMANDE LINEAIRE QUADRATIQUE	92
6.	ASSERVISSEMENT AUTOUR D'UNE CONSIGNE.....	98
7.	COMMANDE PREDICTIVE A BASE DE MODELE	100
8.	REGULATION MULTI-OBJECTIFS DU TRAFIC URBAIN BIMODAL	101
9.	SYSTEME MULTI-AGENTS POUR LA REGULATION DU TRAFIC BIMODAL	108
10.	REGULATION DANS UN ENVIRONNEMENT DE SYSTEMES COOPERATIFS.....	115
11.	GUIDAGE ET VEHICULES AUTONOMES	121
12.	MODELISATION MICROSCOPIQUE DU TRAFIC	123
12.1	<i>Modélisation à l'aide du logiciel DYNASIM</i>	123
12.2	<i>Modélisation à l'aide du logiciel SUMO</i>	125
13.	MES CONTRIBUTIONS A LA RECHERCHE SUR CETTE THEMATIQUE.....	126
14.	PERSPECTIVES	127
15.	BIBLIOGRAPHIE	128
16.	MES PUBLICATIONS POUR CE CHAPITRE	130

CHAPITRE D :	FIABILITE ET QUALITE DE SERVICE	133
1.	PRELIMINAIRES	134
2.	PROBLEMATIQUES DE MES RECHERCHES.....	134
3.	DEFINITION ET MESURE DE LA FIABILITE DU TEMPS DE PARCOURS	135
4.	EVALUATIONS DE STRATEGIES DE GESTION DE TRAFIC	137
4.1	<i>Le contrôle d'accès autoroutier.....</i>	137
4.2	<i>La gestion dynamique des voies (GDV)</i>	142
4.3	<i>Conclusion</i>	146
5.	METHODE POUR ISOLER LES FACTEURS EXOGENES	147
5.1	<i>Identification des facteurs exogènes et des effets de la stratégie</i>	148
5.2	<i>Décomposition des indicateurs de fiabilité</i>	150
5.3	<i>Évaluation graphique de la stratégie de GDV sur la fiabilité.</i>	153
5.4	<i>Conclusion</i>	154
6.	MODELISATION DE LA DISTRIBUTION DU TEMPS DE PARCOURS.....	154
6.1	<i>Modélisation de la distribution suivant l'heure de la journée.....</i>	155
6.2	<i>Modélisation par niveau de service.....</i>	159
6.3	<i>Conclusion</i>	163
7.	ÉTUDE DE L'EFFET DE L'AGREGATION SUR LA DISTRIBUTION DU TEMPS DE PARCOURS.....	164
7.1	<i>Construction de la distribution : unité temporelle ou spatiale ?</i>	164
7.2	<i>Étude de l'effet de l'agrégation sur la distribution du temps de parcours</i>	166
7.3	<i>Conclusion</i>	168
8.	MES CONTRIBUTIONS A LA RECHERCHE SUR CETTE THEMATIQUE	169
9.	PERSPECTIVES.....	170
10.	BIBLIOGRAPHIE	171
11.	MES PUBLICATIONS POUR CE CHAPITRE	173
PERSPECTIVES	175	
CONCLUSION	176	

Présentation du document

Ce mémoire est déposé par Neila BHOURI à l'Université Paris-Est (UPE) en vue de l'obtention l'Habilitation à Diriger des Recherches en spécialité « Sciences et Technologie de l'Information et de la Communication ». Il comprend une introduction suivie de deux parties principales :

- Une première partie intitulée « bilan des activités ». Elle comprend :
 1. Une courte synthèse de mes principales contributions à la recherche et le nombre de mes publications et encadrements
 2. La présentation de mes activités d'enseignement
 3. Les titres de cinq articles représentatifs de mes recherches
 4. Mon Curriculum Vitae : il comporte notamment la liste de mes diplômes, la présentation de mon parcours professionnel et de mon activité d'enseignement et d'encadrement et la liste des formations que j'ai suivies.
 5. La mise en évidence de mon rayonnement scientifique. Ceci comprend : l'organisation d'évènements scientifiques, la participation à des jurys, l'expertise pour des revues et des conférences, les collaborations nationales et internationales et la participation aux instances.
 6. Les projets auxquels j'ai participé.
 7. Enfin la liste détaillée de l'ensemble de mes publications.
- Une deuxième partie qui reprend une synthèse de mes travaux de recherche. Elle comporte quatre chapitres, chacun correspondant à l'une des quatre thématiques : (A) Estimation et calibrage des variables de trafic, (B) Contrôle d'accès autoroutier, (C) Régulation du trafic urbain multimodal et enfin (D) Fiabilité et qualité de service.

Ces chapitres sont rédigés suivant un même plan :

1. Préliminaire, situant la recherche dans le contexte.
2. Mes problématiques de recherche pour la thématique.
3. Un nombre variable de paragraphes qui exposent les principaux résultats de recherche sur la thématique.
4. Une synthèse de mes apports à la recherche sur la thématique.
5. Mes perspectives
6. Les principales références bibliographiques de la littérature
7. Mes publications sur cette thématique.

Enfin le mémoire est clos par l'exposé de mes perspectives de recherche et une conclusion générale.

Introduction générale

Ce mémoire résume mes activités de recherche, d'enseignement et d'expertise dans le domaine de la **régulation du trafic** et annonce mes perspectives.

Diplômée de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET de Tunis), j'ai fait le choix de la recherche et de l'enseignement dès le début de mes études supérieures. Depuis, j'ai mené une carrière en trois temps, consacrée à la recherche, à l'enseignement et à l'encadrement d'étudiants. En effet, j'ai interrompu ma carrière de chercheur à l'INRETS (devenu IFSTTAR en 2011) pour intégrer l'université tunisienne. J'ai alors enseigné, encadré des élèves et participé aux tâches pédagogiques et administratives pendant six années scolaires (1993-1999). De retour à l'INRETS, en parallèle à mes activités de recherche, j'ai donné des cours en planification des transports et en régulation du trafic multimodal.

Dans mes travaux de recherche, forte d'une formation en automatique et traitement du signal (DEA à SUPELEC), j'ai utilisé mes compétences pour améliorer les connaissances et les pratiques dans le domaine de la régulation du trafic. Mes actions se situent aux différents niveaux : en partant du premier maillon de la chaîne correspondant au recueil des données ; puis l'estimation des variables ; ensuite le développement de stratégies de régulation pour des réseaux autoroutiers et urbains multimodaux ; enfin l'évaluation de la qualité de service.

Mes apports méthodologiques et pratiques vont jusqu'à l'accompagnement de l'intégration des outils dans les systèmes d'exploitation. Mes contributions à la recherche dans ce domaine se sont construites au fil des années suivant les opportunités des collaborations et des projets ; elles ne suivent donc pas un ordre chronologique.

J'ai commencé ma carrière de chercheuse lors de mon stage de DEA en 1987 à l'INRETS sur l'estimation des variables d'état du trafic. J'ai repris cette thématique du recueil des données et de l'estimation des variables à d'autres occasions, comme lors du projet ANR SITP-VP (2001-2002), du projet européen TRACKSS (2006-2008), et du projet FUI20 LASDIM (2015-2018), des conventions avec la DIRIF (2007-2009) et (2015-2018) ou encore par le développement dernièrement d'un filtre de Kalman contraint, le « Projected Interval Unscented Kalman Filter » en collaboration avec l'université du centre de la province de Buenos Aires, Argentine.

J'ai acquis une solide expertise dans le domaine du contrôle d'accès autoroutier. Mon implication sur ce domaine a commencé avec mes travaux de thèse de doctorat (1987-1991). J'ai repris cette thématique lors des conventions avec la DIRIF (2007-2009) et (2015-2018). J'ai à mon actif une dizaine de publications dans le domaine (dont 3 ACL) mais surtout une expérience opérationnelle dans l'accompagnement de l'implémentation du contrôle d'accès sur le réseau réel en Ile-de-France.

J'ai initié mes recherches sur la régulation du trafic urbain multimodal après mon retour de Tunisie en 1999. J'ai participé en premier au projet SITP-VP (2001-2002) ; j'ai développé par la suite des recherches méthodologiques et des logiciels avec des Post-Doc, doctorants et stagiaires. Ceci était souvent l'occasion de mettre en place des collaborations enrichissantes avec des collègues universitaires. Cela a été le cas notamment avec les universités d'Evry Val d'Essonne, de Paris-Dauphine, de Paris 1, de Paris 6, de Lyon 1, de Newcastle (UK) et de La Valetta (Malte) ou encore avec l'INRIA et l'ENPC. Mes recherches dans ce domaine ont évolué en tenant compte des nouvelles technologies, véhicules connectés (projet SCOOP@f) et gestion des véhicules autonomes. Ceci pourrait aboutir à une convention avec Renault pour l'évaluation des Robotaxis. Je compte une cinquantaine de publications sur le sujet (dont 4 ACL et 3 ACLN).

Je me suis intéressée à la fiabilité des temps de parcours lors de ma participation, en tant qu'experte des réseaux de transport de surface, au groupe de travail de l'OCDE et du Forum International des Transports (FIT) (2006-2009). En plus des apports méthodologiques dans cette thématique (5 ACL, 2 ACLN et 11 ACT), j'ai

monté un projet franco-indien de recherche et de développement industrie-université, INDIRA_B (2015-2019) que je pilote. Le résultat de ce projet est un logiciel, un cockpit pour l'évaluation de la qualité de service des bus.

Sigles

ALINEA	: Asservissement Linéaire (Stratégie de contrôle d'accès autoroutier)
AMOC	: Advanced Motorway Optimal Control
ANR	: Agence Nationale de la Recherche.
ARNAR	: Assistance in Redesigning Navigation Air Routes
ARTS	: Towards Autonomic Road Transport Support Systems (action COST)
ASUR	: Agent based Strategy for URban traffic network (Stratégie de régulation du trafic urbain)
CDVIA	: Conseil en Deplacements sur Voirie Isberie & Associés, France
CENA	: Centre d'Etude de la Navigation Aérienne
Citilog	: Entreprise spécialisée dans le traitement automatique d'images pour des applications de vidéo-surveillance, France.
Claire-Siti	: Plate-forme pour la régulation et la supervision des systèmes multimodaux
CNIT	: National Inter-University Consortium for Telecommunications, Roma, Italy
COP	: Contrat d'Objectif de Performance (entre l'état et l'Ifsttar)
COMET	: COordinated amp metering strategy based on the macroscopic model META
COSOP	: COordinated amp metering Sub-Optimal Strategy
COST	: European Cooperation in Science and et technology
COSYS	: Département Composants et SYStèmes
DART	: Département d'Analyse et Régulation du trafic (Laboratoire de l'INRETS)
DEA	: Diplôme d'Etude Approfondie
DGAC	: Direction générale de l'Aviation civile
DIMTS	: Delhi Integrated Multi-Modal Transit System Ltd. (exploitant des réseaux de bus de New Delhi)
DIRIF	: Direction des Routes Île-de-France
DLR	: Centre de recherche allemand en aérospatial
EIVP	: Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris
ENIT	: Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
ENPC	: Ecole Nationale des Ponts et chaussées
ENSET	: Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique
ETM	: Electronic Ticketing Machine
ETRA	: Centre of Excellence for Smart Cities and innovation in Smart technologies, Espagne
FCD	: Floating car data
FCD	: Fair Collection Data (I mostly use the term ETM)
FIT /ITF	: Forum International des Transports
FUI	: fonds unique interministériel
GOM	: Gestion et Optimisation de la Mobilité
GRETIA	: Génie des Réseaux de Transports et Informatique Avancée (Laboratoire de l'INRETS)
GRETTIA	: Génie des Réseaux de Transports Terrestres et Informatique Avancée (Laboratoire de l'Inrets et puis de l'Ifsttar)
IFSTTAR	: Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (né le 1/01/ 2011 de la fusion de l'INRETS avec le LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées)).
IGN	: Institut national de l'information géographique et forestière
IIT Delhi	: Indian Institute of Technology Delhi
INDIRA_B	: INDicators for Reliability and Variability of Bus Systems
INRETS	: Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité

ISET : L'Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Rades, Tunisie
 KTI : Institute of Transport Sciences, Hongrie
 KU : Kingston University of London, UK
 LASDIM : Large Scale Data Infrastructure for Mobility (projet FUI)
 LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
 LICIT : Laboratoire d'Ingénierie Circulation Transports (Laboratoire de l'INRETS et puis de l'IFSTTAR)
 LVMT : Laboratoire Ville Mobilité Transport (laboratoire mixte ENPC et IFSTTAR)
 MAIA : Mathématiques Appliquées et Intelligence Artificielle (Laboratoire de l'INRETS)
 METANET : Modèle macroscopique de simulation du trafic autoroutier
 Moviquity : Mobile App Development Company in Barcelona, Espagne
 NEARCTIS : A Network of Excellence for Advanced Road cooperative traffic management in the Information Society (Réseau d'excellence)
 NEAVIA : entreprise spécialisée dans la détection de trafic routier, France
 NETPRIOR : Network Transit Priority (stratégie de régulation du trafic urbain multimodal)
 OASIS : Optimal Advanced System for Integrated Strategies
 OCDE : organisation de coopération et de développement économiques
 PCRD : Programmes Cadre de Recherche et Développement
 PDU : Plan de déplacements urbains
 PREDIT : Programme de Recherche et d'Innovation dans les Transports terrestres.
 SAE : Systèmes d'Aide à l'Exploitation
 SCOOP@F : Projet de déploiement pilote de systèmes de transport intelligents coopératifs (FR & UE, 2014-2015)
 SIRI : Systèmes d'Information et Ressources Informatiques (Sous direction de l'Ifsttar)
 SUMO : modèle microscopique de simulation du trafic
 TRACKSS : Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge Sharing Sensors
 TRIPP : Transportation Research and Injury Prevention Programme (Laboratoire de IIT Delhi)
 TRW :
 conekt : branche recherche de TRW automotive, fournisseurs de systèmes pour l'automobile, UK
 TSC : Transport Systems Catapult, UK

Bilan des activités

1. Production scientifique

Mes contributions à la recherche portent sur quatre thématiques : l'estimation de l'état du trafic, la régulation du trafic autoroutier, la régulation du trafic urbain multimodal et la fiabilité et la qualité de service des réseaux multimodaux.

1- Estimation de l'état du trafic. Après avoir commencé, par un filtre de Kalman simple, je participe aujourd'hui à la mise en œuvre d'un filtre de Kalman "unscented", qui permet une meilleure prise en compte des non-linéarités et des contraintes sur l'état du trafic.

2- Régulation du trafic autoroutier. Mon apport méthodologique à cette thématique a consisté à développer une commande optimale pour une régulation coordonnée pour des autoroutes de grandes dimensions. J'ai contribué à l'acceptation du contrôle d'accès par les professionnels et les usagers par mes présentations pédagogiques dans diverses manifestations (chez les exploitants, sciences en fête, portes ouvertes, ...) et j'accompagne aujourd'hui son implémentation en temps réel en Île-de-France.

3- Régulation du trafic urbain multimodal. Outre le fait que j'ai été l'une des premières à traiter la régulation multimodale, j'ai mis en relief les difficultés techniques pour traiter conjointement les transports en commun et la voiture particulière. Sur le plan méthodologique, j'ai développé des stratégies sur la base des méthodes Linéaire-Quadratique, Commande Prédicative à base de Modèle, commande multi-objectifs et système multi-agents. Je me suis premièrement intéressée à la circulation dans un environnement classique avant de traiter le trafic dans un environnement coopératif, puis en présence de véhicules autonomes.

4- Fiabilité et qualité de service des réseaux multimodaux. J'ai contribué à la définition et à la connaissance de la fiabilité du temps de parcours, notion relativement nouvelle dans les évaluations des projets. J'ai analysé et discuté la pertinence des différents indicateurs développés pour sa mesure. Du point de vue méthodologique, j'ai à mon actif deux contributions fondamentales. La première concerne la méthodologie mise au point pour l'évaluation ex-post de la fiabilité par la méthode de comparaison avant-après, généralisée pour tenir compte des distributions qui interviennent dans la fiabilité. La seconde concerne le développement de l'indice de Gini et d'une méthodologie permettant l'usage de la courbe de Lorenz pour analyser la régularité des lignes de transports en commun.

2. Production de la recherche

	Code	Nombre total
Article dans une revue à comité de lecture répertoriée dans les BDI (y compris soumis)	ACL	14
Article dans une revue à comité de lecture non répertoriée dans les BDI	ACLN	8
Direction d'ouvrage	DO	4
Ouvrage scientifique ou chapitre	OS	4
Conférence invitée dans un congrès international ou national	INV	3
Communication avec actes dans un congrès international	ACT	50
Communication orale sans actes dans un congrès international ou national	COM	17
Communication par affiche dans un congrès international ou national	AFF	5
Rapport de recherche	RAPP	18
Rapport d'expertise	RAPP-EX	3
Total		126

Encadrements

- 4 thèses soutenues et 1 en cours
- 10 stages de Master et d'écoles d'ingénieurs
- 12 projets de fin d'études dans des écoles d'ingénieurs

3. Expérience en enseignement

Diplômée de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique, j'ai été initiée à l'enseignement dès mes cours à l'école, avec un cours de pédagogie et des stages d'enseignement en lycées. J'apprécie bien l'enseignement depuis que j'ai pratiqué par la suite pendant plusieurs années et à de nombreuses occasions.

J'ai ainsi travaillé en tant qu'Assistante, puis Maître-Assistante de l'enseignement supérieur pendant six années en Tunisie. A ce titre, j'ai pris en charge la responsabilité de l'enseignement de différents modules en Automatique (cours magistraux, travaux dirigés et travaux pratique), tout d'abord à l'Académie Navale, puis à l'ISSET (Institut Supérieur d'Enseignement Technologique). De ma propre initiative, j'ai assuré durant cette période d'autres enseignements dans un cursus d'enseignement classique, de l'Automatique à l'IPEST (Institut Préparatoire des Etudes Scientifiques et Techniques, La Marsa) et de la Recherche opérationnelle à l'Académie Militaire. J'ai par ailleurs mis sur pied et assuré durant les deux années précédant mon retour en France un cours de 18 h, « Planification et Gestion des Transports » pour des élèves Ingénieurs de 3e année en « Génie civil » à l'ENIT (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis). Après, en 2008, j'ai monté et enseigné le cours « Systèmes multimodaux de transports », 15 h de cours pour des élèves de Master à l'ISTLS (Institut Supérieur du Transport et de la Logistique de Sousse) en Tunisie. J'ai également assuré trois années de suite 12 h de cours et 12 h de travaux dirigés pour deux groupes au sein du cours « Planification des Transports » à l'EIVP Paris-tech (Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris). J'ai par ailleurs fait des interventions de plus courte durée : 3 heures de cours « Urban

Traffic Control » pendant l'école d'été de l'action COST ARTS et une intervention de 3 h sur « la Régulation du trafic urbain et les systèmes de priorité bus » au sein du cours « Simulation et régulation du trafic en transport collectif urbain » pour des élèves ingénieurs de 3e année.

4. Cinq articles représentatifs de mes recherches

A- Filtrage et estimation de l'état du trafic

- 1) Rossi M. A., N. Bhourri, A. J. Rubiales, P.A. Lotito. A constrained filtering algorithm for freeway traffic state estimation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics* (Impact Factor: 1.565, 2015) (en revision).

B- Régulation du trafic urbain multimodal

- 2) Bhourri, N., F. Balbo, S. Pinson. *An Agent-Based Computational Approach for Urban Traffic Regulation*, Progress in Artificial Intelligence 1(2), pages 139-147, Springer-Verlag, 2012.
- 3) Bhourri N., F.J. Mayoranno, P.A Lotito, H. Haj-Salem; JP. Lebacque" Public Transport Priority for Multimodal Urban Traffic Control". *Cybernetics and Information Technologies. Journal of Cybernetics and Information Technologies*. Volume 15, Issue 5, Pages 17–36, ISSN 1314-4081, DOI: [10.1515/cait-2015-0014](https://doi.org/10.1515/cait-2015-0014), April 2015. (Scopus HI.5)

C- Fiabilité et qualité de service

- 4) Bhourri, N., Aron, M ., JP. Lebacque and H. Haj-Salem. Effectiveness of Travel Time Reliability Indicators In the Light of the Assessment of Dynamic Managed Lanes Strategy. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*. Taylor & Francis. 2017/05/09. Vol, 0 N15 Pages 1-15 <http://dx.doi.org/10.1080/15472450.2017.1327815>. (Impact Factor: 1.565, 2015)
- 5) Bhourri N., H. Haj-Salem and J. Kauppila, Isolated versus Coordinated Ramp metering: Field Evaluation Results of Travel Time Reliability and Traffic Impact, *Transportation Research Part C : Emerging Technologies*. Volume 28, March 2013, Pages 155-167. (JCR IF, 3,075). Article cité 60 fois.

5. Curriculum Vitae

Neïla BHOURI

Email: neila.bhour@ifsttar.fr

Tel : + 33 1 81 66 86 89 (bureau)

+33 6 88 92 26 16 (Mobile)



Adresse personnelle : 2 rue des bergers, 75015 Paris- France

Adresse professionnelle : IFSTTAR /COSYS/ GRETTIA

14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne
F-77447 Marne la Vallée, Cedex 2

5.1 Information administrative :

Organisme : IFSTTAR - Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

Département : COSYS - Composants et Systèmes

Laboratoire : GRETTIA - Génie des Réseaux de Transport Terrestres et Informatique Avancée

Corps : Chargé de recherche du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

Date de recrutement : Avril 1991

Grade: 1^{ème} classe, 9^{ème} échelon (final)

Ancienneté dans le grade : 15 ans

Travail à temps partiel : 90% de 2006 à 2014

5.2 Diplômes

Diplôme de l'Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technique (ENSET-Tunis), en Génie Electrique. Juin 1985. Mention Bien.

D.E.A. d'Automatique et Traitement du Signal, Laboratoire des Signaux et Systèmes à l'Ecole Supérieure d'Electricité (SUPELEC) et l'Université Paris XI - Orsay, France. Juin 1987.

Doctorat d'Automatique, Université Paris XI - Orsay, France. Mars 1991

5.3 Activités professionnelles

Depuis 09/1999	Chargée de recherche. <i>Rattachée au Laboratoire Génie des Réseaux Transport et Informatique Avancée (GRETIA) de l'INRETS et puis au Laboratoire Génie des Réseaux de Transport Terrestre et Informatique Avancée (GRETTIA) du département COSYS (département Composants et Systèmes) de l'IFSTTAR</i>
1997 - 1999	Maître-Assistant de l'Enseignement Supérieur. <i>Institut Supérieur des Etudes Technologiques (ISET), Radès, Tunisie.</i> Enseignement de cours, travaux dirigés et travaux pratiques en Automatique Encadrement de projets de fin d'études et de Master.
1993 - 1997	Assistant (1993-1995), puis Maître-Assistant de l'Enseignement Supérieur, détachée auprès du Ministère de la Défense. <i>Académie Navale, Menzel Bourguiba, Tunisie.</i> Enseignement de cours, travaux dirigés et travaux pratiques en Automatique Encadrement de projets de fin d'études
1991 - 1993	Chargée de recherche. <i>Rattachée au Département Analyse et Régulation du Trafic (DART) de l'INRETS.</i> Régulation du trafic aérien. Contrôle d'accès autoroutier. Estimation des variables de trafic

5.4 Vacances (enseignement)

2015	ENPC Paris-Tech (École des Ponts ParisTech) « Régulation du trafic urbain et systèmes de priorité bus », 3 heures au sein du cours « Simulation et régulation du trafic en transport collectif urbain » pour les élèves ingénieurs de 3 ^e année.
2013	COST ARTS : Summer School “ Urban Traffic Control ” 3 heures de cours. Au sein de la formation « Autonomic Road Transport Support Systems: foundations & techniques ». Paris-Marne La Vallée, 22 May 2013.
2008-2011	EIVP Paris-tech (Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris). Planification des Transports , 36 heures/an pour les étudiants ingénieurs en 3 ^e année.
2008-2009	ISTLS (Institut Supérieur du Transport et de la Logistique de Sousse) en Tunisie. « Systèmes multimodaux de transports », 15 heures de cours pour les étudiants en Master II recherche à l'Institut Supérieur de Transports et Logistiques de Sousse (ISTLS) en Tunisie.
1996 - 1999	ENIT (Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis), Tunis, Tunisie. Enseignement de cours : " Planification et Gestion des Transports ", 18 heures/an pour les étudiants en 3 ^{ème} année ingénieurs. Encadrement de DEA : "Sur la modélisation et la gestion du trafic urbain". Encadrement de quatre projets de fin d'année dans le domaine du transport.

1996 - 1997	Académie Militaire , Fondouk El Jedid, Tunisie " Recherche Opérationnelle ", 36 heures pour les étudiants en 1 ^{ème} année ingénieurs
1996 - 1997	IPEST (Institut Préparatoire des Etudes Scientifiques et Techniques), La Marsa, Tunisie. Enseignement d' Automatique intégré dans le cours de Sciences Industrielles (Automatismes à séquences ; Systèmes asservis linéaires continus).

6. Formations suivies

Par essence, un chercheur-enseignant est en continuelle formation et recherche d'information. Les formations que j'ai suivies durant ma carrière sont donc diverses et variées. Certaines font partie du cursus classique de formation, même si dans certains cas ils ont été dispensés par des collègues : Programmer en C++ (3 jours en 2000), Analyse et conception orientées objet avancées avec UML, (2001, 3 jours), Modéliser et développer avec Rational Rose, société Rational, (2001, 2 jours), programmer avec Scilab (3 jours, 2002)

D'autres font partie du corps du métier : Ecole d'Hiver sur l'Intelligence Artificielle, (5 jours 1998), Comment mettre en place une politique intermodale dans les transports, ENPC, Paris (2 jours, 1999), Manipulation du logiciel de simulation microscopique Dynasim (3 jours, 2006), etc.

J'assiste également, le plus régulièrement possible, aux différents séminaires et manifestations où des chercheurs, mais aussi des acteurs économiques présentent les méthodes et les résultats de travaux théoriques ou appliqués dans mes domaines de travail ou dans des domaines proches. C'est ainsi que j'ai suivi le séminaire « Modèles de trafic » dès sa création en 1991. Séminaire qui a évolué vers « Séminaire Modélisation des Réseaux de Transport » que je co-anime aujourd'hui. J'assiste également régulièrement au Forum « NTIC et Transports » et j'ai participé à l'organisation de sa session dédiée à l'automatique. J'ai suivi activement les plates-formes intégratrices (PFI) de l'INRETS, principalement la PFI ITGUR (Innovations dans les transports guidés urbains et régionaux), la PFI TISIC (Traitement de l'Information, Signal, Image, Connaissance), et la PFI SSTT (Sécurité et Sureté des Transports Terrestres).

En conclusion, consciente de l'importance d'entretenir une indispensable ouverture d'esprit pour pouvoir développer des recherches innovantes, j'assiste régulièrement à des séminaires et je réfère des articles sur des domaines en marge de mes activités ou à caractères généraux

7. Encadrements

7.1 Thèses

Soutenues :

Matthis GACIARZ, « Régulation de trafic urbain multimodal : une modélisation multi-agents ». Université Claude Bernard Lyon 1, Spécialité : Informatique. Soutenue le 05/12/2016.
Co-encadrement avec Samir Aknine (Pr., Univ. Lyon)
Bourse de la région Rhones Alpes.
Taux d'encadrement 40%

Dihya ATMANI, « Affectation dynamique dans les systèmes de transport multimodaux ». Université Paris Est, Spécialité : Signal, Image, Automatique. Soutenue le 18/12/2015.
Co-encadrement avec Jean-Patrick Lebacque (IGPC) et Habib Haj-Salem (Dr, IFSTTAR).
Bourse IFSTTAR.
Taux d'encadrement 50%

Sofiane Kachroudi, « Commande et Optimisation d'un système de régulation du trafic urbain multimodal : priorité pour les transports en commun de surface ». Université d'Evry Val d'Essonne. Soutenue le 11 Janvier 2010.
Co-encadrement avec Said Mammam (Pr, Univ. d'Evry Val d'Essonne).
Bourse IFSTTAR.
Taux d'encadrement 70%

Nadir Farhi , « Modélisation Minplus et Commande du Trafic de Villes Régulières». Université Paris 1 - Panthéon – Sorbonne. Soutenue le 03 juin 2008.
Co-encadrement sur un chapitre de la thèse avec Jean-Pierre QUADRAT (Dr, INRIA).
Bourse Ministère de la recherche.
Taux d'encadrement 15%

En cours

Mouloud KHELFI « optimisation des flux de trafic sur un réseau routier en milieu urbain », Faculté Sciences de la Technologie, Université des Frères Mentouri Constantine 1, Algérie. Collaboration avec Pr Salim BOUKEBBAB

7.2 Stages

Amine MELAKHSOU, " Gini Index for headways and travel times regularity measuring", Master 2 Gestion de production et logistique. Université de Lorraine, Metz. 6 mois, 2018.

Wael SAKER, "Regularity indicators for public transport". Master 2 MMMEF (Mathématiques Appliquées à l'Économie et à la Finance) . Université Paris 1 - U.F.R. de Mathématiques et Informatique. 2016

Dora LEE BORG "Simulating traffic on le Bourget urban network with the SUMO simulation model". Stage de 3 mois financé par l'ambassade de France à Malte. Septembre-décembre 2015.

Arthur DE LA ROCHEFOUCAULD; "Calibrage du diagramme fondamental" Master 2 "Mathématiques Appliquées à l'Économie et à la Finance". Université Paris 1 - U.F.R. de Mathématiques et Informatique. 2014
Co-encadrement: Maurice Aron

Mouad RAMIL, Analyse de données agrégées de temps de parcours. Stage scientifique, 3 mois, Elève-ingénieur, Ecole des Ponts Paris Tech. 2013.
Co-encadrement: Maurice Aron
Bourse de la Chaire STIF

Younes Guessous, Analyse de données agrégées de temps de parcours. Stage scientifique, 3 mois, Elève-ingénieur, Ecole des Ponts Paris Tech. 2013.
Co-encadrement: Maurice Aron
Bourse de la Chaire STIF

Marwen CHABBI, "Régulation du trafic urbain multimodal". Stage de Master 2 ISI (Informatique, Systèmes Intelligents), Université Paris Dauphine, 5 mois, 2013.

Mohammed TLIG, "système multi-agent pour la régulation du trafic urbain multimodal". Stage de Master 2 ISI (Informatique, Systèmes Intelligents), Université Paris Dauphine, 5 mois, 2010.

Djilali TOUAZI « Une commande prédictive pour la régulation du trafic urbain bimodal ». Master 2 MMMEF (Mathématiques Appliquées à l'Économie et à la Finance). Université Paris 1 Panthéon - U.F.R. de Mathématiques et Informatique. 2008

Bilal LASSAMI. « Analyse des modèles de trafic en vue d'une commande intermodale ». Stage de DEA en automatique et traitement du signal: Supelec Université de Paris Sud Mars-juillet 2003.

8. Rayonnement et diffusion de la culture scientifique

Je présente dans cette partie mes collaborations nationales et internationales, mes activités d'organisation de conférences, de référés et d'expertises. J'ai en effet organisé 3 conférences, une école d'été, j'anime un séminaire pluriannuel et j'ai référé une centaine d'articles scientifiques pour des journaux ou de conférences. J'explicité donc cette activité ci-dessous.

8.1 Collaborations nationales et internationales

A côté de ma participation aux projets j'ai une riche expérience de collaborations au niveau national et international ainsi que je le détaille ci-après en commençant par celles qui sont encore en cours aujourd'hui.

Vice-président du Technical committee TC7.4 de l'IFAC pour l'industrie et membre de l'IFAC Industry Committee (CC7)

Depuis, 1999, je suis membre du comité technique de l'IFAC (International Federation of Automatic Control) dédié au contrôle des systèmes de transport TC7.4 (Control of Transportation Systems). À ce titre, je suis amenée à référer des articles pour le compte de conférences soutenues par l'IFAC. Le comité se réunit en marge de la conférence CTS (Symposium on Control in Transportation Systems) environ une fois tous les trois ans. Depuis novembre 2017 je suis nommée vice-président de ce comité en charge des

relations avec l'industrie et nommée membre du CC7. Je dois à ce titre faciliter les échanges entre l'IFAC et le monde industriel.

Action COST "Intelligent Mobility Skills"

J'ai participé activement au montage de cette action COST présidé par Y. HERBATH de TSC (UK). Le projet a été déposé une première fois en décembre 2016, puis une version améliorée suivant les recommandations des référés a été déposée le 7 septembre 2017. Le projet rassemble aujourd'hui 22 pays de la Communauté européenne, 3 pays partenaires, 4 pays amis, et compte parmi les participants plusieurs de mes collaborateurs et connaissances. Le travail au sein de cette action renforcera mes collaborations tant nationales qu'internationales.

National University of Central Buenos Aires, Argentina

Cette collaboration date de 2005 quand le Professeur Pablo LOTITO effectuait un Post-Doc à l'INRETS. Elle s'est pérennisée après la prise de fonction de celui-ci à l'université "National University of Central Buenos Aires". Je collabore aujourd'hui avec lui et son équipe sur les thèmes de la régulation du trafic urbain multimodal (1 ACL et 3 ACT) et l'estimation de l'état du trafic (1 ACL et 1 ACT). À mon invitation, Pablo LOTITO fait également partie des partenaires de l'action COST "Intelligent Mobility Skills" présentée ci-dessus. Quand elle sera acceptée, cette action facilitera notre collaboration grâce aux possibilités de déplacements et d'échanges d'étudiants qu'elle sera susceptible d'offrir.

Université Lyon 1

Du fait de mon expertise dans le domaine des transports, j'ai été contactée par le Professeur Samir AKNINE du laboratoire GAMMA de l'université Lyon 1. Je l'ai alors orienté sur la régulation du trafic urbain multimodal dans un environnement coopératif. Nous avons déposé un projet de thèse à la Région Rhône-Alpes qui a été accepté et avons alors co-encadré la thèse de Matthis GACIARZ (2011-1015). Nous collaborons aujourd'hui pour l'encadrement de la thèse de Huan VU sur la même thématique.

CEREMA

J'ai été épaulé par François Rambaud, chef de projet au CERTU, devenu CEREMA pour le montage du projet que nous avons nommé QUALIBUS (Conception d'un banc de test pour l'évaluation de la QUALité des BUS à haut niveau de service). Par sa connaissance du terrain, François a facilité les contacts avec les autorités organisatrices et les exploitants. Nous avons regroupé dans ce projet des autorités d'organisations des transports (Rouen, Nantes, Lorient), et des exploitants (RATP, Thales). Le projet a été déposé pour un financement ANR sans succès. François Rambaud a continué à suivre de près mes recherches concernant la qualité de service des bus. Il a appuyé le projet Franco-Indien INDIRA_B. A son départ à la retraite, il a encouragé Madame Cécile Clement-Werny, Directeur d'études "Systèmes innovants et territoires spécifiques" à suivre le projet. Ce qu'elle fait. Par ailleurs, sur son conseil, Alexis BACELA, chargé de projets "Exploitation et gestion dynamique des trafics, gestion multimodale des déplacements" du Département Mobilités, m'épaulera dans mes tâches au sein de la nouvelle action COST "Intelligent Mobility Skills" après son approbation par la commission européenne.

Transport Systems Catapult, UK

Je collabore plus particulièrement avec Dr Fabio GALATIOTO que j'ai connu comme chercheur associé à l'université de Newcastle et qui a intégré par la suite Transport System Catapult (TSC). Les échanges intéressants que nous avons eus se sont concrétisés par le dépôt, en 2015, du projet H2020 ; OSCAR (Open digital Social platform to enhance Collective Awareness towards eRgonomic and sustainable transport systems). Ce projet, proposé à un financement H2020, visait à intégrer dans un système

adaptatif Internet des objets, des données d'expérience personnelle provenant des collectes des données des usagers des transports, y compris des données de satisfaction des utilisateurs. Proposé pour un financement de 3,7 millions d'euros, OSCAR n'a pas été retenu par la Commission européenne. Nos engagements respectifs sur d'autres projets nous ont empêchés de proposer un autre projet, mais nous continuons nos échanges scientifiques sur le thème des systèmes intelligents pour la mobilité. Dr GALATIOTO effectuera un court séjour au GRETTIA du 17 au 19 janvier 2018 et fera, à ma demande, une présentation au séminaire « Modélisation des Réseaux de Transport » qui aura lieu le 18 janvier 2018.

Kore University of Enna, Italie

J'ai été contactée par le Professeur Giovanni TESORIERE et le Docteur Tiziana CAMPISI du fait de mon expertise dans les domaines de la régulation et de l'évaluation. Une collaboration intéressante s'est alors établie sur le thème de l'évaluation de stratégies de régulation, notamment en matière de polluants. Dr. CAMPISI a effectué deux séjours au GRETTIA (15 jours en 2014 et 10 jours en 2015), où elle s'est familiarisée avec le réseau multimodal de la Seine Saint-Denis (CG93), réseau d'application du projet LAsdim. Cette collaboration qui court toujours a déjà donné lieu à la publication de 2 ACT et la soumission d'1 ACL.

Université de Newcastle, UK

J'ai rencontré Margaret C. Bell (Professeur émérite à l'université de Newcastle) lors des activités de l'action COST ARTS. Nous avons remarqué rapidement nos intérêts communs pour la régulation du trafic et la qualité de service, notamment ceux des transports en commun. Nous avons alors décidé de démarrer une collaboration qui s'est concrétisée tout d'abord par un séjour d'environ un mois de ma doctorante, Dyhia ATMANI, à l'université de Newcastle. Grâce aux discussions enrichissantes avec toute l'équipe sur place, Dyhia a pu modéliser le réseau de routes de la ville de Newcastle et introduire les véhicules autonomes comme nouveau mode de transport dans le modèle d'affectation multimodal qu'elle a développé pendant sa thèse. Deux publications communes en ont résulté. Par ailleurs, le Docteur Patricia FRANCO, chercheur associé à l'université de Newcastle, a fait un séjour de 15 jours au GRETTIA, cette collaboration s'étant concrétisée par une communication par affiche. Je discute régulièrement avec Dr. FRANCO et nous avons plusieurs projets de collaborations.

J'ai également coordonné pour l'Ifsttar le dépôt en 2014 du projet européen NOISTA (NOvel Information Systems for Transport Applications) qui comptait une douzaine de laboratoires européens et était piloté par le Docteur Yvonne Huebner de l'université de Newcastle. NOISTA visait à améliorer les systèmes actifs de gestion du trafic grâce à des capteurs et des sources de données non traditionnelles (tels que Twitter, Facebook, Mobile Phone Bluetooth Tracks, Feature Recognition, etc.) dans l'objectif d'améliorer la sécurité routière, ainsi que l'efficacité énergétique de tous les modes du transport. Ce projet a été proposé pour un budget total de 504 K€, dont 160 K€ pour l'Ifsttar. La contribution de l'Ifsttar était double : d'une part ma proposition de recherche sur la régulation du trafic multimodal dans un environnement coopératif avec application sur des données de la ville de Toulouse, d'autre part la contribution de mes collègues du LICIT sur la fusion des données.

Faculty of Engineering University of Malta, La Valetta, Malte

Du fait de mon expertise dans le domaine de la régulation du trafic urbain, j'ai été contactée par le Docteur Kenneth SCERRI du "Department of Systems and Control Engineering" de "Faculty of Engineering University of Malta". J'ai alors accueilli son élève de Master, Dora Lee BORG, pour un stage de 3 mois financé par l'ambassade de France à Malte. Le travail de Dora ne s'est pas poursuivi par une thèse faute

de financement, mais elle a effectué un travail intéressant qui a donné lieu à une communication par affiche et un produit logiciel de modélisation à l'aide du logiciel SUMO qui est utilisé au sein du projet LASDIM. Le Docteur Kenneth SCERRI ayant quitté par la suite son poste à l'université pour travailler dans le secteur privé, la collaboration s'est interrompue.

OCDE/ITF (2006-2009)

Ma participation à la rédaction du rapport "*Improving Reliability on Surface Transport Networks*" m'a permis plusieurs rencontres intéressantes et m'a ouvert un courant de recherche. Parmi les rencontres, je cite le professeur Mickal TAYLOR (University of South Australia), qui jouit d'une grande notoriété dans le domaine de la fiabilité des transports. Mickal TAYLOR a répondu à deux reprises (en 2010 et 2012) à une invitation de ma part et j'ai pu avoir avec lui des discussions très enrichissantes. J'ai par ailleurs entamé une recherche avec Jari KAUPPILA de ITF, le coordinateur du rapport. Celle-ci a débouché sur la publication de 2 ACL et 2 ACT.

Action COST ARTS TU100 (2012-2015)

J'ai participé activement aux différentes réunions et manifestations de cette action COST. En plus des rencontres avec mes pairs dont certains sont devenus mes collaborateurs, j'ai pu acquérir une expérience dans l'organisation de manifestations scientifiques. Je cite dans la rubrique "Organisation d'événements scientifiques" de ce document, mes responsabilités pour préparer, autant du point de vue scientifique que logistique, le 1^{er} « Training school » et la conférence finale de cette action. De moindre envergure, mais aussi enrichissant du point de vue scientifique, le workshop que j'ai également organisé à Paris les 6 et 7 mai 2014, durant lequel nous avons discuté la "Roadmap" et le livre qui seront publiés par cette action COST (Ed. McCluskey *et al.*, 2016).

8.2 Expertise

Membre expert du groupe de travail de l'**OCDE** (Organisation pour la coopération et le développement économique) et **FIT** (Forum international des transports) **pour le groupe de travail « *Improving Reliability on Surface Transport Network* »s. 2006-2009.**

Participation en tant que « **assistant à maîtrise d'ouvrage** » pour le compte du **MEDAD/DGMT** (direction générale de la Mer et des Transports du Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables) sur l'étude « information multi modale des passagers en situation dégradée » réalisée par le **CETE méditerranée**. 9 mois 2008-2009.

Participation au groupe de travail de **ITS-France "Information multimodale en agglomération"**. L'objectif de ce groupe est de recenser les obstacles techniques, économiques et institutionnels rencontrés dans le développement des services d'information multimodale, puis d'examiner les solutions possibles pour les problèmes les plus importants. Un rapport intitulé : "**Pour un développement de l'information multimodale en agglomération : freins et perspectives**" a été publié en Avril 2002. Les résultats étaient présentés notamment durant la journée technique d'ITS, le 11 avril 2002.

8.3 Organisation d'évènements scientifiques

- **Séminaire pluriannuel « Modélisation des Réseaux de Transport »**, Je co-anime ce séminaire avec Nadir Farhi, et Jean-Patrick Lebacque de l'IFSTTAR/COSYS/GRETTIA et Zoi Christoforou et Fabien Leurent du LVMT (laboratoire mixte ENPC et IFSTTAR/AME).
 - ~ Nombre de participants variable, autour de **30 personnes**/séminaire
- **Conférence finale de l'action COST ARTS** à Bordeaux 6-7 Octobre 2015.
 - Organisation scientifique et logistique : Neila BHOURI & Thomas Lee McCluskey (Prof. Univ. of Huddersfield)
 - ~ 80 personnes
- **Ecole d'été de l'action COST ARTS** : Training School. Paris-Marne La Vallée, May, 21-24, 2013. 4 jours
 - Comité scientifique : Neila Bhourri and Omer F. Rana (Prof. school of computer science, Cardiff university)
 - Comité d'organisation : Neila Bhourri, Zoi Christoforou (ENPC), H. Mahdi Zargayouna (IFSTTAR)
 - ~ **55 étudiants**, 11 modules
- **15th EURO working group on transportation** (Conférence du groupe de travail Transport de l'Association Européenne de Recherche Opérationnelle (EURO)), September 10-12, 2012, Paris.
 - Organisation : Vincent Aguiléra, Neila Bhourri; Nadir Farhi, Fabien Leurent et Régine Seidowsky.
 - ~ **200 participants**. Actes édités par Elsevier, 2 numéros spéciaux de journaux :
 - TRC (Editeurs : Neila Bhourri et Nadir Farhi)
 - EJITIR (Editeurs : Vincent Aguiléra et Régine Seidowsky)
- **2nd EURO working group on transportation** (Conférence du groupe de travail Transport de l'Association Européenne de Recherche Opérationnelle (EURO)), September 15-17, 1993, Paris.
 - Organisation: Neila Bhourri, Florence Boillot et Fabien Leurent
 - ~ **100 participants**. Actes Éditions INRETS.

8.4 Participation à des jurys

- Depuis 1999, j'ai participé à plusieurs jurys de concours pour des recrutements externes ou des changements de grade en interne à l'INRETS. J'ai participé encore cette année (2017) au concours de recrutement d'un ingénieur d'études pour le poste d'« Administrateur des systèmes informatiques, réseaux et télécommunications » au laboratoire SIRI de l'IFSTTAR.
- Jury de compétition le 05 octobre 2015, projets mettant en œuvre des systèmes autonomes dans les transports (7 projets). 2nd COST ARTS competition, Bordeaux le 05 octobre 2015.
- Jury de thèse de Dihya ATMANI, le 18 décembre 2015, Université Paris Est, Marne La Vallée
- Jury de thèse de Matthis GACIARZ, le 05 décembre 2016, Université Claude Bernard Lyon 1.
- Jury de thèse de Sofiane Kachroudi, le 11 Janvier 2010, Université d'Evry Val d'Essonne.
- Jury de thèse de Nadir Farhi, le 03 juin 2008, Université Paris 1 - Panthéon – Sorbonne.

- Divers jurys de stage de Master, stage d'école d'ingénieurs et de projet de fin d'études d'école d'ingénieurs.

8.5 Expertises pour revues et conférences

Revues

Pour la science (1 article),
 Transportation Research Part C (13 articles),
 Transport - Taylor & Francis (3 articles),
 Transportmetrica A: Transport Science (1 article),
 Transportmetrica B: Transport Dynamics (1 article),
 Transportation Research Part B (1 article),
 Transportation Research Part A (1 article),
 International Journal of Control (1 article),
 European Transport Research Review (1 article),
 Journal of Advanced Transportation, (1 article),
 Recherche Transport Sécurité (membre du comité éditorial 2001-2009).

Projets

J'ai également évalué régulièrement des projets de recherche pour le compte du centre de recherche METRANS. "METRANS Transportation Center" est un laboratoire commun à l'University of Southern California (USC) et la California State University Long Beach (CSULB).

Conférences

Je suis membre du comité scientifique des conférences suivantes:

IEEE ITSC: IEEE Intelligent Transportation Systems Conference

IEEE ICVES: IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety

IFAC-CTS: IFAC Symposium on Control of Transportation Systems

Euro-EWGT: European Working Group on Transportation MFTS Management of Future motorway and urban Traffic Systems"

ICSTTE, International Conference on SmartRail, Traffic and Transportation Engineering

Je réfère également régulièrement des articles pour de nombreuses autres conférences. Pour ne citer que les plus connues:

- *TRB*, Transportation Research Board. Je suis « membre ami » pour deux comités:

- Transit Management and Performance Committee (AP010)
- Standing Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics (AHB45)

- ACC, American Control Conference

- IFAC World Congress

8.6 Participation aux instances

- Membre élu du conseil scientifique de l'IFSTTAR (à partir de février 2016)
- Membre de la commission de formation de l'IFSTTAR (à partir de septembre 2015)
- Membre élu du conseil du département COSYS de l'IFSTTAR (à partir de janvier 2014)
- Membre élu du conseil scientifique de l'ISET de Radès en Tunisie (1998-1999)

8.7 Prix

Prix du meilleur papier ex-aequo pour les deux étudiants que je co-encadrais :

- Matthis Gaciarz, Neila Bhourri, Samir Aknine; "Continuous Negotiation for a Vehicle-Regulated Intersection". Autonomic Road Transport Support Systems Early Career Researcher Conference (ARTS ECR 2015), Malte 27-28 May 2015. Prix du meilleur papier.
- Dihya Atmani, Fabio Galatioto, Neila Bhourri, Patrizia Franco, Jean-Patrick Lebacque, Margareth Bell. "Towards the introduction of an autonomous transportation line in a multimodal transportation system". ARTS ECR 2015. Malte

9. Détails des projets

Contrat	Sujet	Budget	Période	Type
ARNAR	Recherche du plus court chemin avec contrainte sur un réseau de voies aériennes	150KF	1992-1993	Convention DGAC
SITP-VP	Analyse et Modélisation des fonctions de gestions conjointes des modes VP et TC	482,4 KF TTC	2001-2002	Projet ANR
TRACKSS	Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge Sharing Sensors	2500KF	2006-2008	Projet européen (6ème PCRD)
Gestion des crises	Modèle et outil de gestion temps réel des crises	213,3 K€	2006-2008	Convention avec la DSCR.
Généralisation de la régulation d'accès en IDF	Outil d'évaluation et d'exploitation des réseaux : simulation pour la gestion des voies	48000€	2007-2009	Covention DIRIF
NEARCTIS	A Network of Excellence for Advanced Road cooperative traffic management in the Information Society.	3 M€	2007-2011	Réseau d'excellence, 7ème PCRD
LASDIM	Large Scale Data Infrastructure for Mobility	4,3 M€ dont 0,5 M€ pour l'IFSTTAR	2015-2018	FUI20
INDIRA_B	INDicators for Reliability and Variability of BRTS/ Bus Systems	250K€ dont 130 K€ pour l'IFSTTAR	2016-2019	CEFIPRA (centre Franco Indien pour la Promotion de la Recherche
Contrôle d'accès coordonné	Généralisation de la régulation d'accès en IDF	250 K€	2015-2018	Convention DIRIF
SCOOP@F	Test deployment project of cooperative intelligent transport systems		2014-2017	Contrat MEDDE

[Proj.1] **INDIRA_B** (INDicators for Reliability and Variability of BRTS/ Bus Systems) est un projet financé par l'Institut CEFIPRA (Le Centre Franco-Indien pour la Promotion de la Recherche). Il a pour objectif de développer un « cockpit » pour l'évaluation de la qualité de service des bus avec des tests sur le réseau de bus de New Delhi. Il est en partenariat avec 2 équipes indiennes : un partenaire académique "Transportation Research and Injury Prevention Programme" (TRIPP) at the "Indian Institute of Technology" (IIT) Delhi et l'exploitant des réseaux de bus de Delhi « Delhi Integrated Multimodal Transit System Ltd. » (DIMTS). Le budget total est d'environ 250000€, le budget pour l'IFSTTAR est de 130 000€.

Collaboration interne: Gérard Scemama, Maurice Aron, Sylvain Lassarre et Mustapha Tendjaoui
Je suis chef de projet et le conduit par conséquent sur toutes ses étapes dès la rédaction de la proposition.

[Proj.2] **Généralisation de la régulation d'accès en IDF.** Convention signée avec la DIRIF en Juillet 2015 pour une durée de 3 ans. Elle concerne la généralisation de la régulation d'accès sur les autoroutes de l'Île de France. La DIRIF vise le passage de 22 accès régulés à 75 accès sur 4 ans. L'objectif des travaux de l'IFSTTAR/GRETTIA est le développement d'un algorithme temps réel de l'estimation de la consigne pour ALINEA et son intégration dans SIRIUS. Ensuite, le développement, l'étude et les tests en simulation et sur site réel de la coordination des accès. Le budget est de 250 K€/3 ans

Collaboration interne: Habib Haj-Salem, Nadir Farhi, et Cyril Nguyen Van Phu

Première phase consistant en la proposition et le test de méthodes pour l'ajustement automatique et en temps réel de la consigne pour ALINEA, est achevée. Nos recherches dans cette deuxième phase concernent la proposition et les tests en simulation de méthodes de coordination du control.

[Proj.3] **LaSDIM** (Large Scale Data Infrastructure for Mobility) est un projet FUI20, en partenariat académique avec l'IGN et industriel avec THALES, NEAVIA, CDVIA. Ce projet a démarré en 2016. Le coût total du projet est de 4,3 M€ dont 0,5 M€ pour l'IFSTTAR (COSYS\GRETTIA). Ce projet met en œuvre notamment la plateforme ClaireSITI avec l'élaboration d'un référentiel de l'intermodalité et de services innovants (information sur la mobilité, régulation dynamique, systèmes coopératifs, bigdata et simulation) avec un ancrage fort sur le territoire de la Seine Saint Denis (Living Lab CG93).

Collaboration interne: Gérard Scemama, Hamza-Mahdi Zargayouna et Mustapha Tendjaoui

Je suis responsable de l'aspect "évaluation et diagnostic" et je participe aux diverses tâches afférentes à ce projet.

[Proj.4] **SCOOP@F:** Test deployment project of cooperative intelligent transport systems

Le ministère du développement durable coordonne un projet de déploiement pilote des systèmes de transport intelligents coopératifs (STI coopératifs). Les STI coopératifs sont basés sur les communications et le partage d'informations entre véhicules, infrastructures routières et infrastructure de communication pour améliorer la sécurité des usagers, faciliter leurs déplacements et garantir la sécurité des agents qui interviennent sur les routes. Durée de projet : 2014-2017.

Partenaires: Ministère de l'écologie, Communauté Urbaine de Bordeaux, Conseils généraux des Côtes d'Armor, du Finistère, d'Ille et Vilaine, de l'Isère, Conseil régional de Bretagne, City of St Brieuc, opérateurs de réseaux français, PSA, Renault, CEREMA, IFSTTAR, GIE RE PSA-Renault, Université de Reims, Telecom Paris Tech, Marben Products, Neavia Technologies

Je m'intéresse dans ce projet à l'aspect régulation du trafic dans un environnement coopératif.

S'intègre dans ce projet la thèse de Matthias GACIARZ. Je participerai également aux évaluations dès que nous aurons les données.

[Proj.5] **Convention avec la DSCR. « Modèle et outil de gestion temps réel des crises ».**

C'est une action de recherche qui a pour objectif de développer un modèle de gestion temps réel des crises. Contrairement aux méthodes existantes consistant à utiliser des fiches réflexes et des Plans de Gestion de Trafic (PGT), le projet proposait de faire évoluer les méthodes de gestion des crises. Il s'agit d'élaborer un outil de gestion permettant d'effectuer, en temps réel, un choix optimal des mesures de gestion à adopter, et aussi d'adapter la réponse à l'évolution de la situation.

Collaboration interne: J.P. Lebacque, H. Haj-Salem, X. Louis, B. Schnetzler, Y. Askoura.

J'ai participé au travail bibliographique de cette action et effectué un recensement des pratiques en matière de gestion de crise. J'ai fait profiter l'équipe de mon expertise acquise principalement grâce à ma participation à la PFI de l'INRETS SSTT (Sécurité et Sureté des Transports Terrestres).

[Proj.6] Projet SITP-VP : Analyse et Modélisation des fonctions de gestions conjointes des modes VP et TC.

Il s'agit d'identifier les domaines clés qui contribuent de façon significative à la mise en œuvre de fonctions intégrées de la gestion conjointe des deux modes. De proposer par la suite sur la base des fonctions identifiées, des modèles conceptuels de données des principales entités.

Collaboration interne: Gérard Scemama, Olivier Carles

Dans ce projet, j'ai réalisé l'état de l'art des différents systèmes, suivi de près le développement du model conceptuel des données multimodal qui forme le noyau de la plate-forme Claire-Siti et participer aux divers réunions et tâches inhérentes au projet.

[Proj.7] Projet européen "TRACKSS : Technologies for Road Advanced Cooperative Knowledge Sharing Sensors". 6ème PCRD, 2006-2008.

Projet du 6^{ème} PCRD Société de l'Information, appel « eSafety – Co-operative Systems for Road Transport ». Le projet portait sur le développement de capteurs innovants, au sol ou embarqués, et sur leur intégration dans une architecture communicante intégrée comprenant des outils de fusion de données multi-sources ; parmi les partenaires figuraient ETRA (ES) (leader), Moviquity (ES), University of Newcastle (UK), DLR (DE), Citilog (FR) et INRETS (FR). L'équipe du GRETIA était impliquée dans deux actions de recherche ; la première, portée par Citilog, concernait la détection et le suivi des bus par capteur vidéo. La seconde concernait la détection des traversées piétonnes, en partenariat avec Citilog, Moviquity et Etra.

Collaboration interne: Florence Boillot, Sophie Midenet, Laurence Boudet (CDD)

J'ai participé aux diverses tâches afférentes à ce projet : aspect scientifique, réunions, déplacements, relecture de rapports, etc.

[Proj.8] Réseau d'excellence "NEARCTIS : A Network of Excellence for Advanced Road cooperative traffic management in the Information Society", du 7^{ème} PCRD, 2007-2011.

NEARCTIS, est un réseau d'excellence piloté par l'IFSTTAR dont la problématique centrale est l'optimisation de la gestion du trafic routier en développant notamment l'utilisation de systèmes coopératifs de transport. Ce n'est pas à proprement parler un programme ou un projet de recherche mais un réseau. L'idée est d'exploiter les potentialités des interactions entre les infrastructures, les véhicules et les conducteurs pour répondre aux enjeux majeurs que sont la sécurité routière, l'environnement, la raréfaction des sources d'énergie fossile et la congestion des infrastructures

Collaboration interne: Le réseau NEARCTIS a impliqué l'ensemble des chercheurs du GRETIA et du LICIT ainsi que de chercheurs d'autres laboratoires comme ESTAS

J'ai participé pour ma part aux différentes activités de ce réseau; j'ai notamment contribué à l'écriture des *deliverables* 7 et 8.

[Proj.9] Convention avec le CENA (1992-1994)

"Etude et développement d'un logiciel d'assistance à l'élaboration d'un réseau de routes aériennes".

Contrairement aux réseaux routiers ou ferroviaires, le réseau des voies aériennes n'est pas figé : une route aérienne est un ensemble de segments passant par des points de repères (balises), au niveau desquels le pilote doit échanger des informations avec le centre de contrôle au sol.

Si ce système a un avantage incontestable du point de vue de la sécurité, il pose des problèmes en termes de capacité : la capacité de l'espace aérien est limitée aux capacités des centres de contrôle au sol.

Puisqu'une automatisation complète du contrôle du réseau aérien n'était pas envisageable, la proposition que j'ai discutée avec le CENA consistait à chercher des moyens pour réduire la charge du contrôleur. Cette charge étant principalement due aux situations conflictuelles des avions, nous nous sommes fixés comme objectif de créer un réseau de voies aériennes "optimal". Ce réseau, d'une part, devrait présenter le "minimum" de situations conflictuelles et, d'autre part, il devrait permettre de respecter les plus courts chemins afin de tenir compte des retards et de la consommation d'énergie.

Collaboration interne : Rémy Fondacci (LICIT)

J'ai été l'initiateur et le porteur de ce projet qui a abouti à l'élaboration du logiciel ARNAR (Assistance in Redesigning Navigation Air Routes).

10. Liste de publications

Article dans revue à comité de lecture répertoriée dans les BDI JCR, Scopus, ERIH, HCRES¹

- [ACL.1] Lakhotia S.; **N. Bhour**i; G.Scemama, A. Pahwa, A. Totla, R. Rao; S. Lassarre; G.Tiwari. "Comparison of two different methods of estimating headways and link speeds from bus-based GPS data" *Public Transport: Planning and Operations* (Submitted). Scopus HI index 18.
- [ACL.2] Mahdavi, H.; **Bhour**i, **N.** and Scemama G.. "Assessment of System Resilience: Robustness, Reliability and Potential Redundancy of Public Transport Operation". *Transportation Research Part A: Policy and Practice*. (Submitted). (5-Year Impact Factor: 3.809)
- [ACL.3] Rossi, M. A., **N. Bhour**i, A. J. Rubiales, P.A. Lotito. A constrained filtering algorithm for freeway traffic state estimation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics* (Impact Factor: 1.565, 2015), en revision.
- [ACL.4] **Bhour**i, **N.**, M. Aron, H. Haj-Salem, A Data Driven Approach For Estimating The Fundamental Diagram. *PROMET - Traffic&Transportation (Scopus HI.10)*, Submitted
- [ACL.5] Gaciarz, M., S. Aknine, H. Vu and **N. Bhour**i, A Continuous Negotiation Based Model for Traffic Regulation at an Intersection. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* (IJACSA). Submitted
- [ACL.6] **Bhour**i, **N.**, M. Aron, JP. Lebacque and H. Haj-Salem. Effectiveness of Travel Time Reliability Indicators In the Light of the Assessment of Dynamic Managed Lanes Strategy. *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*. Taylor & Francis. 2017/05/09. Vol, 0 N15 Pages 1-15 <http://dx.doi.org/10.1080/15472450.2017.1327815>. (Impact Factor: 1.565, 2015)
- [ACL.7] **Bhour**i, **N.**, M. Aron, G. Scemama, Travel Time Reliability With and Without the Dynamic Use of the Hard Shoulder: Field Test From a French Motorway. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, Volume 3, Issue 6, December 2016, Pages 520-530, ISSN 2095-7564. (SCOPUS, HI.17, Impact Factor: 0.33 RG).
- [ACL.8] **N. Bhour**i and N. Farhi, "Towards Efficient and Reliable Transportation Systems". *Transportation research. Part C, Emerging technologies*, Elsevier, 2014, 47 (1), pp 1-2. Journal 5-Year Impact Factor: 3.631
- [ACL.9] **Bhour**i **N.**, F.J. Mayoranno, P.A Lotito, H. Haj-Salem; JP. Lebacque" *Public Transport Priority for Multimodal Urban Traffic Control"*. *Cybernetics and Information Technologies. Journal of Cybernetics and information Technologies*. Volume 15, Issue 5, Pages 17–36, ISSN 1314-4081, DOI: [10.1515/cait-2015-0014](https://doi.org/10.1515/cait-2015-0014), April 2015. (Scopus HI.5)
- [ACL.10] **Bhour**i **N.**, H. Haj-Salem and J. Kauppila, Isolated versus Coordinated Ramp metering: Field Evaluation Results of Travel Time Reliability and Traffic Impact, *Transportation Research Part C*. Novembre 2011. (JCR IF, 3,075),

- [ACL.11] **Bhourri N.** and Kauppila, J. "Managing Highways for Better Reliability – Assessing Reliability Benefits of Ramp Metering". *Transportation Research Record, Journal of the Transp. Research Board* N°2229. Pp1-7. DOI : 10.3141 /2229-01. 2011. (JCR IF, 0.778),
- [ACL.12] **Bhourri, N.**, Boillot, F, Vinant P, Régulation multimodale du trafic routier et des transports en commun de surface. Une classification des méthodes. *Revue RTS* n° 98 Janvier-Mars 2008. (SCOPUS, H.I8)
- [ACL.13] **Bhourri, N.** "Comparaison entre deux stratégies de contrôle d'accès appliquées au Boulevard Périphérique de Paris". *Revue Recherche - Transports - Sécurité* n°28, décembre 1990. (SCOPUS, HI.8)
- [ACL.14] **Bhourri, N.**, H. Haj-Salem, M. Papageorgiou et J.M. Blosseville "Estimation of traffic density on motorways". *Traffic Engineering + Control*, pp. 579-583, novembre 1988. (SCOPUS, HI.14)

Article dans revue à comité de lecture non répertoriée dans les BDI JCR, Scopus, ERIH

- [ACLN.1] Rossi, M. A., **N. Bhourri**, P.A. Lotito, A. J. Rubiales. Nonlinear estimation methods for highway traffic estimation with connected vehicles. *Transportation Research Procedia* (accepted).
- [ACLN.2] Rossi, M. A., **N. Bhourri**, A. J. Rubiales, P.A. Lotito. A nonlinear algorithm for traffic estimation with state constraints. *Transportation Research Procedia*. Edited by Domokos Esztergár-Kiss, Tamás Mátrai, János Tóth, István Varga. Volume 27, Pages 600-608 (2017).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517310256>
- [ACLN.3] Balbo, F., **N. Bhourri** and S. Pinson. Bimodal traffic regulation system: A multi-agent approach. *Web Intelligence and Agent Systems: An International Journal (WIAS)*, 2016, 14 (2), pp. 139-151.
- [ACLN.4] Guessous, Y., Aron, M., **Bhourri, N.**, Cohen, S. Estimating Travel Time Distribution under Different Traffic Conditions. In *Transportation Research Procedia*. Edited by Francisco G. Benitez, Riccardo Rossi. Volume 3, 2014, Pages 339-348.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235214651400177X>
- [ACLN.5] **Bhourri N.**, Aron M., Kauppila J. (2012). Relevance of Travel Time Reliability Indicators A Managed Lanes Case Study. In *Procedia Social and Behavioral Science*. Edited by Vincent Aguiléra, Neila Bhourri, Nadir Farhi, Fabien Laurent, Régine Seidowsky. Vol 54, 450-459 doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.763
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812042255>
- [ACLN.6] Tlig, M. and **Bhourri, N.**, "A Multi-Agent System to Urban Traffic and Buses Regularity Control. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Volume 20, 2011, Pages 896-905.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.098>
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042811014789>.
- [ACLN.7] **Bhourri, N.**, F. Balbo, S. Pinson. *An Agent-Based Computational Approach for Urban Traffic Regulation*, *Progress in Artificial Intelligence* 1(2), pages 139-147, Springer-Verlag, 2012.
- [ACLN.8] **Bhourri, N.**, Touazi, D. Commande prédictive à base de modèle pour le trafic urbain bi-modal. *Revue E-STA, Sciences et Technologies de l'Automatique*. Volume 6, 2009. Numéro Spécial CIFA 2008. ISSN: 1954-3522. <http://www.e-sta.see.asso.fr>.

Direction d'ouvrage

- [DO.1] **N. Bhour**i and N. Farhi, Editeur du numéro spécial de "Transportation Research Part C: Emerging Technologies". Special Issue: Towards Efficient and Reliable Transportation Systems. Volume 47, Part 1 (2014). Journal 5-Year Impact Factor: 3.631.
- [DO.2] V. Aguilera, **N. Bhour**i, N.Farhi, F. Leurent et R. Seidowsky. Proceedings of EWGT2012 - 15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation Paris, France, 10-13 septembre - Procedia Social and Behavioral Sciences, Vol. 54, Elsevier, pp.Vol. 54 1-1396, 2012
- [DO.3] **N. Bhour**i, J.C. Rault. "Epée de chevet". Editorial. Revue Génie Logiciel, le Magazine de l'Ingénierie du Logiciel et des Systèmes. Numéro 75, spécial "Ingénierie de systèmes, normes: les cas d'utilisation Automatique & Transports". Décembre 2005.
- [DO.4] **N. Bhour**i, F. Boillot et F. Leurent, Proceedings of the 2nd EWGT. Proceedings du Séminaire EWGT (Association des sociétés de Recherche opérationnelle Européennes dans IFORS) à Paris les 15-17 septembre 1993. Actes INRETS 1994.

Ouvrage scientifique ou chapitre d'ouvrages

- [OS2.1] Aron, M., R. Billot, **N. Bhour**i, N. EL Faouzi, R. Seidowsky; Traffic indicators, accidents and rain: some relationships calibrated on a French urban motorway network. *Advanced concepts, methodologies and technologies for transportation and logistics*". Springer Series "Advance in Intelligent Systems and Computing". Accepted.
- [OS2.2] Haj Salem, H., N. Farhi, J. P. Lebacque, **N. Bhour**i; Development of Coordinated Ramp-Metering based on Multi-Objective Nonlinear Optimization Technique: traffic and safety. *Advanced concepts, methodologies and technologies for transportation and logistics*". Springer Series "Advance in Intelligent Systems and Computing". Accepted
- [OS2.3] **Bhour**i, **N.**, section « 5.5. Les systèmes de priorité aux feux pour les tramways » du "Chapitre 5. Interfaces voie-véhicule, sites propres et exploitation" "*Innovations dans les transports guidés urbains et régionaux (Traité Systèmes Automatisés - IC2)*", ISBN 978-2-7462-2974-7, Hermès-Lavoisier, octobre 2010: p.238-244.
- [OS2.4] **Bhour**i, **N.**, Commande d'un système de trafic autoroutier. Application au Boulevard Périphérique de Paris. Thèse en Automatique. Université Paris XI-Orsay. Soutenue le 08 mars 1991.

Congrès international avec actes

- [ACT.1] Melakhsou, A., **Bhouri, N.**, S. M. H. Mahdavi, Haj-Salem, H., Scemama G.; Gini Index for headways and travel time regularity measurement. " 95th TRB, Janvier 2019, Washington, D.C. (submitted).
- [ACT.2] Khelf M., Boukebbab S., **Bhouri N.** and Boulahlib M. S.. Tram Service Quality and Its Impact On the Passengers' Modal Choice in Constantine City- Algeria. The 18th International Multi-Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication", Riga, Latvia 17-20 October 2018. Lituanie
- [ACT.3] Khelf Mouloud, Boukebbab Salim, **Bhouri Neila** and Boulahlib Mohamed Salah. Analysis of the Tram Operation and Its Impact On the Traffic Congestion. The 18th International Multi-Conference "Reliability and Statistics in Transportation and Communication", Riga, Lituanie. 17-20 October 2018.
- [ACT.4] Rossi, M. A., **N. Bhouri**, P.A. Lotito, A. J. Rubiales. Nonlinear estimation methods for highway traffic estimation with connected vehicles. 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17-19 September 2018, Braunschweig, Germany.
- [ACT.5] Rizzo, M. A; **Bhouri, N.** ; Lotito, P. A. and Rubiales, A.J. "A nonlinear algorithm for traffic estimation with state constraints", 20th, EWGT 2017. Budapest, Hungary - 4-6 September, 2017
- [ACT.6] **Bhouri, N.**, Aron, M., Scemama G.; "Gini Index for Evaluating Bus Reliability Performances for Operators and Riders". Transportation Research Board, 95th TRB annual meeting. 10–14, 2016, Washington D.C.
- [ACT.7] Atmani, D., **N. Bhouri**, F. Galatioto, P. Franco, J.P. Lebacque, H. Haj Salem, M. Bell « Towards autonomic transport systems in a multi-modal environment ». ITS2015, 5 - 9 Octobre 2015 Bordeaux, France.
- [ACT.8] Atmani, D. J.-P. Lebacque, **N. Bhouri**, H. Haj-Salem. « Multi agent dynamic traffic assignment on guided vehicles », 1st International conference on Transportation and Logistics (ICTL 2015), May 13-14, 2015 Sousse, Tunisia.
- [ACT.9] Gaciarz, M., S. Aknine, **N. Bhouri**: Constraint-based negotiation model for traffic regulation. 2015 International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT 2015), 6-9 December 2015.
- [ACT.10] Atmani, D., F. Galatioto, P., **N. Bhouri**, Franco, J.P. Lebacque, H. Haj Salem, M. Bell "Towards the introduction of an autonomous transportation line in a multimodal transportation system". ARTS ECR.27-28 Mai 2015. La Valetta, Malta. (Price of best paper, ex aequo)
- [ACT.11] Campisi, T., **N. Bhouri**, G. Tesoriere. Environmental Aspect on Road Network: A Mesoscopic Approach to Define CO2 and NOX Concentration. ARTS ECR Conference. 27th-28th May 2015 La Valetta, Malta.
- [ACT.12] Gaciarz, M., **N. Bhouri**, S. Aknine: Continuous Negotiation for a Vehicle-Regulated Intersection. Autonomic Road Transport Support Systems Early Career Researcher Conference. ARTS ECR.27-28 Mai 2015. La Valetta, Malta (Price of best paper, ex aequo)
- [ACT.13] Matthis G., S. Aknine, **N. Bhouri**: Automated Negotiation for Traffic Regulation. International Workshop on Collaborative Agents Research & Development (CARE 2015), 4 May 2015.

- [ACT.14] Gaciarz, M., S. Aknine, **N. Bhourri**: A continuous Negotiation based model for traffic regulation at an intersection. Proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2015), 4-8 May 2015.
- [ACT.15] **Bhourri, N.**, Aron, M. Isolating Different Factors Affecting Travel Time Reliability in an Observational Before/After Study, EWGT2014, 2-4 juillet 2014, Sevilla, Spain.
- [ACT.16] Matthis G., S. Aknine, **N. Bhourri**: A coalition-based approach for cooperative urban traffic regulation. European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2013), 12-13 December 2013.
- [ACT.17] Atmani, D., J.P. Lebacque, **N. Bhourri**, H. Haj Salem, "A simulation-based model for dynamic traffic assignment on guided vehicles" 12th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2014). 22-28 September 2014, Rhodes, Greece.
- [ACT.18] Aron M., **Bhourri N.** and Guessous Y.. "Estimating Travel Time Distribution for Reliability Analysis". Transport Research Arena,14-17 Apr 2014 Paris La Défense (France).
- [ACT.19] Guessous, Y., Aron, M., **Bhourri, N.**, Cohen, S. (2014). Estimating Travel Time Distribution Under Different Traffic Conditions, EWGT2014, Sevilla, Spain.
- [ACT.20] Atmani D., Lebacque J.P, **Bhourri N.**, Haj-Salem H. ; "Dynamic assignment with user information in multimodal networks » ; EWGT2014, 2-4 July 2014, Seville, Spain.
- [ACT.21] **Bhourri, N.**, Aron, M. (2013). Reliability Benefits of Active Traffic Management: A Managed Lanes Case in a French Urban Motorway. Transportation Research Board, 92ndTRB annual meeting paper #13-2531, Washington DC , USA.
- [ACT.22] **Bhourri, N.**, Aron, M ., Chagnaud, V., Papon, F. (2013). Reliability assessment of dynamic use of the hard shoulder field test from a French motorway. 13ème WCTR, Rio de Janeiro, Brésil. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00852724>
- [ACT.23] **Bhourri N.**, Aron M., Kauppila J. (2012). Relevance of Travel Time Reliability Indicators A Managed Lanes Casez Study. EWGT 2012, 15th meeting of the Euro Working Group on Transportation, Paris. Septembre 2012. http://www.lvmt.fr/ewgt2012/compendium_97.pdf
- [ACT.24] Tlig, M. and **Bhourri, N.**, "A Multi-Agent System to Urban Traffic and Buses Regularity Control. 14th Meeting of the EURO Working Group on Transportation (EWGT). Poznan, Poland, on September 6 - 9, 2011
- [ACT.25] **Bhourri, N.**, Balbo, F., S. Pinson et M. Tlig. Collaborative agents for modelling traffic regulation systems, In Proceedings Intelligent Agent Technology (IAT 2011), pages 7-13, 2011. 22-27th August.
- [ACT.26] **Bhourri, N.**, F. Balbo, S. Pinson. Towards Urban Traffic Regulation Using a Multi-Agent System, In Proceedings 9th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS'11), pages 179-188, 2011. 28-30th March.
- [ACT.27] **Bhourri N.** and Kauppila, J."Managing Highways for Better Reliability – Assessing Reliability Benefits of Ramp Metering" 90th TRB, Janvier 2011, Washington, D.C.
- [ACT.28] **Bhourri, N.**, Balbo, F. et S. Pinson 2010. A Multi-Agent System to Regulate Bimodal Urban Traffic. 8th European Workshop on Multi-Agent Systems. EUMAS, Paris, France, 16-17 December 2010.
- [ACT.29] **Bhourri, N.**, S. Haciane and F. Balbo, 2010. A Multi-Agent System to Regulate Urban Traffic: Private Vehicles and Public Transport. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. ITSC 2010, Madeira Island, Portugal. pp 1575-1581.

- [ACT.30] **Bhouri, N.** et S. Haciane, 2010. Régulation du trafic urbain avec priorité aux transports en commun à l'aide d'un système multi-agents. MOSIM'10 - 10 au 12 mai 2010 - Hammamet – Tunisie.
- [ACT.31] Haj Salem H., Mammam S., **Bhouri N.** « Isolated VS coordinated ramp metering strategies: Field evaluation results in France », EWGT2009, 23 – 26 Sept, 2009, Padua , Italy.
- [ACT.32] **Bhouri, N.**, H. Haj-Salem, “Motorway Ramp Metering as a tool for improving the travel time reliability”, 13th European Working Group in Transportation Conference (EWGT), Padua, Italy, 23-25 september 2009
- [ACT.33] **Bhouri, N.**, Haj-Salem, H. “Improving Travel Time Reliability Using Ramp Metering: Field Assessment results on A6W Motorway in Paris”, 12th IFAC Symposium on Control of Transportation Systems. California, September 2-4, 2009. pp 627-632.
- [ACT.34] Kachroudi S., **Bhouri, N.** “A multimodal traffic responsive strategy using particle swarm optimization”, 12th IFAC Symposium on Control of Transportation Systems. California, September 2-4, 2009. Pp 531-537.
- [ACT.35] **Bhouri, N.**, “Constrained optimal control strategy for multimodal urban traffic network”, IFAC Workshop on Control Applications of Optimization (CAO'09), 6-8 May, 2009 Jyväskylä, Finland. 7 pages.
- [ACT.36] Kachroudi S., **Bhouri N.**, "A multimodal modal for an urban traffic control policy". 17th IFAC World Congress Seoul - Corée, 6-11 juil 2008. pp 13070-13078.
- [ACT.37] Kachroudi S., **Bhouri N.**, Mammam S., Scamama G. « Modèle de prédiction semi-macroscopique pour les véhicules de transport en commun en milieu urbain CIFA : Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Bucarest-Roumanie 3-5 septembre 2008
- [ACT.38] **Bhouri N.**, Touazi D., «Commande prédictive à base de modèle pour le trafic urbain bi-modal. CIFA : Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Bucarest-Roumanie 3-5 septembre 2008.
- [ACT.39] Kachroudi S., **Bhouri N.**, « Communication interprocessus entre Dynasim et Scilab pour l'évaluation d'une stratégie de régulation du trafic urbain », Congrès International ATEC-ITS France, Issy-les-Moulineaux (France), Janvier 2007.
- [ACT.40] Farhi N., **Bhouri N.**, Lotito P., « Regulation of the bimodal traffic », 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. Delft - The Netherlands. August 29-31, 2006.
- [ACT.41] **Bhouri N.**, Lotito P., «Régulation du trafic urbain multimodal avec priorité pour les transports en commun», 6^{ème} Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'06. Rabat – Maroc. 3-5 avril 2006.
- [ACT.42] **Bhouri, N.**, Lotito P., 2005. “An intermodal traffic control strategy for private vehicle and public transport”. 10th Euro Working Group on Transportation, Poznan, Poland, pp423-428.
- [ACT.43] **Bhouri, N.** et G. Scémama, "*Intermodalité : bilan et perspective des systèmes informatiques d'information*", Congrès de l'ATEC, 23-24 janvier 2002.
- [ACT.44] Scémama, G. et **N. Bhouri**, "*l'opportunité d'information mutuelle VP et TC : Synopsis du projet SITP-VP*", PREDIT, La Défense, février 2001.
- [ACT.45] **Bhouri, N.** "*Une stratégie du contrôle d'accès autoroutier fondée sur la théorie de l'optimisation*", ^{3ème} Colloque Maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, pp. 249-254, 26-29 novembre 1991, Tunis, Tunisie.

- [ACT.46] **Bhouri, N.** et M. Papageorgiou "*Application of control theory to regulate traffic flow on periurban ringways*" ATT in Transportation Engineering, pp. 177-182, août 1991, Minneapolis, U.S.A.
- [ACT.47] **Bhouri, N.**, M. Papageorgiou et J.M. Blosseville "*Optimal control of traffic flow on periurban ringways with an application to the Boulevard Périphérique in Paris*" IFAC, 11th World Congress, 13-17 août 1990, Tallinn, URSS.
- [ACT.48] M. Papageorgiou, H. Haj-Salem, J.M. Blosseville et **N. Bhouri** "*Modelling and real time control of traffic flow on the Boulevard Périphérique in Paris*" IFAC/IFIP/IFORS International Symposium CCCT'89, septembre 1989, Paris.
- [ACT.49] **Bhouri, N.**, H. Haj-Salem, M. Papageorgiou et J.M. Blosseville "*Estimation of traffic density on motorways using presence detector measurements*". IFAC/IFIP/IFORS International Symposium AIPAC'89, juillet 1989, Nancy.
- [ACT.50] **Bhouri, N.**, J.M. Blosseville et M. Papageorgiou "*Simulation et visualisation graphique du trafic*" Conférence internationale et exposition sur l'informatique graphique pour la défense, l'administration et les grands projets, 13-16 juin 1989, Paris.

Congrès international sans actes

- [COM.1] Bimodal Traffic Control: Public Transport and Private Vehicles. 1st Symposium on "Management of Future motorway and urban Traffic Systems" (MFTS2016). Chania, June 2016 (**conférence invitée mais pas au sens de frais de voyages offerts**)
- [COM.2] L'indice de Gini pour évaluer la régularité d'une ligne de bus à partir des données issues de l'Open Data ». ». ATEC_ ITS France 26-27 janvier 2016. Montrouge. France.
- [COM.3] Discours d'ouverture, en tant qu'organisatrice, de la 15^{ème} conférence EWGT. Marne La Vallée, le 12 septembre 2012.
- [COM.4] Discours de clôture et synthèse, en tant qu'organisatrice de la 15^{ème} conférence EWGT. Marne La Vallée, le 14 septembre 2012
- [COM.5] Panel d'indicateurs de régularité pour les Bus à Haut Niveau de Service. ATEC_ ITS France, 02-03 février 2011. Paris.
- [COM.6] CLAIRE-SITI : Système Intelligent référentiel pour le Transport Intermodal de voyageurs. Application à la régulation des BHNS. Forum Systèmes et Logiciels pour les NTIC dans le Transport - XVIème session. Avril 2010 Sousse-Tunisie.
- [COM.7] La fiabilité des réseaux de transport de surface : application au contrôle d'accès autoroutiers / transposition aux transports guidés et au BHNS. PFI ITGUR (Plate-forme intégratrice Innovations dans les transports guidés urbains et régionaux). Marne La Vallée, décembre 2009.
- [COM.8] La fiabilité des réseaux de transport de surface : exemple d'application en contrôle d'accès, Congrès international ATEC-ITS, 4-5 février 2009, Versailles, France.
- [COM.9] Commande optimale du trafic sur un réseau urbain. PFI TISIC : Traitement de l'Information, Signal, Image, Connaissance. Séminaire n°6 « Optimisation discrète » 19/09/2006. FIAP – Paris.

- [COM.10] Intermodalité dans les modèles de planification du trafic urbain. Groupe de travail « Modèles Multimodaux ». INRETS, le 07 février 2002.
- [COM.11] Les modèles multimodaux : du stratégique vers l'opérationnel. Séminaire interne du GRETIA Saint-Malo, juillet 2001.
- [COM.12] Méthodes de suivi et d'évaluations des PDU. Séminaire interne du GRETIA. Saint-Malo. Juillet 2001.
- [COM.13] Nouveaux systèmes de gestion de la multimodalité. Groupe ITS France "Information multimodale en agglomération". Ville de Paris, juin 2001
- [COM.14] Problématiques des perturbations dans les systèmes multimodaux. Séminaire interne du GRETIA. Le Pornichet. France. Juin 2000)
- [COM.15] Modélisation du trafic : exemples de modèles du trafic urbain et autoroutier. Séminaire au département Génie Industriel de l'Ecole National d'Ingénieur de Tunis. Tunisie, mars 1996.
- [COM.16] Méthodes et moyens usuels pour la régulation du trafic urbain et autoroutier. Séminaire à l'Académie Navale. Menzel Bourguiba, Tunisie, avril 1995.
- [COM.17] The shortest path in an air routes network, with respect to the air traffic constraints. 1st Working Group on Urban Traffic and Transportation, 3-5 octobre 1992, Landshut, Allemagne.

Conférences invitées

- [INV.1] Tutorial of « Eighth International Workshop on Agents in Traffic and Transportation ». Held at the 13th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2014), May 5-6, 2014, Paris, France.
- [INV.2] «Systèmes de transport intelligents et multimodalité » Conférence Internationale en Transport et Logistique JPTL2007. 21 et 22 Novembre 2007. Sousse-Tunisie.
- [INV.3] «Systèmes de transport intelligents : état de la recherche » une demi-journée, « Recherche et Transport » à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sousse ENISO, Février 2008. Sousse-Tunisie.

Communication par affiche dans un congrès international ou national

- [AFF.1] Bhourri N., G. Scemama, S. Lassarre, "Indicateurs de fiabilité du temps de parcours pour le transport en commun". Poster et démonstration du logiciel, animation du stand IFSTTAR lors de la conférence ITS ATEC EXPO 2015.
- [AFF.2] Borg D. L., Bhourri N., Scerri K.. A Cooperative Traffic Control Strategy. Poster, "Autonomic Road Transport Systems" Final Conference. 6-7 October 2015, Bordeaux.
- [AFF.3] Campisi T., Bhourri N., Tesoriere. G.; Comparative Results of Environmental Aspects Obtained by a Micro and a Mesoscopic Approaches for Urban Road Networks. Poster, "Autonomic Road Transport Systems" Final Conference. 6-7 October 2015, Bordeaux.
- [AFF.4] Franco P., Galatioto F., Bhourri N., Bell M. "Development of Self Awareness Principles for a Public Transport Decision Support System". Poster, "Autonomic Road Transport Systems" Final Conference. 6-7 October 2015, Bordeaux.

[AFF.5] Bhouri N. « CLAIRE-SITI : Système Intelligent référentiel pour le Transport Intermodal de voyageurs ». Animation du stand Inrets et démonstration du logiciel lors de la conférence ITS ATEC EXPO 2010.

Rapport de recherche

- [Rapp.1] Bhouri N & Tiwari G.; INDIRA_B (INDicators for Reliability and Variability of Bus Systems); State of progress. CEFIPRA. 10 pages. May 2018.
- [Rapp.2] Lakhotia S., N. Bhouri, P. K. Tiwari, G. Tiwari, R.K. Rao, G. scemama, S.Lassarre; "Cockpit Development: Key Performance Indicators for Bus system". Deliverable 3, Indira_B, project. 13 pages. February 2018.
- [Rapp.3] Lakhotia S., N. Bhouri, A. Melakhsou G. Tiwari, R.K. Rao, G. scemama, S.Lassarre ; "Reliability Key Performance Indicator Modelling for the Bus system". Deliverable 2, Indira_B, project. 40 pages. August 2017.
- [Rapp.4] Tiwari G. & Bhouri N, INDIRA_B (INDicators for Reliability and Variability of Bus Systems) ; State of progress. CEFIPRA. Octobre 2017. 10 pages.
- [Rapp.5] Haj Salem H., H., N. Farhi, C. Nguyen Van Phu, N. Bhouri "Stratégie de Coordination des accès : COORDIN". Rapport de convention DIRIF. 17 pages. Juillet 2017
- [Rapp.6] Bhouri N & Tiwari G. INDIRA_B (INDicators for Reliability and Variability of Bus Systems) ; State of progress. CEFIPRA. May 2017. 10 pages.
- [Rapp.7] N. Bhouri, S. Lakhotia, P. K. Tiwari, G. Tiwari, R.K. Rao, G. scemama, S.Lassarre, "Building Interface between Claire-SITI and AVL/ETM DIMTS platforms ". Deliverable 1, Indira_B, project. 17 pages. February 2017.
- [Rapp.8] Tiwari G. & Bhouri N, INDIRA_B (INDicators for Reliability and Variability of Bus Systems). State of progress. CEFIPRA. Octobre 2016. 10 pages.
- [Rapp.9] Haj Salem, H., N. Farhi, C. Nguyen Van Phu, N. Bhouri, "Ajustement automatique et en temps réel de la consigne pour ALINEA ». Rapport convention DIRIF. 27 pages. Avril 2016.
- [Rapp.10] Rapports pour le Deliverable 8 du réseau d'excellence NEARCTIS :
- Zargayouna M., Bhouri N, Midenet S., Scemama G, Claire: A Congestion Management System For Very Large Road Networks, Livrable D8 du réseau d'Excellence NEARCTIS, 3 pages, mars 2010.
 - Zargayouna M., Midenet S., Bhouri N, Scemama G, ClaireSiti: A Multimodal System for Surface Transport Networks Management and Traveller Information. Livrable D8 du réseau d'Excellence NEARCTIS, 4 pages, mars 2010.
- [Rapp.11] Rapports pour le Deliverable 7 du réseau d'excellence NEARCTIS :
- Bhouri N, "Netprior: Bi-modal Urban Signal Traffic Control". Fiche de description, Livrable D7 du réseau d'Excellence NEARCTIS. 2 pages Mai 2009.
 - Scemama, G. and Bhouri N, "CLAIRE: Congestion Control system". Livrable D7 du réseau - d'Excellence NEARCTIS. 3 pages, Mai 2009.
 - Scemama, G., Bhouri N. Midenet S. "ClaireSiti: a multimodal system for surface transport networks management and traveler information. Livrable D7 du réseau d'Excellence NEARCTIS. 2 pages, Mai 2009.
- [Rapp.12] Lebacque, JP., H. Haj-Salem, X. Louis, B. Schnetzler, N. Bhouri, Y. Askoura, « Outil d'évaluation et d'exploitation des réseaux : simulation pour la gestion des voies ». Rapport de Convention. INRETS/DSCR N° C06-02-T4. 115 pages. Décembre 2008.
- [Rapp.13] Lebacque, JP., H. Haj-Salem, X. Louis, B. Schnetzler, N. Bhouri, Y. Askoura, « Outil d'évaluation et d'exploitation des réseaux : simulation pour la gestion des voies » . Rapport de Convention. INRETS/DSCR N° C06-02-T4. 115 pages. Décembre 2008.

- [Rapp.14] Boudet L., Boillot F., Midenet S., Bhourri N. et al. "D3.1 Knowledge Sharing Sensors in Infrastructures" Deliverable D3.1, TRACKSS European project, November 2007.
- [Rapp.15] Bhourri, N. "ITS applications in France as a tool for mitigating reliability of surface transport" Working Group on Surface Transport Network: Improving Reliability and Levels of Service.. ITF/OECD/JTRC. 10 pages Novembre 2007.
- [Rapp.16] Waard, J Warffemius P., Vaze, P., Bhourri, N. "Routes to better reliability: supply side policy options" Working Group on Surface Transport Network: Improving Reliability and Levels of Service. ITF/OECD/JTRC. 8 pages. Avril 2008.
- [Rapp.17] N. Bhourri, Intermodalité : bilan et perspectives des systèmes informatiques. Rapport de convention avec la DTT, projet SITP-VP. Février 2002.
- [Rapp.18] N. Bhourri, Remy Fondacci. ARNAR : Recherche du plus court chemin avec contrainte sur un réseau de voies aériennes. Rapport de convention INRETS / CENA . Février 1994.

Rapport d'expertise

- [Rapp-ex.1] « *Improving Reliability on Surface Transport Network* » **OCDE/ FIT** (Organisation pour la coopération et le développement économique / Forum international des transports). Rapport 2006-2009.
- [Rapp-ex.2] « Information multi-modale des passagers en situation dégradée » **MEDAD/DGMT** (direction générale de la Mer et des Transports du Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement Durables). 2008-2009.
- [Rapp-ex.3] « Pour un développement de l'information multimodale en agglomération : freins et perspectives » Groupe de Travail **ITS-France**. 2001-2002.

Synthèse des travaux de recherche

Chapitre A : Estimation et calibrage des variables du trafic

1. Préliminaires

Les variables du trafic sont nécessaires pour la surveillance, la modélisation et la régulation du trafic. Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés pour mesurer ces variables. Cependant, en plus des erreurs de mesures inévitables quel que soit le capteur, certaines variables ne sont pas directement mesurables. Par exemple la variable densité de trafic, exprimée en véhicules par kilomètre, est une variable spatiale qui définit l'état du trafic. Cependant les capteurs du type boucle électromagnétique sont situés à un point de la route et ne peuvent mesurer de ce fait directement la densité. Le rôle de l'estimation de l'état est de calculer et compléter, sur la base de certaines variables mesurées directement, toutes les variables de trafic associées à chaque tronçon du réseau de trafic pour un temps donné. L'enjeu est important : d'une part, connaître l'état du système est très utile pour sa régulation et, d'autre part, utiliser un bon observateur permet de réduire le nombre de capteurs à implanter et de réduire ainsi les coûts des installations.

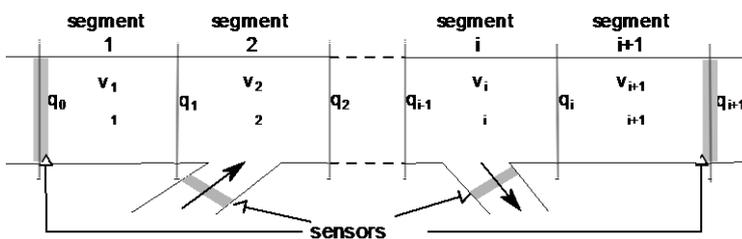


Figure 1: Exemple d'emplacement des capteurs (*sensors*) sur une portion d'autoroute

Je me suis intéressée à la problématique d'estimation de l'état du trafic en premier lors de mon stage de DEA qui a été encadré par mon collègue Habib Haj-Salem¹, et par le professeur Markos Papageorgiou². J'ai repris cette thématique dans deux cadres. Le premier était une recherche exploratoire, en collaboration avec le professeur Pablo Lotito et son équipe³, où l'objectif était d'étudier de nouvelles méthodes permettant une meilleure prise en compte des non linéarités du trafic. Nous avons développé dans ce cadre le filtre « Projected Interval Unscented Kalman Filter ». Le second était une recherche menée avec l'équipe dirigée par Habib Haj-Salem, dans le cadre d'un projet financé par la Direction des Routes Ile-de-France (DIRIF), pour l'implémentation du contrôle d'accès sur soixante-seize rampes du réseau d'autoroute de la région. Dans ce projet, l'objectif de l'estimation de l'état était de proposer une méthode fiable pour estimer en temps réel la consigne pour la stratégie de contrôle d'accès isolé ALINEA.

2. Problématiques de mes recherches

Le recours aux techniques d'estimation et de filtrage apparaît dans la résolution de différents problèmes de trafic - pour estimer les origines-destinations, prédire le trafic ou le nombre de passagers, etc. J'ai choisi quant à moi comme problématique l'estimation des variables de trafic – la finalité en étant la surveillance du trafic ou sa régulation. Je décline cette question en trois niveaux:

¹ Directeur de recherche au laboratoire Grettia, département Cosys à l'Ifsttar

² Aujourd'hui directeur du « Dynamic Systems & Simulation Laboratory » du Technical University of Crete – Chania, Greece

³ Du laboratoire PLADEMA/CONICET de la « National University of Central Buenos Aires », Argentina

- 1- Estimer la densité du trafic sur des sections d'autoroutes à partir de mesures provenant de capteur de type boucles électromagnétiques.
- 2- Suivre la recherche théorique sur les observateurs et appliquer des nouvelles méthodes innovantes afin d'enrichir la recherche dans le domaine du trafic.
- 3- Estimer en temps réel l'état du trafic qui servira comme consigne à une stratégie de régulation du trafic autoroutier.

Je présente succinctement chacun de ces problèmes et donne quelques résultats marquant dans les trois sections suivantes. Je souligne les principaux apports à la recherche sur cette thématique de mes collègues et de moi-même à la cinquième section. J'expose à la sixième section mes perspectives et donne enfin la bibliographie.

3. Estimation de l'état du trafic à partir de capteurs de type boucle

Le filtre de Kalman, simple et étendu, a été appliqué pour l'estimation de l'état du trafic dès la fin des années soixante dans des problèmes de surveillance ou de régulation du trafic, notamment dans des tunnels. Les pionniers dans ce domaine sont sans doute Gazis & Foote [12], Gazis & Knapp [13], Szeto & Gazis, [38], Nahi & Trivedi, [30], suivis d'autres comme Papageorgiou, [32], Cremer [6],[8] et d'autres. Les méthodes présentées dans la littérature diffèrent par les variables d'entrées et/ou de sorties, le modèle utilisé ou les hypothèses. Dans [13], les auteurs ont proposé l'estimation de la densité à partir de données de débit et de vitesse avec un modèle approximant le temps de parcours.[14] [30] [38] ont estimé la densité à partir des mesures de capteurs installés aux deux extrémités de la section et mesurant le débit et la vitesse.

Dans ce travail, j'ai formulé le problème à l'aide d'un filtre de Kalman stationnaire pour l'estimation de la densité sur la base des variables débit et taux d'occupation obtenues à partir de capteurs de type boucle-électromagnétique installés aux deux extrémités des sections. J'ai validé les estimations à partir des données réelles que j'ai obtenues à partir du dépouillement d'un film vidéo du Boulevard Périphérique de Paris. Ce filtre simple était suffisant compte tenu des conditions de la circulation sur la portion étudiée et de l'emplacement des capteurs. J'ai fait des comparaisons avec une méthode de lissage simple et étudié la robustesse du filtre par rapport aux erreurs des données initiales et par rapport aux valeurs du gain du filtre.

3.1 Filtre de Kalman

Le filtre de Kalman est une méthode visant à estimer des paramètres d'un système évoluant dans le temps à partir de mesures bruitées. Sa force est sa capacité de prédiction des paramètres et de rectification des erreurs, non seulement des capteurs, mais aussi du modèle lui-même.

Le Filtre de Kalman et ses variantes sont très utilisés dans le domaine du trafic. En plus, de l'estimation de l'état du trafic qui est l'objet de ce chapitre, ils ont été utilisés pour l'estimation des origines-destinations [2], Cho et al., Zhou et Mahmassani [63], [4], Michael et Rilett [31], Hu et autres [23], Van Der Zijpp [47], Cremer et Keller [7], Okutani et Stephanedes [36]), pour le suivi de localisation (Chiang et al [11], Bétaille et Toledo-Moreo [6], Tu et Kiang [46], Tseng et Feng [45]) et pour l'évaluation (Antonioni et al [1], van Lint [43]).

Pour appliquer le filtre de Kalman, il faut modéliser le système de manière linéaire et considérer que les erreurs sont gaussiennes:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= A_k x_k + B_k u_k + \xi_k \\ y_k &= C_k x_k + D_k u_k + \zeta_k \end{aligned} \quad (\text{A.1})$$

où ξ et ζ sont les vecteurs des erreurs du modèle et des observations que l'on suppose distribuées normalement avec moyenne 0 et matrices de covariance Q et R. Le critère pour avoir l'estimation optimale est de minimiser l'erreur quadratique moyenne. Le filtre de Kalman a deux étapes :

Phase de prédiction,

$$\bar{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k u_k \quad (\text{A.2})$$

$$P_{k+1}^- = A_k P_k A_k^T + Q_k \quad (\text{A.3})$$

Phase de correction,

$$x_{k+1} = \bar{x}_{k+1} + K_{k+1} (z_{k+1} - C_k \bar{x}_{k+1} - D_k u_{k+1}) \quad (\text{A.4})$$

$$P_{k+1} = (I - K_{k+1} C_k) P_{k+1}^- \quad (\text{A.5})$$

où y_k et la mesure au temps k et K_k la matrice du gain de Kalman au temps k qui se calcule comme suit:

$$K_k = P_k C_k^T (C_k P_k C_k^T + R_k)^{-1} H_k = P_k C_k^T (C_k P_k C_k^T + R_k)^{-1} K_k = P_k C_k^T (C_k P_k C_k^T + R_k)^{-1} \quad (\text{A.6})$$

3.2 Application à l'estimation de la densité du trafic

Le problème est d'estimer la densité du trafic sur une section d'autoroute à partir de mesures des débits (Q) et des taux d'occupation (O) provenant de capteurs de type boucle électromagnétique. Les observations, entachées d'erreurs s'écrivent alors :

$$q_k^i = Q_k^i + \eta_k^i \quad (\text{A.7})$$

$$o_k^i = O_k^i + g_k^i$$

La conservation du nombre de véhicules présents sur la section, en tenant compte des entrants et des sortants est exprimée par l'équation suivante:

$$\rho_{k+1}^i = \rho_k^i + \frac{T}{\Delta_i} (q_k^{i-1} - q_k^i) \quad (\text{A.8})$$

ρ^i est la densité de la section i , q^{i-1} (resp. q^i) est le débit entrant (resp. sortant de la section), Δ_i la longueur de la section et T l'intervalle d'échantillonnage temporel.

En utilisant la définition de la vitesse harmonique autour du capteur, nous pouvons facilement démontrer que la densité autour de la station de mesure s'écrit:

$$\rho = 0,01 \sum_{i=1}^m \frac{o^i}{L^i} \quad (\text{A.9})$$

$L^i = (d+l^i)$ étant la somme de la largeur du capteur (d) et de la longueur des véhicules (l^i) que l'on suppose homogène sur la section i . m est le nombre de capteurs de la station. Pour plus d'homogénéité, nous prenons les deux stations de mesures aux deux extrémités de la section. L'équation d'observation devient:

$$\rho = 0,01 \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{o_e^i + o_s^i}{2 \cdot L^i} \right) \quad (\text{A.10})$$

Pour se conformer au formalisme du filtre de Kalman et de ses équations (1 et 2, on peut écrire le modèle sous la forme :

$$\begin{cases} \rho_{k+1}^i = \rho_k^i + u_k^i + \zeta_k^i \\ y_k^i = \rho_k^i + \zeta_k^i \end{cases} \quad (\text{A.11})$$

où

$$u_k^i = \frac{T}{\Delta_i} (q_k^e - q_k^s) \quad ; \quad \rho_k^i = 0,01 \cdot \sum_{i=1}^m \left(\frac{o_e^i + o_s^i}{2L} \right) \quad ; \quad A=B=C=I; \quad D=0$$

J'ai considéré dans ce travail un filtre de Kalman stationnaire. La matrice du gain s'écrit alors en fonction de $\beta = Q/R$

$$K = (\beta + \sqrt{\beta^2 + 4\beta}) / (2 + \beta + \sqrt{\beta^2 + 4\beta}) \quad \text{Où}$$

$$\rho_{k+1} = (1-K)\rho_k + Ky_k u_k \quad (\text{A.12})$$

Comme nous pouvons le voir dans l'équation (A.12), le gain de Kalman $\in [0,1]$ suivant le rapport des erreurs de l'état et des observations. Un β petit veut dire que les erreurs des observations sont beaucoup plus importantes que celles du modèle, K est alors petit et les observations ont peu d'importance par rapport au modèle. En revanche, si β est très grand, $K \approx 1$ et le calcul de la densité (équation(A.12)) ne dépend que des observations.

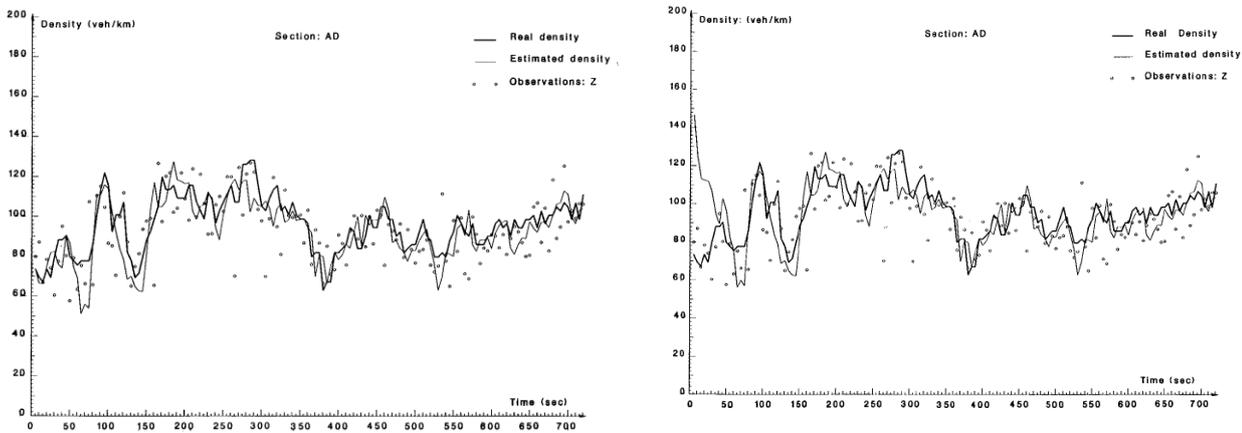


Figure 2: Filtre de Kalman comparé aux données réelles extraites d'un film

Les résultats du Filtre ont été comparés à des données réelles du trafic d'une section de 500 m du Boulevard Périphérique de Paris (BPP), obtenues à partir du dépouillement manuel d'un film vidéo. Durant la période de comparaison, le trafic atteignait la densité critique mais ne rencontrait pas de phénomène de congestion sévère. Les résultats des estimations (Figure 2) montraient une bonne estimation de la densité et la bonne robustesse du filtre de Kalman (figure 2.droite). Si l'état initial est entaché d'erreurs et si l'intervalle d'échantillonnage est plus important (15 secondes au lieu de 10 pour les premiers tests), la variance de l'erreur est proche de la moitié de celle des observations.

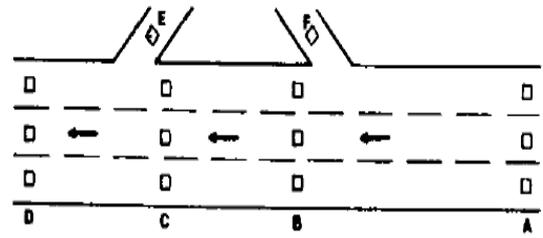
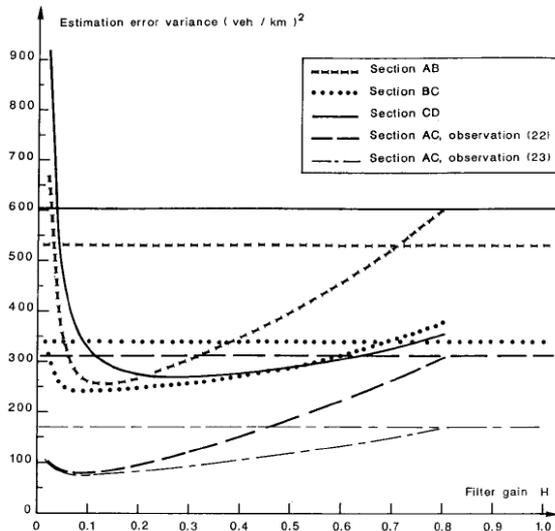


Figure 3: Réseau de 500 m au niveau de l'entrée/sortie de la porte de Brancion du Boulevard Périphérique de Paris

Figure 4 : Variance des erreurs des estimations et d'observations (droites horizontales) en fonction du gain du filtre pour les différentes sections

J'avais également étudié l'impact de la valeur du gain de Kalman sur les estimations (Figure 4). La première observation était que la valeur optimale du gain n'est pas forcément celle calculée par l'équation (A.12). Ceci est certainement dû aux simplifications introduites (stationnarité du système). Pour notre estimation cependant, comme on peut le voir sur la (Figure 4), le filtre n'est pas très sensible à la valeur du gain sur une large partie de ces valeurs (K entre 0,1 et 0,4). La valeur de K choisie est $K = 0.2$ ce qui veut dire que les observations étaient peu fiables et que l'usage du filtre de Kalman se justifiait.

4. Unscented Kalman Filter ou Filtre de Kalman Contraint

L'utilisation d'un filtre de Kalman impose des contraintes (1) de linéarité du modèle et des observations et (2) que les bruits soient gaussiens indépendants, de moyenne nulle, de matrice de covariance connue. Ceci est suffisant comme on l'a vu à la section (3) pour estimer le trafic sur des sections d'autoroutes courtes (longueur inférieure à 2 km) et quand le trafic n'est pas très congestionné.

Cremer [6] et Cremer et Papageorgiou [8] et dans plusieurs autres de leurs publications, ont traité l'estimation de l'état du trafic sur des sections plus longues (de 2 à 4 km). Ils ont proposé un système en boucle fermée, où la densité du trafic et la vitesse moyenne spatiale sont estimées par le modèle de Payne et ont été ajustées pour que le débit et la vitesse coïncident avec les valeurs observées aux points de mesure. Kurjian et al. [22], Kohan and Bortoff [23] et Meier and Wehlan [28] ont également utilisé le modèle de Payne.

Le filtre de Kalman étendu permet de linéariser le système autour des valeurs estimées par le calcul de la matrice de dérivées partielles (le Jacobien). Cependant, contrairement au filtre de Kalman simple, le filtre de Kalman étendu ne donne pas une solution optimale. Le filtre peut diverger, à cause de cette linéarisation, en cas d'erreurs des estimations initiales [18]. Ceci a laissé place aux développements de nouveaux filtres. (Abouaïssa & Iordanova [1] et Majid & Abouaïssa [24] et [25]) proposent un observateur algébrique à mode glissant d'ordre deux dit *super-twisting sliding mode observer* (Stsm). Ce type d'observateur est basé sur la théorie des systèmes à structure variable (SSV). Ces derniers ont

de bonnes propriétés de robustesse vis-à-vis des erreurs paramétriques et des perturbations bornées ainsi qu'aux incertitudes des modèles. Les auteurs comparent leur observateur à l'EKF (voir ci-dessous) et concluent à sa supériorité du point de vue de la performance mais aussi de la stabilité et de la robustesse.

Les filtres particuliers ont été souvent présentés dans la littérature [16] [29]. Ils sont parfois nommés « filtre à échantillonnage séquentiel » ou « échantillonnage Monte Carlo » (Sequential Monte Carlo sampling). Ils se déclinent en plusieurs variantes. [19], [42] ont proposé l'UKF (Unscented Kalman Filter) ; [11] a présenté l'Ensemble Kalman Filter (EnSKF). Dans [34] les auteurs présentent l'EnSKF et l'UKF comme des cas particuliers des filtres particuliers. L'UKF, l'EnSKF comme le filtre de Kalman étendu font l'hypothèse que le bruit est gaussien. L'UKF (Unscented Kalman Filter) est un filtre dans lequel la densité de probabilité est calculée par une transformation non-linéaire. Il utilise une stratégie d'échantillonnage déterministe pour obtenir un nouvel ensemble de vecteurs d'état (les points sigma) à chaque étape de prédiction (voir paragraphe 0). Il a été utilisé dans [17], [29] et [31]. Cependant, la méthode UKF peut ne pas converger lorsque les variables sont contraintes [36]. Nous avons alors proposé une amélioration de l'UKF pour inclure les contraintes. Cette amélioration consiste à projeter les contraintes de la transformation sigma avant de l'appliquer au filtre de Kalman. Je présente dans la suite ce filtre, en commençant par le modèle non-linéaire, par la suite les équations du filtre de Kalman étendu (paragraphe 4.2), l'Unscented transformation ou la transformation sigma est donnée dans le paragraphe 4.3. J'introduis ensuite l'Interval Unscented Kalman Filter (IUUKF) qui permet d'ajouter des contraintes en modifiant les points sigma permettant de tenir compte des contraintes sur le modèle. J'expose dans le paragraphe 4.5 la modification apportée par le Projected Interval Unscented Kalman Filter (PIUUKF) qui permet de tenir compte des contraintes également à l'étape de prédiction. Je donne enfin les principaux résultats.

4.1 Le modèle de trafic

Le modèle adopté ici est le modèle macroscopique non-linéaire très connu METANET, lui-même adapté du modèle de Payne [27]. Le modèle consiste en trois équations :

1 - l'équation de conservation du nombre de véhicules ; dans le cas de l'existence d'une rampe d'entrée (de débit noté $r_i(k)$ section i période k) et de sortie (de débit noté $s_i(k)$), l'équation (A.8) s'écrit :

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \frac{T}{l_i \lambda_i} [q_{i-1}(k) - q_i(k) + r_i(k) - s_i(k)], \quad (\text{A.13})$$

λ_i étant le nombre de voies de la section i .

2- la relation débit-vitesse :

$$q_i(k) = \rho_i(k) v_i(k) \lambda_i. \quad (\text{A.14})$$

3- l'équation de propagation de la vitesse :

$$v_i(k+1) = v_i(k) + \frac{T}{\tau} (V(\rho_i(k)) - v_i(k)) + \frac{T}{l_i} v_i(k) (v_{i-1}(k) - v_i(k)) - \frac{\eta T}{\tau l_i} \frac{\rho_{i+i}(k) - \rho_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa} - \frac{\delta T}{\lambda_i l_i} \frac{r_i(k) v_i(k)}{\rho_i(k) + \kappa}, \quad (\text{A.15})$$

κ [veh / km / lane], τ [h], η [km² / h] et δ sont des paramètres du modèle considérés de mêmes valeurs pour toutes les sections. La fonction $V(\rho)$ est celle du diagramme fondamental, l'équation de May est utilisée comme dans (Bhourri, 1991).

$$V(\rho_i(k)) = v_0 \exp\left(-\frac{1}{a} \left(\frac{\rho_i}{\rho_c}\right)^a\right),$$

ρ_c est la densité critique (voir section 1)

Ces équations peuvent s'écrire sous la forme $x_{k+1} = f_k(x_k, u_k)$, où u_k est le vecteur contenant les débits $[q_0, v_0, r_i, y, s_i]$ à l'instant k . Les observations y_k sont groupées dans l'équation $y_k = h_k(x_k, u_k)$.

4.2 Le filtre de Kalman étendu (EKF)

Dans le filtre de Kalman étendu, les modèles d'évolution et d'observation n'ont pas besoin d'être des fonctions linéaires de l'état mais peuvent à la place être des fonctions différentiables. Les fonctions f et h ne peuvent pas être appliquées directement au calcul de la covariance : une matrice des dérivées partielles, la matrice Jacobienne, est calculée. Ce processus donne une fonction linéaire autour de l'estimation courante.

Phase de prédiction,

$$x_{k+1}^- = f(\hat{x}_k, u_k), \quad (\text{A.16})$$

$$P_{k+1}^- = F_k \hat{P}_k F_k^T + Q_k \quad (\text{A.17})$$

Phase de correction

$$\hat{x}_{k+1} = x_{k+1}^- + K_{k+1} (z_{k+1} - h(x_{k+1}^-)), \quad (\text{A.18})$$

$$\hat{P}_{k+1} = (I - K_{k+1} H_k) P_{k+1}^-, \quad (\text{A.19})$$

où F_k et H_k sont les matrices jacobienne obtenues par linéarisation de f et h autour de \hat{x}_k , et K_k la matrice de gain de Kalman calculé par:

$$K_{k+1} = P_{k+1}^- H_k^T (H_k P_{k+1}^- H_k^T + R_k)^{-1}. \quad (\text{A.20})$$

L'avantage de l'EKF est sa formule récursive pour calculer l'estimation, mais la validité de la méthodologie dépend fortement des fonctions f et h . En fait, les formules de mise à jour et de correction de la matrice de covariance P sont exactes si les fonctions sont linéaires et peuvent être considérées comme de bonnes approximations si ces fonctions sont approximativement linéaires. Ceci peut être expliqué en raison de l'identité $\text{cov}(Ax) = A \text{cov}(x) A^T$ dans le cas linéaire mais qui n'a pas d'équivalent reliant $\text{cov}(x)$ et $\text{cov}(f(x))$ dans le cas non-linéaire.

Une façon de contourner ce problème est d'estimer la covariance au moyen de la transformée appelée "**Unscented Transformation**", le filtre de Kalman résultant est appelé *Unscented Kalman Filter* (UKF) [40].

4.3 Unscented Transformation

Présentée par Julier et Uhlmann [19][20], l'Unscented Transformation permet d'estimer la distribution d'une variable aléatoire $y = f(x)$ à partir de la connaissance de la fonction f et celle de la variable aléatoire x .

Cette transformation consiste à choisir un ensemble de points $\{x_i\}$ connus sous le nom de *points sigma* de telle sorte que leur moyenne et leur covariance coïncide avec la variable aléatoire x . La fonction f est alors appliquée aux points sigma et la moyenne et la covariance de $f(x)$ sont estimées à partir de $\{f(x_i)\}$.

Plus précisément, considérons la variable x de dimension n ayant une espérance $E[x] = \hat{x}$ et une covariance $\text{cov}(x) = P_x$, les $2n+1$ points sigma x_0, x_1, \dots, x_{2n} sont obtenus en utilisant les équations suivantes

$$\begin{aligned} x_0 &= \hat{x}, \\ x_i &= \hat{x} + \gamma_i (\sqrt{P_x})_i, \quad i = 1, \dots, n, \\ x_i &= \hat{x} - \gamma_i (\sqrt{P_x})_{i-n}, \quad i = n+1, \dots, 2n, \end{aligned} \quad (\text{A.21})$$

où $\gamma_i = \sqrt{n + \lambda}$, $\forall i$ et $\lambda = \alpha^2(n + \kappa) - n$.

L'espérance et la covariance sont par la suite calculées:

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} x_i, \\ P_x &= \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [x_i - \bar{x}][x_i - \bar{x}]^T, \end{aligned} \quad (\text{A.22})$$

les paramètres sont donnés par:

$$\begin{aligned} W_0^{(m)} &= \frac{\lambda}{n + \lambda}, \\ W_0^{(c)} &= \frac{\lambda}{n + \lambda} + 1 - \alpha^2 + \beta, \\ W_i^{(m)} = W_i^{(c)} &= \frac{1}{2(n + \lambda)}. \end{aligned} \quad (\text{A.23})$$

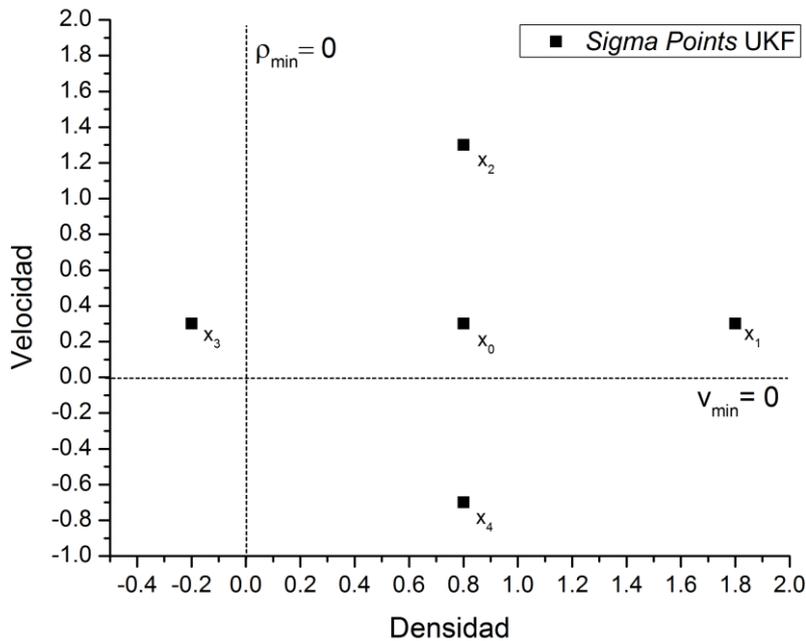


Figure 5 : points sigma donnés par l'UKF

D'après [42] le paramètre α fixe la dispersion des points sigma autour de \bar{x} et prend généralement une valeur dans l'intervalle $(10^{-4}, 1)$. Le paramètre β est utilisé pour tenir compte de la distribution de \bar{x} (pour les distributions gaussiennes $\beta = 2$), κ est habituellement égal à 0.

Pour estimer les statistiques de $f(x)$, les équations données en (18) sont utilisées avec les mêmes poids, mais en appliquant la fonction f aux points sigma, c'est-à-dire en changeant x_i par $f(x_i)$:

$$\begin{aligned} \overline{f(x)} &\approx x_+ = \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(m)} f(x_i), \\ P_{x_+} &\approx \sum_{i=0}^{2n} W_i^{(c)} [f(x_i) - x_+][f(x_i) - x_+]^T. \end{aligned} \tag{A.24}$$

Les points sigma sont dans la matrice X_k et correspondent à l'estimation actuelle plus et moins la racine carrée de la covariance $\sqrt{P_k}$.

4.4 Interval Unscented Kalman Filter (IUKF)

Le calcul des points sigma peut donner lieu à des valeurs négatives de ρ et v (comme sur la Figure 5 pour les points x_3 et x_4). Pour remédier à ce problème, Teixeira et al. [40] ont présenté une méthode appelée Interval Unscented Kalman Filter (IUKF). Cette méthode est une variante de l'Unscented Kalman Filter qui ajoute des contraintes aux points sigma permettant ainsi de résoudre le problème de calcul des équations dynamiques en dehors de leur domaine de validité.

La méthode IUKF suppose que les contraintes sur les variables d'état sont satisfaites :

$$d_{\hat{x}_k} \leq x_{\hat{x}_k} \leq e_{\hat{x}_k} \quad (\text{A.25})$$

où d_k et e_k sont les limites inférieures et supérieures de x_k . Afin d'avoir tous les points sigma à l'intérieur du domaine de validité. γ et W dépendent maintenant du temps. Ils sont calculés :

$$\gamma_k^j = \min_j \Gamma_k^{ij}, \quad i = 1, \dots, n,$$

où la matrice Γ est donnée par l'équation (A.26)

$$\Gamma_{ij}^k \triangleq \left. \sqrt{n+\lambda} - \left(\sqrt{n+\lambda} - S_{ij}^{-1} (e_{i,k} - x_{i,k}) \right) \right|_{S_{ij} > 0} - \left. \left(\sqrt{n+\lambda} - S_{ij}^{-1} (d_{i,k} - x_{i,k}) \right) \right|_{S_{ij} < 0} \quad (\text{A.26})$$

où l'indice $i = 1 \dots n$ correspond à la dimension des variables d'état et $j = 1 \dots 2n$ à celui des points sigma, la matrice $S = \begin{bmatrix} \sqrt{P} & \\ & -\sqrt{P} \end{bmatrix}$ et les poids W affectés aux points sigma sont donnés par (A.27):

$$W_{0,k}^{(m)} = W_{0,k}^{(c)} \triangleq b_k, \quad W_{j,k}^{(m)} = W_{j,k}^{(c)} \triangleq a_k \gamma_{j,k} + b_k, \quad (\text{A.27})$$

Avec :

$$a_k = \frac{2\lambda - 1}{2\tau_k(n + \lambda)}, \quad b_k = \frac{\tau_k - 2\lambda + 1}{2\tau_k(n + \lambda)}, \quad \tau_k = \sum_{j=1}^n \gamma_{j,k} - (2n + 1)\sqrt{n + \lambda}.$$

4.5 Projected Interval Unscented Kalman Filte (PIUKF)

IUKF corrige le problème de domaine de validité pour le modèle, mais l'étape de correction peut donner des résultats non valides qui empêchent le calcul des points sigma à l'itération suivante.

[40] ont également présenté une seconde méthode, appelée Projected Unscented Kalman Filter (PUKF). Cette méthode applique une projection au résultat UKF afin de forcer la valeur estimée à respecter le domaine choisi. Cette approche applique la prédiction et l'étape de correction de la méthode UKF puis obtient l'estimation en résolvant le problème d'optimisation suivant:

$$\hat{x}_{k+1}^P = \underset{d_k \leq x_k \leq e_k}{\operatorname{argmin}} J_2(x_k) \quad \text{où} \quad J_2(x_k) = (\hat{x}_{k+1} - x_k)^T (P_{k+1})^{-1} (\hat{x}_{k+1} - x_k). \quad (\text{A.28})$$

Pour notre cas d'application, ni IUKF ni PUKF ne peuvent être appliqués, car il est possible d'obtenir des valeurs non valides, après la correction pour le IUKF ou après la prédiction pour PUKF. Nous avons alors combiné les deux dans une nouvelle méthode que l'on a appelé "Projected Interval Unscented Kalman Filter" (PIUKF). Cette nouvelle méthode consiste à ajouter l'étape de projection après l'étape de correction d'IUKF. La partie IUKF donne des points sigma valides et la partie PUKF projette l'estimation corrigée dans le domaine de validité. L'étape de la méthode PIUKF proposée est composée des calculs suivants:

$$X_0 = f_k(\hat{x}_k); X_i = f_k(\hat{x}_k + \gamma_i(\sqrt{P_x})_i), \quad 1 \leq i \leq n; X_i = f_k(\hat{x}_k - \gamma_i(\sqrt{P_x})_{i-n}), \quad n+1 \leq i \leq 2n,$$

$$\bar{x}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,k}^{(m)} X_i, \quad \bar{P}_{x,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,k}^{(c)} [X_i - \bar{x}_k][X_i - \bar{x}_k]^T + Q$$

$$Y_0 = h_k(\bar{x}_k); Y_i = h_k(\bar{x}_k + \gamma_i(\sqrt{P_{x,k}})_i), \quad 1 \leq i \leq n; Y_i = h_k(\bar{x}_k - \gamma_i(\sqrt{P_{x,k}})_{i-n}), \quad n+1 \leq i \leq 2n, \dots \dots \dots (\text{A.29})$$

$$\bar{y}_k = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,k}^{(m)} Y_i, \quad P_{y,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,k}^{(c)} [Y_i - \bar{y}_k][Y_i - \bar{y}_k]^T + R. \dots \dots \dots (\text{A.30})$$

$$P_{xy,k} = \sum_{i=0}^{2n} W_{i,k}^{(c)} [X_i - \bar{x}_k][Y_i - \bar{y}_k]^T, \quad K_k = P_{xy,k} P_{y,k}^{-1}, \dots \dots \dots (\text{A.31})$$

$$\hat{x}_{k+1} = \bar{x}_k + K_k (y_k - \bar{y}_k), \quad P_{k+1} = \bar{P}_k - K_k P_{y,k} K_k^T, \dots \dots \dots (\text{A.32})$$

$$\hat{x}_{k+1}^P = \underset{d \leq x \leq e}{\operatorname{argmin}} J_2(x) = (\hat{x}_{k+1} - x)(P_{k+1})^{-1} (\hat{x}_{k+1} - x). \dots \dots \dots (\text{A.33})$$

PIUKF Algorithm (A.34)

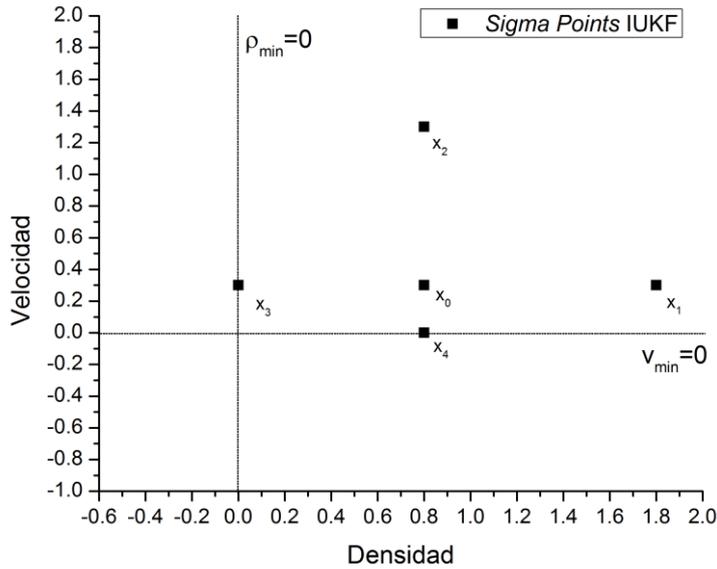


Figure 6 : Points sigma donnés par l'IUKF

4.6 Principaux résultats

Nous avons utilisé deux logiciels pour tester les résultats : d'une part le même modèle macroscopique METANET qui a été également utilisé pour le développement du filtre et d'autre part le logiciel de simulation microscopique SUMO. Les tests pour METANET sont effectués, comme dans [45], sur une portion d'autotoute de 14 sections de longueur 500 m chacune. Elle possède une rampe d'entrée, une rampe de sortie et une restriction du nombre de voies de trois à deux voies à la sortie de la dixième section. Pour les simulations avec SUMO, la portion possède seulement deux voies sur les 10 premières sections puis une seule voie.

Différents scénarios étaient considérés. Les comparaisons sont faites seulement entre les filtres EKF et PIUKF à cause des difficultés d'avoir des valeurs admissibles pour les deux autres filtres IUKF et PUKF. Les analyses sont faites par comparaison entre les valeurs réelles et par évaluation de critères de performances. Ces derniers, (voir équations (A.35)) calculent l'erreur quadratique moyenne pour la densité et la vitesse données:

$$PI_k^{\rho} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_i(k) - \bar{\rho}_i(k))^2}, \quad PI_k^v = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (v_i(k) - \bar{v}_i(k))^2}, \quad (A.35)$$

Les résultats de simulation (exemple sur Figure 7 et Figure 8) ne montrent pas de grandes différences entre l'EKF et le PIUKF. Néanmoins, les indices de performance calculés indiquent de meilleurs résultats pour le PIUKF (Figure 9 et Figure 10). L'amélioration de l'indice de performance atteint jusqu'à 28% pour la vitesse et 40% pour la densité pour la simulation avec METANET, et 45% pour la vitesse et 40% pour la densité quand la simulation est faite avec SUMO.

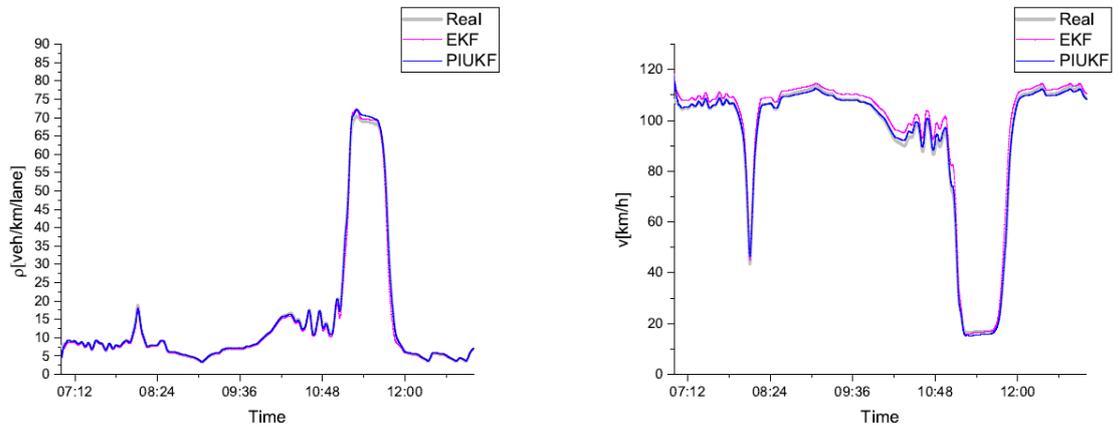


Figure 7: Exemple d'estimation de la densité et de la vitesse. Simulation avec METANET

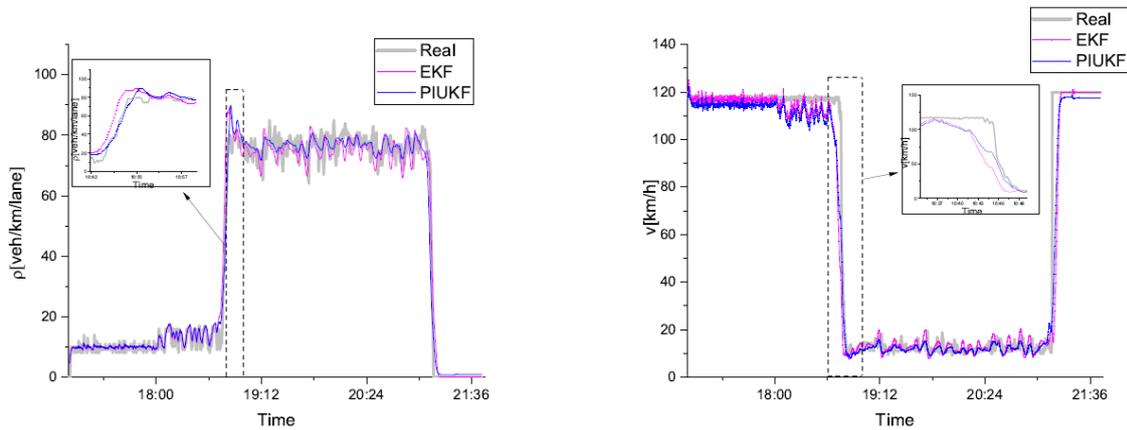


Figure 8. Exemple d'estimation de la densité et de la vitesse. Simulation avec SUMO

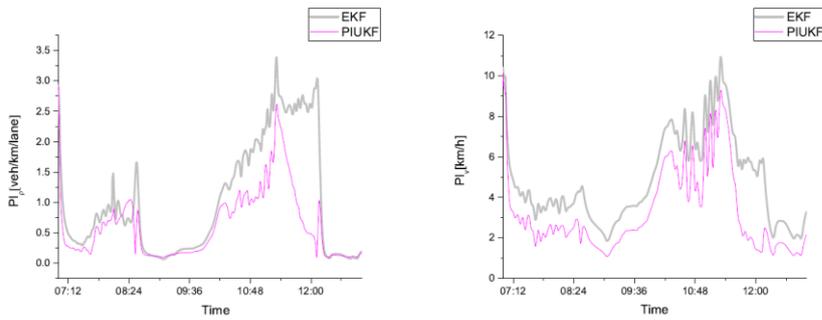
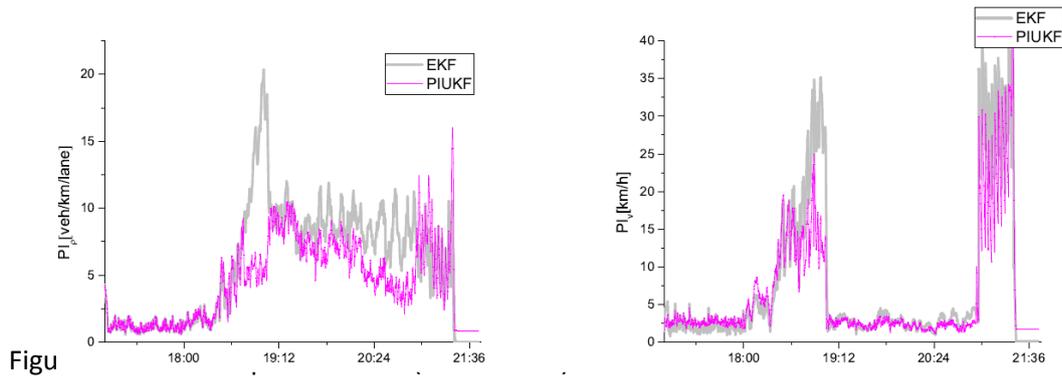


Figure 9: Indice de performance (PI^ρ et PI^v). Simulation avec METANET



Figur

Nous avons testé différents scénarios, en estimant en même temps les paramètres du modèle ou en les supposant fixes ; dans les cas de valeurs fixes, nous avons également testé des cas de données volontairement erronées pour étudier les comportements des filtres. La méthode PIUKF se comporte mieux que la méthode EKF. L'amélioration est plus importante dans les cas où les paramètres du diagramme fondamental sont estimés : on obtient des améliorations allant de 25% à 40% pour la densité et de 36% à 45% pour la vitesse. Les erreurs globales avec METANET sont plus faibles que celles obtenues avec SUMO ; ceci peut être justifié par le fait que, dans le cas de METANET, le même modèle dynamique est utilisé pour l'estimation et la simulation.

5. Ajustement automatique et en temps réel de la consigne pour ALINEA

Un des problèmes rencontrés quand on utilise des modèles, encore plus quand le modèle est complexe, est l'estimation des paramètres. Les paramètres du modèle sont inconnus et diffèrent d'un site à l'autre et même au sein d'un même site, suivant la luminosité, la pluie, etc. Ceci peut être problématique quand ces paramètres sont utilisés comme consigne de régulation.

Smaragdis et al [37] ont proposé une méthodologie pour l'estimation en temps réel du taux d'occupation critique, utilisé comme consigne pour la stratégie de contrôle d'accès isolé, ALINEA. Ils ont proposé deux méthodes d'estimation de la consigne, une méthode dérivative et une seconde fondée sur un filtre de Kalman. Ces deux méthodes sont brièvement exposées dans le paragraphe 5 de ce manuscrit puisque nous les avons testées pour l'application temps réel du contrôle d'accès au réseau de la DIRIF. Par ailleurs, elles ont été incluses et font partie intégrante du système de surveillance du trafic bien connu RENAISSANCE [44], lui-même inclus dans le système de régulation du trafic HERO [33]

Pour notre part, en plus de ces deux méthodes (voir sections 5.2 et 5.3), nous en avons développé une troisième pour estimer en temps réel la consigne pour la stratégie ALINEA : cette méthode consiste en un calibrage du Digramme Fondamental pour estimer le taux d'occupation au niveau de la capacité (voir section 5.4).

5.1 La stratégie de contrôle d'accès ALINEA

Pour mieux comprendre la problématique, rappelons le principe de la stratégie de contrôle d'accès isolé ALINEA.

La stratégie ALINEA consiste en un asservissement linéaire du débit d'accès pour maintenir la densité du trafic sur l'autoroute, à l'aval de l'accès, proche de la densité critique. La loi de commande correspondante s'écrit :

$$r_i(k) = r_i(k-1) + K_R [O_i^* - O_i(k)] \quad (\text{A.36})$$

où

K_R : Constante positive du régulateur

O_i^* : Consigne : proche du taux d'occupation critique de la section autoroutière exprimé en (%)

$O_i(k)$: Taux d'occupation de la section autoroutière au cycle k, exprimé en (%)

$r_i(k-1)$: Nombre de véhicules à injecter de la rampe d'accès calculé au cycle k-1

$r_i(k)$: Nombre de véhicules calculé à injecter de la rampe d'accès au cycle k.

Le fonctionnement d'ALINEA nécessite l'identification de deux paramètres principaux qui sont : O^* et K_R . Vu l'impact sur la densité du trafic de divers facteurs, tels que luminosité, conditions météorologiques, composition du trafic (% de PL et % de VL), incidents, etc., il est utile d'estimer la consigne O^* en temps réel pour plus de précision. Pour ce faire, trois méthodes ont été testées :

- Méthode Dérivative
- Filtre de Kalman
- Optimisation en ligne.

Les deux premières méthodes (dérivative et par Filtre de Kalman) ont été publiées dans [45].

5.2 Méthode dérivative

Sur un diagramme fondamental débit-densité, la densité critique correspond à la capacité de la route. A gauche, le débit croît avec la densité et à sa droite, il décroît. Une méthode d'estimer en temps réel cette densité critique est d'examiner la dérivée du diagramme fondamental $D = dq_{out}/do_{out}$ autour de la densité critique $\tilde{o}_{cr,k}$. Si la valeur de D est suffisamment positive (ou négative), la densité critique $\tilde{o}_{cr,k}$ est estimée en additionnant (ou en soustrayant) un incrément Δ à la valeur précédente $\tilde{o}_{cr,(k-1)}$. La valeur typique de Δ est égale à 1%. Si $D=0$, la densité critique est reconduite au pas de temps k.

Le taux d'occupation critique est donc donné par l'équation(A.37).

$$\tilde{o}_{cr,k} = \tilde{o}_{cr,(k-1)} (1 + s_k \Delta) \quad (\text{A.37})$$

$\Delta = 1\%$; $s_k = +/-1$ suivant le signe de la dérivée en ce point.

5.3 Filtre de Kalman (FK)

Ici également l'idée est d'ajuster le taux d'occupation critique par de petites variations autour de sa valeur nominale comme donnée par l'équation(A.37). La différence consiste dans le fait que les paramètres du diagramme fondamental et par conséquent le signe de la tangente au niveau du taux d'occupation critique sont estimés grâce au Filtre de Kalman.

L'équation des observations est obtenue par linéarisation du Diagramme Fondamental autour de la densité critique. Elle s'écrit :

$$q_{out} = D(o_{out} - \tilde{o}_{cr}) + E \quad (A.38)$$

Les données mesurées sont le q_{out} débit et le taux d'occupation o_{out} à la sortie de la section.

Le filtre de Kalman est utilisé ici pour estimer les paramètres D (veh/%) et E (veh/h). On peut remarquer que si $o_{out} = \tilde{o}_{cr}$ alors $q_{out} = E$ correspondant à la capacité (q_{cap}).

Pour mettre le problème sous la forme des équations (A.1), le vecteur d'état x est écrit : $x=[D \ E]^T \ A_k=I$,

$$y = q_{out} \quad \mathbf{c}_k(k) = [(o_{out,k} - \tilde{o}_{cr}) \ 1]$$

les matrices pour la partie commande sont évidemment nulles. Suivant la valeur de D ainsi estimée, le taux critique est incrémenté telle qu'exprimé par l'équation (A.37) avec s_k donnée par l'équation (A.39)

$$\text{Si } D(k) > D^+ \text{ Alors } s(k) = +1; \text{ Si } D(k) < D^- \text{ Alors } s(k) = -1; \text{ Sinon } s(k) = 0 \quad (A.39)$$

Où les valeurs D^+ et D^- sont estimées à partir des données réelles et ont pour objectif de refléter la dissymétrie du diagramme fondamental. En particulier, la valeur de $D^+ (> 0)$ est nettement supérieure à la valeur de $D^- (< 0)$. Ainsi, la valeur absolue $|D^+|$ est supérieure à $|D^-|$. Les valeurs retenues pour ce travail, estimées sur la base des données de l'autoroute A86 sur plusieurs jours de semaine, sont de $D^+ = \text{nombre de voies} * 20$ (vh/%) et $D^- = - \text{nombre de voies} * 15$ (vh/%).

5.4 Méthode d'optimisation en ligne

Il s'agit de calibrer le diagramme fondamental et d'en déduire le paramètre taux d'occupation critique (O_{cr}). Pour s'assurer de bien calibrer ce paramètre, le même nombre de données en régime fluide et congestionné est utilisé à chaque pas de temps. C'est la constitution du tableau des données [Q O] qui représente la phase délicate pour cette méthode.

L'allure du diagramme fondamental choisie est le modèle exponentiel (déjà utilisé par le passé). Il s'écrit comme :

$$Q(t) = \alpha V_f O(t) \exp\left[(-1/a)\left(\frac{O(t)}{O_{cr}}\right)^a\right] \quad (A.40)$$

- Avec $Q(t)$ = débit mesuré à l'instant t
- $O(t)$ = taux d'occupation mesuré à l'instant t
- α = inverse de la longueur électrique
- V_f = vitesse libre à calibrer
- a = paramètre à calibrer
- O_{cr} = taux d'occupation critique à calibrer

Une régression non-linéaire a été utilisée par la suite pour estimer les paramètres du diagramme fondamental et plus particulièrement le paramètre qui nous intéresse le plus O_{cr} . Un tableau incluant les deux régimes du trafic : fluide et congestionné, est constitué pour l'optimisation. Afin d'utiliser des données significatives dans les deux périodes, nous avons fixé un nombre de points (100 points) à acquérir avant de lancer l'optimisation pour chaque état, soit 200 au total. A ces 200 valeurs, on a ajouté deux éléments pour obliger l'optimisation à prendre en compte les deux points extrêmes : fluide (0,0) et congestionné (Q , O_{cmax}).

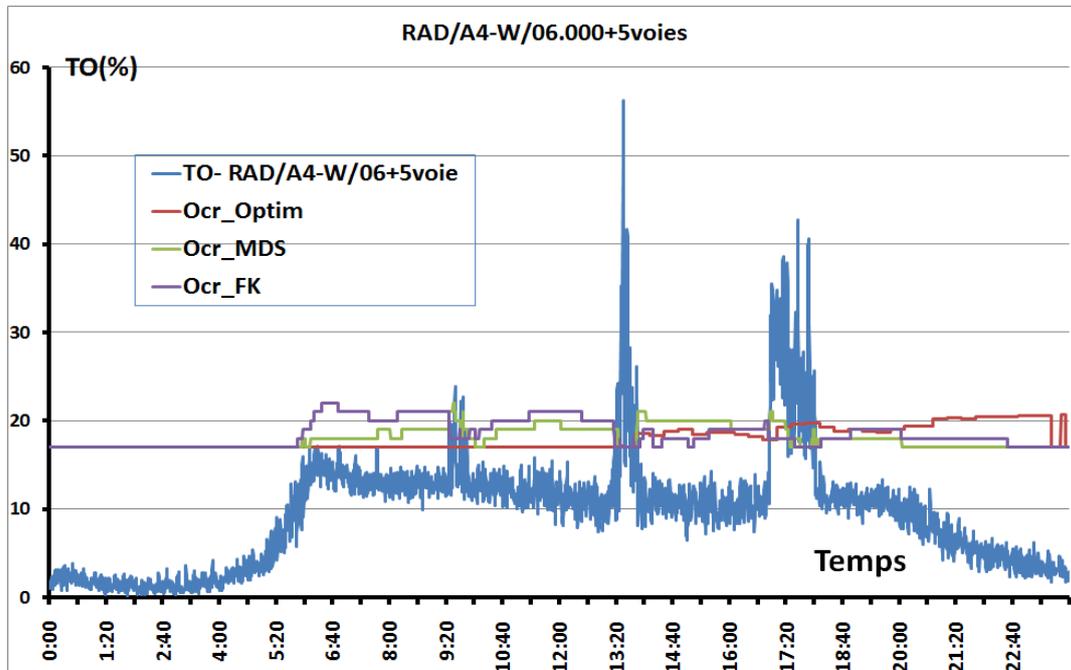


Figure 11: Comparaison entre les 3 méthodes d'estimation en temps réel de la consigne pour ALINEA

Plusieurs tests en simulation ont été effectués pour plusieurs sections de l'autoroute (un exemple est donné sur la Figure 11). La méthode d'optimisation a été adoptée, puisque c'est la méthode jugée la plus simple.

6. Mes contributions à la recherche sur cette thématique

Les principales contributions sur cette thématique de mes collègues et moi seront utiles dans des problèmes de surveillance ou de régulation du trafic. Elles consistent en :

- 1- La formulation d'un filtre de Kalman stationnaire utile à estimer la densité à partir des capteurs de type boucle électromagnétique quand le trafic n'est pas congestionné et les sections pas trop longues.
- 2- L'étude de la robustesse d'un tel filtre par rapport aux erreurs des observations.
- 3- La mise en évidence du problème des contraintes quand l'Unscented Kalman Filter est utilisé.
- 4- La formulation du problème d'estimation de la densité à l'aide du Projected Interval l'Unscented Kalman Filter.

7. Perspectives

Le changement le plus important touchant aujourd'hui la recherche dans le domaine du trafic concerne, à mon sens, les moyens de mesure et de communication. Pour ce qui est de la mesure, on passe de l'usage des capteurs classiques (boucle électromagnétique, vidéo, ...) permettant l'acquisition des données eulériennes (débit, vitesse, taux d'occupation, ...) à l'utilisation de la détection des véhicules individuels par GPS qui fournit des données lagrangiennes (position, vitesse,...). Ces données sont massives (Big Data) et donc sources d'un très grand nombre d'informations, qui certes enrichissent la recherche, mais posent la difficulté supplémentaire de devoir en faire un tri pour ne retenir que les plus pertinentes. En ce qui concerne la communication, les véhicules sont aujourd'hui connectés, avec des possibilités d'échanges entre véhicules et entre véhicules et infrastructures. Ceci influe sur la manière de modéliser et de réguler le trafic.

En ce qui concerne l'estimation de l'état du trafic, la connaissance des vitesses individuelles influe sur la qualité de l'estimation. C'est un facteur enrichissant que nous commençons déjà à inclure dans nos recherches ; il peut être utilisé en complément d'information avec les données capteurs de type boucles électromagnétiques ou seulement pour des données exclusivement lagrangiennes.

Enfin, tout un ensemble de facteurs – pollution globale et locale, problèmes sanitaires, insécurité, embouteillages récurrents – converge vers la nécessité d'un transport collectif toujours plus efficace, en ville en particulier. Comme je le présente dans les deux chapitres suivants de ce mémoire, je suis déjà engagée dans la recherche sur la régulation et la qualité de service des transports en commun. J'envisage d'appliquer également mon expertise dans le domaine du filtrage et de l'estimation de l'état au mode de transports collectifs. Dans le projet INDIRA_ B, qui sera décrit dans le chapitre 3, nous faisons déjà face aux problèmes de données manquantes. En effet, un autobus peut emprunter des tunnels, des problèmes de communication avec le SAE font que le bus n'est pas continuellement détecté. Les techniques présentées dans ce chapitre s'appliqueront bien à cette problématique.

Par ailleurs, la disponibilité des données (Big Data) nous permettra d'enrichir nos travaux en matière de prédiction. Ceci servira d'une part pour la prédiction des trajectoires des bus afin d'appréhender les écarts entre trajectoire planifiée et trajectoire réalisée, d'autre part pour prévoir la demande des usagers et la reconstitution des matrices origine-destination.

8. Bibliographie

- [1] Abouaïssa H. and Iordanova V. (2013). Algebraic methods for traffic flow densities estimation. *Cybernetics and Information Technologies*, Vol. 13, No. 4 :5–17, 2013.
- [2] Ashok K. and Ben-Akiva M.E. (2000). Alternative approaches for real-time estimation and prediction of time-dependent origin-destination flows. *Transportation Science* 34(1):21-36.
- [3] Barcelo, J., Montero L., Marquos L. and Carmona C. (2010). Travel time forecasting and dynamic origin-destination estimation for freeways based on bluetooth traffic monitoring. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (2175):19-27.
- [4] Bierlaire and Crittin F. (2004). An efficient algorithm for real-time estimation and prediction of dynamic OD tables. *Operations Research* 52(1):116-127.
- [5] Canudas-De-Wit, C., Ojeda L.L., and Kibangou A.Y. (2012). Graph constrained-CTM observer design for the Grenoble south ring. *IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)*, No. September. pp. 197–202.
- [6] Cremer M. (1991). Flow Variables: Estimation. In: *Concise Encyclopedia of Traffic and Transportation Systems*. Pergamon Press, pp. 143–148.
- [7] Cremer M. and Keller H. (1987). A new class of dynamic methods for the identification of origin-destination flows. *Transportation Research Part B: Methodological* 21(2):117-132.

- [8] Cremer M., Papageorgiou M. (1981). Parameter identification for a traffic flow model. *Automatica* 17, 837–843.
- [9] Daganzo C. (1995). Requiem for second-order fluid with approximation to traffic flow, *Transportation Res. Part B*, 29. pp. 277–286
- [10] Duret A., Leclercq L., and El Faouzi N.-E. (2016). “Data assimilation using a mesoscopic Lighthill-Whitham-Richards model and loop detector data: methodology and large-scale network application,” *Transportation Research Record*, vol. 2560, pp. 26–35.
- [11] Evensen G. (2003). The ensemble Kalman filter: Theoretical formulation and practical implementation. *Ocean Dynamics* 53:343-367.
- [12] Gazis D.C., Foote R.S. (1969). Surveillance and control of tunnel traffic by an on-line digital computer. *Transportation Science*, 3 (3), pp. 255-275
- [13] Gazis D.C., Knapp C.H. (1971). On-line estimation of traffic densities from time-series of flow and speed data. *Transportation Science* 5, 283–301.
- [14] Ghosh and Knapp, (1978). Estimation of traffic variables using a linear model of traffic flow. *Transportation Research*, 12(6), 395-402.
- [15] Herrera J.C., and Bayen A.M. (2010). Incorporation of Lagrangian Measurements in Freeway Traffic State Estimation. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 44, pp. 460–481.
- [16] Hegyi A., Mihaylova L., Boel R., and Lendek Z. (2007). Parallelized particle filtering for freeway traffic state. in *Proceedings of the European Control Conference (ECC)*, Kos, Greece, July 2-5. pp. 2442-2449.
- [17] Hegyi A., Girimonte D., Babuska R., and De Schutter B. (2006). A comparison of filter configurations for freeway traffic state estimation. *The 9th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. IEEE, New York, 1029-1034.
- [18] Hoogendoorn et al., *Data processing and enhancement techniques in "Traffic Simulation and Data: Validation Methods and Applications"*, publié par Winnie Daamen, Christine Buisson, Serge P. Hoogendoorn
- [19] Julier, S., Uhlmann J., and Durrant-Whyte H.F. (2000). A New Method for the Nonlinear Transformation of Means and Covariances in Filters and Estimators. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 45, No. 3, pp. 477–482.
- [20] Julier S.J. and Uhlmann J.K. (2004). Unscented filtering and nonlinear estimation. *Proceeding of the IEEE*, Vol. 92, No. 3, pp. 401–422.
- [21] Kalman R.E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems. *ASME Basic Engineering Journal* 82(Series D):35-45.
- [22] Kurkjian A., Gershwin S.B. Houpt P.K. Willsky A.S. Chow E.Y. and Greene C.S. (1980). “Estimation of roadway traffic density on freeways using presence detector data,” *Transportation Science*, vol. 14, no. 3, pp. 232–261.
- [23] Kohan R.R., Bortoff S.A. (1998). An observer for highway traffic system. In: *Proc. 37th IEEE Conference on Decision & Control*, Tampa, FL, pp. 1012–1017
- [24] Majid M., Abouaïssa H., Jolly D., Morvan G. (2013). State reconstructor for real-time freeway ramp metering. *10th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*. Pages 306-311
- [25] Majid M., Abouaïssa H. (2015). Comparative study of a super-twisting sliding mode observer and an extended Kalman filter for a freeway traffic system. *Cybernetics and Information Technologies*. Volume 15. N°2. Pp 141-158.
- [26] Mahmassani H.S. (2001). Dynamic network traffic assignment and simulation methodology for advanced system management applications. *Networks and Spatial Economics*, 1(3):267–292.
- [27] Messmer A., Papageorgiou M. (1990). METANET: a macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic Engineering & Control* 31, 466–470, and 549.
- [28] Meier J., Wehlan H. (2001). Section-wise modeling of traffic flow and its application in traffic state estimation. In: *Proc. 2001 IEEE Conference on ITS*, Oakland, CA, pp. 442–447.
- [29] Mihaylova L., Boel R. and Hegyi A. (2007). Freeway traffic estimation within particle filtering framework. *Automatica* 43(2):290-300.
- [30] Nahi N.E., Trivedi A.N. (1973). Recursive estimation of traffic variables: section density and average speed. *Transportation Science* 7, 269–286.
- [31] Ngoduy D. Low-rank unscented Kalman filter for freeway traffic estimation problems. *Transportation Research Record* (2260):113-122, 2011.
- [32] Papageorgiou M. (1983). *Application of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control*. Springer- Verlag, New York.

- [33] Papamichail I., Papageorgiou M., Wang, Y. "Motorway Traffic Surveillance and Control", European Journal of Control, Volume 13, Issues 2–3, 2007, Pages 297-319.
- [34] Arulampalam, Ristic B.S. and Gordon N. (2004). Beyond the Kalman filter. Artech House. ISBN: 1-58053-631.
- [35] Seo T., Bayen A.M., Kusakabe T., and Asakura Y. (2017). Traffic state estimation on highway: A comprehensive survey. Annual Reviews in Control, Vol. 43, pp. 128–151.
- [36] Simon D. (2010). "Kalman filtering with state constraints: a survey of linear and nonlinear algorithms," IET Control Theory Applications, vol. 4, pp. 1303–1318.
- [37] Smaragdis E., Papageorgiou M., Kosmatopoulos E. (2004). A flow-maximizing adaptive local ramp metering strategy. Transportation Research Part B: Methodological. Volume 38, Issue 3, Pages 251-270.
- [38] Szeto M.W., Gazis D.C. (1972). Application of Kalman filtering to the surveillance and control of traffic systems. Transportation Science 6, 419–439.
- [39] Tampère C.M.J. (2007). Traffic State Estimation and Prediction using the Cell Transmission Model with Implicit Mode Switching and Dynamic Parameters. 86th TRB Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 21-25, 2007, Washington, USA.
- [40] Teixeira B.O.S., Tôrres L.A.B., Aguirre L.A. and Bernstein D.S. (2008). Unscented filtering for interval constrained nonlinear systems. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. pp. 5116–5121.
- [41] Valverde G. and Terzija V. Unscented (2011). Kalman filter for power system dynamic state estimation. IET generation transmission & distribution, Vol. 5, No. 1, pp. 29–37.
- [42] Van der Merwe R. and Wan E. A. (2001). The square-root unscented Kalman filter for state and parameter estimation. In Proc. IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP '01), Vol. 6, pp. 3461–3464.
- [43] Van Lint H. and Djukic T. (2014). "Applications of Kalman Filtering in Traffic Management and Control". In INFORMS Tutorials in Operations Research. Published online: 59-91.
- [44] Wang Y., Papageorgiou M., Messmer A. (2006). RENAISSANCE – A unified macroscopic model-based approach to real-time freeway network traffic surveillance. Transportation Research Part C 14 190–212
- [45] Wang Y. & Papageorgiou M. (2005). Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: A general approach. Transportation Research Part B: Methodological, 39(2), 141–167. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2004.03.003>
- [46] Wang Y., Papageorgiou M., & Messmer A. (2008). Real-time freeway traffic state estimation based on extended Kalman filter: Adaptive capabilities and real data testing. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 42(10), 1340–1358. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2008.06.001>

9. Mes publications pour ce chapitre

- [LB. 1]. Rissoa, M.A., **Bhouri N.**, Lotito P.A., Rubiales A. (2018). Comparison of nonlinear estimation methods for highway traffic estimation with connected vehicles. 21st EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2018, 17-19 September 2018, Braunschweig, Germany
- [LB. 2]. Rossi M.A., **Bhouri N.**, Rubiales A.J., Lotito P.A. A constrained filtering algorithm for freeway traffic state estimation. *Transportmetrica B: Transport Dynamics* (Impact Factor: 1.565, 2015), en revision.
- [LB. 3]. Rossi, M. A., **N. Bhouri**, A. J. Rubiales, P.A. Lotito. A nonlinear algorithm for traffic estimation with state constraints. Transportation Research Procedia. Edited by Domokos Esztergár-Kiss, Tamás Mátrai, János Tóth, István Varga. Volume 27, Pages 600-608 (2017).
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146517310256>
- [LB. 4]. Haj Salem, H., N. Farhi, C. Nguyen Van Phu, **N. Bhouri**, "Ajustement automatique et en temps réel de la consigne pour ALINEA ». Rapport convention DIRIF. 27 pages. Avril 2016.
- [LB. 5]. **Bhouri N.**, Haj-Salem H., Papageorgiou M. et Blosserville J.M. "Estimation of traffic density on motorways". *Traffic Engineering + Control*, pp. 579-583, novembre 1988. (SCOPUS, H1.14)
- [LB. 6]. Risso M.A., **Bhouri N.**, Lotito, P.A. and Rubiales A.J. "A nonlinear algorithm for traffic estimation with state constraints", 20th, EWGT 2017. Budapest, Hungary - 4-6 September, 2017

[LB. 7]. **Bhourri N.**, Haj-Salem H., Papageorgiou M. et Blosseville J.M. "*Estimation of traffic density on motorways using presence detector measurements*". IFAC/IFIP/IFORS International Symposium AIPAC'89, juillet 1989, Nancy.

Stages encadrés

[LB. 8]. Arthur DE LA ROCHEFOUCAULD; "Calibrage du diagramme fondamental" Master 2 "Mathématiques Appliquées à l'Économie et à la Finance". Université Paris 1 - U.F.R. de Mathématiques et Informatique. 2014

Chapitre B : Contrôle d'accès autoroutier

1. Préliminaires

Equation Chapter 2 Section 1 L'accroissement de la population, la montée du taux de motorisation des ménages, le développement des loisirs et du tourisme, ont fait que les autoroutes, conçues pour favoriser les déplacements rapides des véhicules motorisés, présentent des blocages importants du fait de la congestion. Les conséquences de ce phénomène sont désastreuses du point de vue tant économique qu'écologique, à la fois pour les collectivités et pour les ménages. Améliorer les conditions de circulation sur les autoroutes est alors devenu une problématique importante, conduisant à développer plusieurs techniques "intelligentes" de gestion du trafic, comme par exemple la régulation de la vitesse, l'information voyageur, la détection automatique d'incident, ... et le contrôle d'accès autoroutier.

L'objectif du contrôle d'accès est de réguler les débits des rampes d'entrée par des feux tricolores afin de préserver la capacité de l'autoroute, limitant ainsi l'apparition des congestions.

La technique du contrôle d'accès a été développée en premier lieu aux Etats-Unis au début des années 1960 [84]. Dès le début, plusieurs systèmes développés ont montré leur efficacité pour fluidifier le trafic, en simulation ou lors de tests sur le terrain. L'implémentation permanente de ces systèmes n'a pas suivi rapidement et a fait face aux réticences des décideurs. Les retenues de véhicules susceptibles de se former sur les accès et de possibles transferts de la demande sur le réseau parallèle, n'ayant pas forcément la capacité suffisante, expliquent cette réticence. Bien des tests et démonstrations ont été nécessaires pour convaincre les décideurs de l'efficacité de la technique, même sans recours au délestage. Je pense avoir contribué à cette prise de conscience et nous observons aujourd'hui de par le monde des implémentations de grande envergure du contrôle d'accès [LB. 11] [LB. 10] [LB. 8] [LB. 9] [LB. 6] [LB. 3]. Je participe quant à moi à celle qui concerne le réseau d'Île-de-France.

2. Problématiques de mes recherches

Les premières stratégies de contrôle d'accès sont "locales", dans le sens où chaque accès est régulé individuellement en tenant compte des conditions du trafic dans son voisinage immédiat. J'ai développé pendant ma thèse deux stratégies de régulation coordonnées pour une autoroute de grande envergure. Elles avaient donc pour objectif de réguler tous les accès du réseau en tenant compte des conditions de la circulation sur la totalité de l'autoroute et non juste à proximité de l'accès. J'ai testées ces stratégies en simulation et les ai comparées aux cas sans contrôle ou contrôle local des accès. J'ai également participé aux tests et évaluation ex-ante et ex-post pour l'implémentation de stratégies en temps réel, activité que je poursuis aujourd'hui. Je participe également aujourd'hui au projet à l'étude préalable, aux développements et à l'évaluation après son implémentation pour une exploitation en temps réel sur 75 accès en Ile de de France. Mes travaux de recherche dans ce domaine sont centrés sur les problématiques suivantes :

- Modéliser le trafic d'une autoroute de grandes dimensions.
- Formuler le problème de contrôle d'accès comme un problème d'optimisation.
- Résoudre le problème par la méthode de la programmation dynamique.
- Développer une stratégie hiérarchisée à deux niveaux pour réguler le trafic.
- Faire des tests en simulation pour le Boulevard Périphérique de Paris.
- Évaluer la stratégie coordonnée.
- Développer une stratégie méta-heuristique
- Accompagner l'implémentation pour une exploitation en temps réel sur le réseau d'Ile de France.

3. Commande optimale

Dans ma thèse, j'ai développé deux stratégies globales pour le contrôle d'accès autoroutier. Pour ce faire, j'ai résolu deux problèmes de commande optimale avec modèles non linéaires et contraintes d'inégalité sur la commande et sur l'état. J'ai appelé COMET (Commande Optimale sur la base du modèle META la première stratégie, plus précise, car elle est fondée sur le modèle macroscopique non linéaire META [73][75], devenu METANET par la suite[62] [79]. Ce modèle, testé en simulation sur la base de données réelles, montrait de meilleurs résultats quand il était évalué et comparé à d'autres[53]. Il nécessitait cependant des discrétisations spatiale et temporelle fines (environ 10 s et 500 m) qui pouvaient occasionner des problèmes de temps de calcul pour une application en temps réel. C'est pourquoi j'ai développé la seconde stratégie, que j'ai appelé COSOP (commande sous optimale), qui consistait en une stratégie hiérarchisée à deux niveaux. Dans le premier, une commande optimale était déterminée pour des entrées agrégées sur la base d'un modèle simplifié. J'ai développé ce modèle simplifié et l'ai testé en simulation. Au second niveau, la commande optimale a été par la suite, soit désagrégée à la proportionnelle entre les différentes entrées, soit donnée comme consigne à la stratégie locale ALINEA.

La simplification que j'ai introduite dans le modèle revenait à éliminer des termes d'anticipation du modèle META, économisant ce faisant une équation (seules deux équations sont désormais nécessaires) et simplifiant de surcroît l'équation de la vitesse. Une estimation des paramètres puis des tests en simulation ont été effectués et comparés aux résultats du modèle META. Les résultats montrent que le modèle simplifié reproduit la formation de congestions à la place même où elles se produisent, mais avec un degré de gravité et un niveau de propagation différents. Le fait de parvenir à reconnaître les congestions a cependant été jugé suffisant comme base pour une commande optimale. Les deux stratégies ont été appliquées en simulation à la totalité du Boulevard Périphérique de Paris (BP) (35 km et environ 35 entrées par sens de circulation, dont six sont des autoroutes, soit 147 bretelles d'entrées-sorties sur sa totalité).

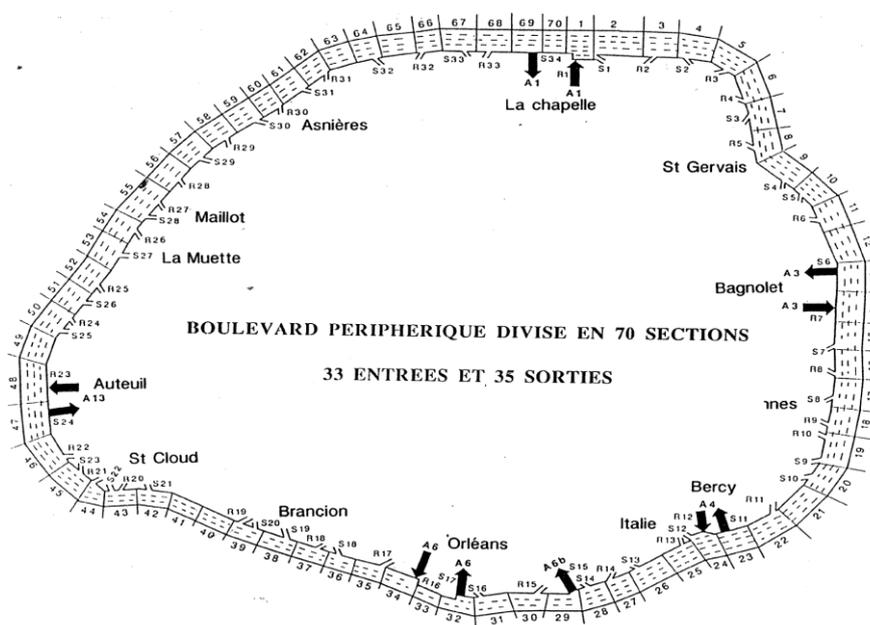


Figure 12 : Modélisation du Boulevard Périphérique de Paris

De nombreuses études en simulation ont été réalisées pour tous les accès du BP et pour différentes situations du trafic. Les résultats les plus significatifs donnent un gain légèrement supérieur pour la stratégie globale COMET par rapport à la stratégie ALINEA (voir chapitre 1) : pour 45 minutes de

simulation et 4 638 véhicules-heures de temps passé sans contrôle, le gain est de 12% pour ALINEA et de 13,6% pour COMET par rapport au cas sans contrôle.

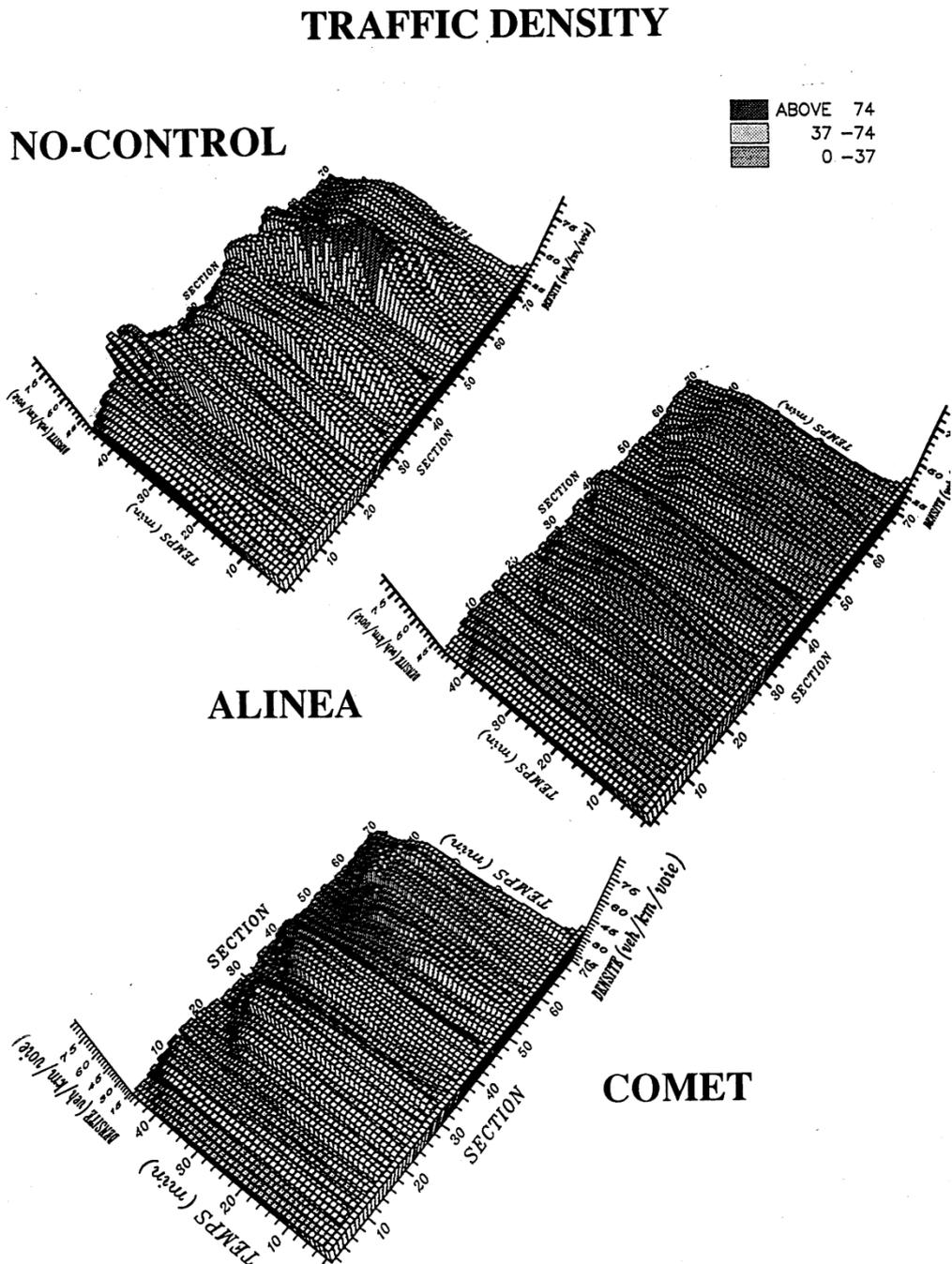


Figure 13 : États du trafic sur le Boulevard Périphérique de Paris après application des stratégies de contrôle d'accès

Vu le temps de calcul élevé de COMET (6 minutes sur une station SUN en 1990), on pourrait conclure qu'ALINEA est plus performant. Cependant, COMET offre une meilleure répartition des temps d'attente sur les accès et, en cas d'incident, la supériorité de COMET est franchement significative (17% contre 10% pour ALINEA). Or, dans ce cas, le temps de calcul de COMET chute à 1 minute, car, la source du problème étant localisée, la stratégie atteint plus facilement les valeurs optimales.

Quant à elle, la stratégie hiérarchisée ne donne pas de résultats très prometteurs (entre 2% et 4% de gain). En effet, le trafic est très instable durant les perturbations et, bien que le modèle simplifié soit non linéaire, le fait qu'il suppose une homogénéité des conditions sur un long intervalle (trois kilomètres du BP) l'handicape.

Les résultats très prometteurs de la stratégie COMET ont encouragé les collègues à développer la méthode en l'améliorant, notamment en y intégrant le guidage dans le logiciel AMOC [64] [65] [66] et en introduisant l'horizon glissant pour pallier le problème de commande en boucle ouverte avec le logiciel OASIS [57] [58] [64].

La représentation graphique dynamique des simulations, que j'ai effectuée grâce au logiciel Dataviews, a permis des démonstrations dans plusieurs expositions et au cours de journées portes ouvertes, contribuant ainsi à sensibiliser les décideurs sur l'efficacité du contrôle d'accès.

4. Commande heuristique

Nous pouvons dénombrer des milliers de publications traitant du contrôle d'accès. La raison vient notamment de la simplicité du problème du point de vue conceptuel dans certains cas de figure, particulièrement dans celui du contrôle d'une rampe isolée. Ceci permet à des chercheurs développant des innovations dans d'autres domaines, plus théoriques, de démontrer l'applicabilité de leur théorie. Les résultats peuvent être très promoteurs, tels que ceux de la stratégie connue sous le nom « Commande sans modèle ». Celle-ci a été testée sur le terrain et a montré de très bons résultats [47]. Plusieurs stratégies centralisées sont aussi proposées (voir [77] et [81] pour un état de l'art, et [50][56][86] [89] pour d'autres systèmes intéressants). Le contrôle d'accès est parfois combiné avec d'autres types de régulation, comme par exemple la régulation de la vitesse [54][70][78][83], les changements de voies [87] [88] ou le guidage [63][75]. Mais, malgré les résultats prometteurs de ces stratégies centralisées, l'étude des systèmes opérationnels en exploitation fait état de méthodes heuristiques moins « intelligentes » que les systèmes proposés dans la littérature. Généralement, il n'a pas été possible de surmonter la méfiance des exploitants vis-à-vis des "boîtes noires" ; car ces dernières accomplissent tous les calculs sans possibilité d'intervention de leur part, sauf évidemment à arrêter complètement le système [47][52]. L'état de l'art des pratiques du contrôle d'accès au niveau international montre que les commandes heuristiques sont souvent privilégiées, comme par exemple à Denver [67][69], à Seattle [61], à Victoria (VicRoads) et à Melbourne (Monash) en Australie [77] [79], à Minneapolis/St. Paul [60], à Toronto [80] et d'autres (voir [49] pour plus de détails) . Pour ceci, le cadre des projets d'application en temps réel de stratégies de régulation coordonnée, nous avons opté pour des stratégies coordonnées de type heuristique. Ces projets ont été pilotés, pour l'Inrets et désormais pour l'Ifsttar, par mon collègue Habib Haj-Salem. Un projet en cours fait suite aux travaux de régulation de cinq accès de l'autoroute A6 (France).

4.1 Application Cinq accès de l'autoroute A6

Lors du projet européen EURAMP, trois stratégies ont été testées : ALINEA, VC-ALINEA et la méta-heuristique CORDIN [LB. 2] [LB. 6]. ALINEA est une stratégie de contrôle d'accès isolé qui calcule, en boucle fermée, les durées de feu vert à chaque cycle (voir chapitre 1). La stratégie VC-ALINEA (Variable Cycle ALINEA) repose sur la même philosophie que la stratégie ALINEA, sauf qu'elle peut changer le phasage du cycle en plus d'actualiser seulement les durées de vert. Quant à la stratégie CORDIN, c'est une heuristique qui s'appuie sur la stratégie locale ALINEA. L'idée est d'utiliser, en cas d'apparition d'une congestion sur l'autoroute, les capacités des rampes d'accès qui sont encore libres en amont. Cette philosophie est également utilisée par d'autres stratégies coordonnées proposées dans la littérature comme HERO[79]. Cependant, l'avantage de CORDIN est de ne pas nécessiter de stations

de mesure supplémentaires sur les rampes. La gestion des files d'attente sur les accès est réduite au respect des contraintes imposées par l'algorithme de commande

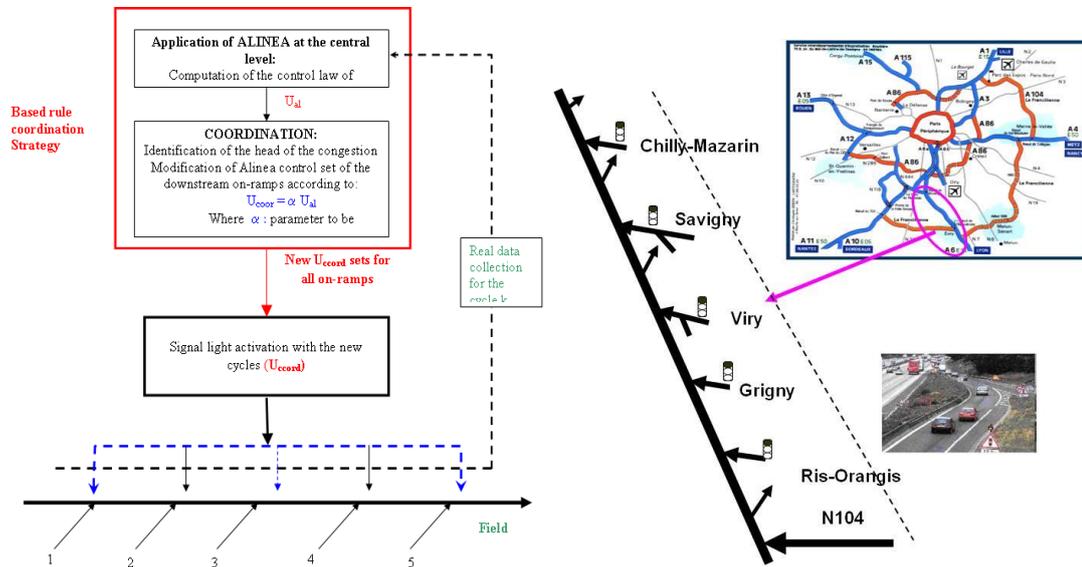


Figure 14 : Application de la stratégie de contrôle d'accès CORDIN sur l'autoroute A6

Les étapes appliquées dans la stratégie CORDIN sont les suivantes :

1. Appliquer la stratégie ALINEA à chaque rampe de l'axe, débit des accès $=\{U_{al}\}$
2. Trouver l'emplacement du début de la congestion en testant au niveau de la première rampe où ALINEA est active (si le taux d'occupation O_i est supérieur à 90% du taux d'occupation critique $\hat{O}_{i,cr}$) et si la contrainte de file d'attente n'est pas active.
3. Pour chaque rampe amont,
 - si la contrainte de file d'attente de la rampe d'accès n'est pas active, modifier la commande ALINEA selon $U_{cordin} = \alpha_1 U_{al}$ pour la première rampe en amont du début de la congestion et puis $U_{cordin} = \alpha_2 U_{al}$ pour les autres rampes amont, où (α_1) et (α_2) sont des paramètres qui ont été calibrés.
 - Sinon ne rien faire.
4. Application des nouveaux ensembles de contrôle coordonnés sur le terrain.
5. Attendre le prochain cycle.
6. Revenir à l'étape 1.

Les mêmes valeurs sont fixées pour les différents paramètres pour les trois stratégies de contrôle. Elles sont le résultat d'expérimentations de terrain antérieures. Les durées suivantes ont été trouvées comme étant optimales : Cycle = 40 s, Vert-max = 30 s, Vert-min = 10 s, Orange = 5 s.

Sur la base des caractéristiques du cycle, les paramètres de CORDIN (α_1, α_2) sont fixés comme suit : $\alpha_1 = (\text{Vert-max})/(\text{Cycle}) = 30/40 = 0,75$ et $\alpha_2 = 0,80$. Cette valeur est fixée arbitrairement, le choix étant fait de moins pénaliser l'utilisateur des rampes d'accès amont.

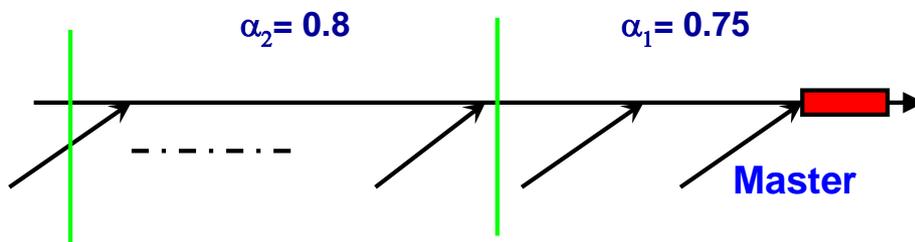


Figure 15 : Exemple de paramètres de la stratégie CORDIN

Ces stratégies ont été appliquées alternativement de la mi-septembre 2006 à fin janvier 2007. Des données ont été recueillies sur cent quarante jours. Les jours marqués par des défaillances majeures des capteurs, ayant des conditions de trafic atypiques (essentiellement les week-ends et les jours fériés) et les jours avec accidents ou incidents significatifs ont été éliminés. Finalement 11, 10, 11 et 9 jours de données ont été utilisés respectivement pour les stratégies No control, ALINEA, VC_ALINEA et CORDIN.

Les évaluations de l'impact des stratégies sur la circulation ont été faites pour les heures de pointe du matin. Les critères utilisés sont :

- Distance totale de déplacement (TTD) en véh* Km
- Temps total passé (TTS) en véh * h
- Vitesse moyenne (MS) en km/h, définie comme TTD/TTS
- Gravité de congestion en h * km
- Consommation de carburant et émissions environnementales (CO, HC)

ALINEA diminue le temps total passé (TTS) de 10% et augmente la vitesse moyenne (MS) de 5%, par rapport au cas sans contrôle. VC_ALINEA donne de meilleurs résultats qu'ALINEA pour le TTS (12%). Cependant, nous observons une diminution plus importante pour le TTD (5% contre 2% pour ALINEA), comparé au cas sans contrôle. La stratégie CORDIN donne des améliorations de 12% et 11% pour respectivement TTS et le MS, sans réduire le TTD.

En ce qui concerne la consommation de carburant, par rapport au cas sans contrôle, les changements sont de -8%, -5%, -8% pour ALINEA, VC_ALINEA et CORDIN et ils sont respectivement de -6%, -9% et -7% pour les émissions de polluants (voir LB.HMN).

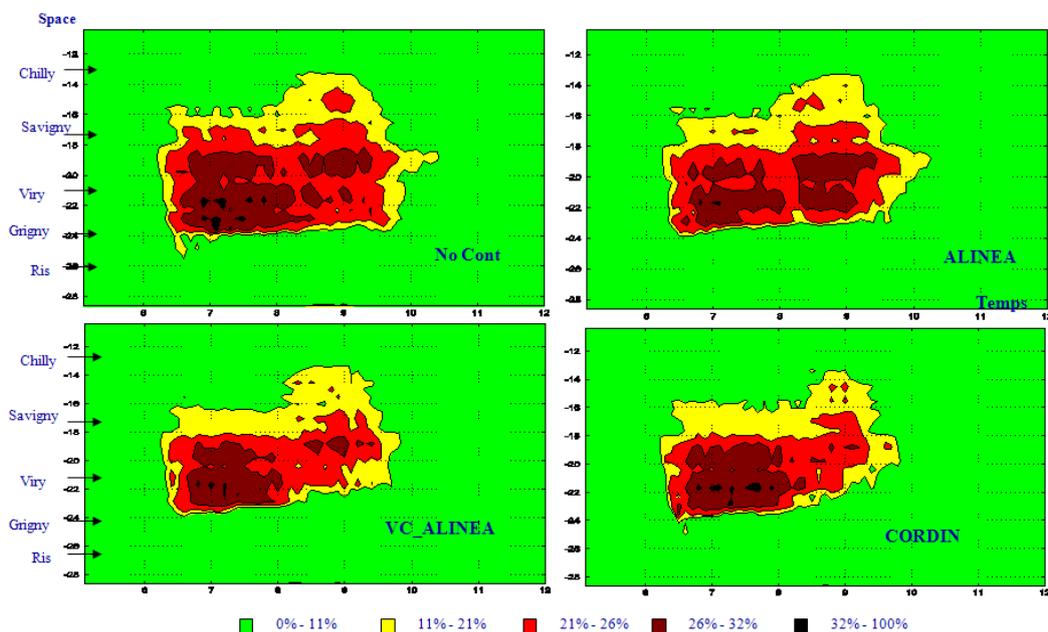
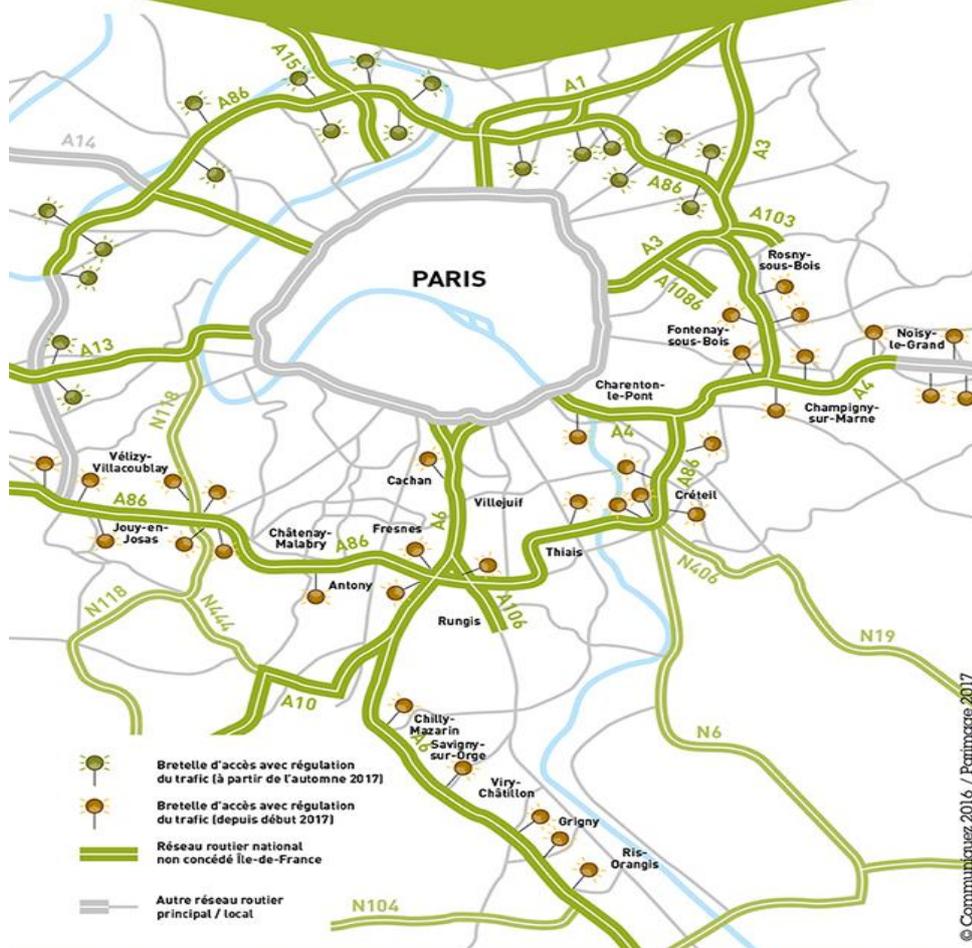


Figure 16 : Cartographie de la congestion avec les 4 stratégies

4.2 Soixante-quinze accès du réseau d'Île-de-France

Il s'agit dans ce projet de faire une étude préalable, de développer, tester et évaluer une stratégie de contrôle d'accès coordonnée, d'accompagner la DIRIF dans la généralisation de la régulation d'accès en Île-de-France. Le projet de la DIRIF (Figure 17) prévoit de déployer en quatre phases (une tranche ferme et deux conditionnelles) 75 contrôleurs d'accès sur une zone qui couvrira 200 km d'autoroute (Figure 18).

PLUS DE 50 BRETELLES D'ACCÈS ÉQUIPÉES EN 2017 POUR FLUIDIFIER LA CIRCULATION



Le déploiement de la régulation du trafic est cofinancé par l'État et la Région Île-de-France dans le cadre de leur partenariat pour réduire la congestion et changer la route par l'innovation et l'expérimentation.

Figure 17 : Fiche d'information du déploiement du contrôle d'accès de la DIRIF

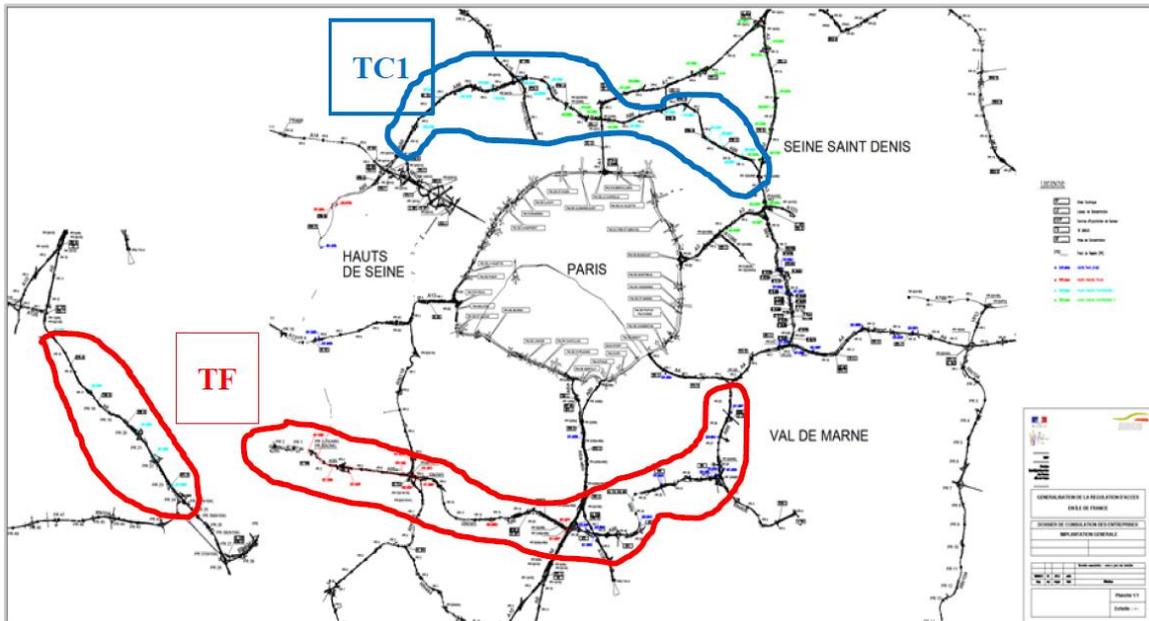


Figure 18 : Réseau de 75 rampes à contrôler en Île-de-France

Phase 1 (TF) : Remise en service des 21 contrôleurs déjà déployés à l'Est en 2007

Phase 2 (TF) : Déploiement des 17 CAC au Sud-Ouest (tranche ferme des travaux)

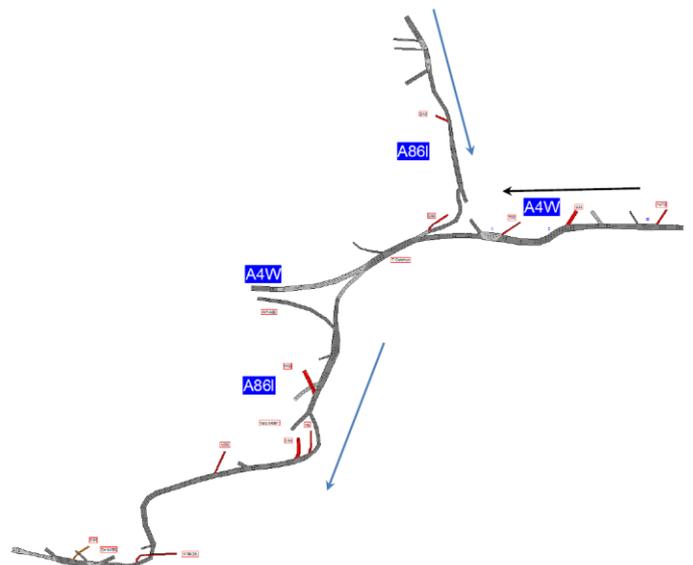
Phase 3 (TC1) : Déploiement des 17 CAC à l'Ouest

Phase 4 (TC2) : Déploiement des 20 CAC au Nord-Est

Les évaluations ex-ante sont menées grâce au logiciel de simulation MAGISTER[71]. Elles seront conduites par la suite sur la base des données réelles récoltées sur le réseau.



Partie concernée de l'autoroute A6



Sections des autoroutes A4W-A86I

Figure 19 : Modélisation à l'aide du logiciel Magister

Les premiers tests et évaluations sont faits pour la stratégie de contrôle d'accès isolé ALINEA. Compte tenu de l'étendue du réseau, dont peu de rampes agissent nous privilégierons une stratégie coordonnée suivant une logique d'axe. Les tests et développements sont en cours.

5. Mes contributions à la recherche sur cette thématique

Mes recherches sur la thématique de la régulation du trafic autoroutier ont contribué à accroître les connaissances dans le domaine du contrôle d'accès et à familiariser et convaincre les décideurs pour l'implémentation en temps réel de ces stratégies. Mes apports ont notamment porté sur les aspects suivants :

- La modélisation macroscopique du trafic autoroutier.
- La simulation du trafic sur des autoroutes de grande envergure.
- La formulation et la résolution du problème de contrôle d'accès par la programmation dynamique.
- La formulation et la résolution d'une stratégie hiérarchisée à deux niveaux.
- La programmation et les tests de différentes stratégies de régulation locales et coordonnées.
- La visualisation graphique des états du trafic avec et sans régulation et sa présentation lors de journées portes ouvertes et événements destinés au grand public.
- Les évaluations de différentes stratégies de contrôle d'accès.
- la coopération pour le développement d'heuristiques pour le contrôle d'accès coordonné.
- L'accompagnement pour l'implémentation en temps réel de stratégies de contrôle d'accès isolé et coordonné

6. Perspectives

Le contrôle d'accès autoroutier est une méthode de régulation dont l'efficacité n'est plus à démontrer. Ceci peut être jugé par la multiplicité des implémentations et le nombre de kilomètres régulés à travers le monde. J'ai développé une expertise indéniable dans ce domaine, laquelle me permet d'accompagner de nouvelles études et implémentations en temps réel. Mon expertise dans ce domaine est fondée sur ma connaissance non seulement des techniques de contrôle d'accès, mais aussi des méthodes et outils de mesure, de modélisation et de régulation du trafic autoroutier. Cette connaissance me permet d'élargir déjà mon champ d'action à d'autres méthodes de régulation du trafic autoroutier, comme la gestion dynamique de voie, la régulation de la vitesse, la régulation des changements de voies et, à l'avenir, à toutes les nouvelles problématiques qu'offrent aujourd'hui les systèmes coopératifs et les véhicules autonomes très bientôt en circulation sur nos autoroutes.

7. Bibliographie

- [47] Abouaïssa, H., M. Fliess, C. Join. (2017). "On ramp metering: Towards a better understanding of ALINEA via model-free control". *Int. J. Contr.*, 90, pp: 1018- 1026.
- [48] Abouaïssa H., M. Fliess, V. Iordanova, C. Join (2012). "Freeway ramp metering control made easy and efficient". 13th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems (CTS 2012), Sep 2012, Sofia, Bulgaria. 2012).
- [49] Amini, N ; Aydos, C. ; Grzybowska, H. Wijayarathna, K.P ; Dixit, V. Waller, S T. (2016). "Network-wide Evaluation of the State-of-the-Art Coordinated Ramp Metering Solutions" TRB 2016 Annual Meeting. Washington DC, United States. 10-14 January
- [50] Canudas de Wit, C.;F. Garin, P. Grandinetti, J. Lygeros, C. Ramesh, M. Schmitt SPEEDD (Scalable Proactive Event-Driven Decision making). DEBS '17 Proceedings of the 11th ACM International Conference on Distributed and Event-based Systems. Barcelona, Spain — June 19 - 23, 2017. Pages 249-260

- [51] Carlson R.C., I. Papamichail, M. Papageorgiou, A. Messmer (2010). Optimal Motorway Traffic Flow Control Involving Variable Speed Limits and Ramp Metering Transportation Science. Volume 44. Issue 2, pp 238-253.
- [52] CERTU (2006), La régulation d'accès par feux. Une technique pour faire face à l'accroissement de la demande de trafic ? Les dossiers du CERTU, Rapport N°167.
- [53] Cohen S., Aron M., Pierrelée J.C. et Longeon R. (1989) SIMAUT, META: deux outils de simulation du trafic autoroutier. Concepts, Calibrage, Validation. Rapport INRETS N°108.
- [54] Ghods, A. H., Kian, A. R., & Tabibi, M. (2009). Adaptive freeway ramp metering and variable speed limit control: a genetic-fuzzy approach. Intelligent Transportation Systems Magazine, IEEE, 1(1), 27-36.
- [55] Guohui Z., Yin Hai Wang. (2013) An Innovative Coordinated Ramp Metering Control 1 Strategy for Freeway Congestion Mitigation 92st TRB Annual Meeting, Washington, D.C., January, 2013
- [56] Hegyi, S.P. Hoogendoorn (2015), Coordinated Ramp Metering Based on On-ramp Saturation Time Synchronisation. R.L. Landman, A. TRB Annual Meeting 2015.
- [57] Haj-Salem, H., M. Boukhniifer, Mabrouk, H., Mammam S. (2010) « Le contrôle d'accès généralisé sur les autoroutes de l'île de France : études en simulation et sur site réel ». 8^e Conférence Internationale de MODélisation et SIMulation - MOSIM'10, mai.
- [58] Haj-Salem, H. et M. Mangeas. (1998). OASIS: optimal advanced system for integrated strategies DACCORD workshop, université de Lancaster, Grande-Bretagne.
- [59] Haj-Salem, H. et M. Papageorgiou. (1995). Ramp metering impact on urban corridor traffic: Field results ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 29(4):303–319.
- [60] Hourdakis, J. and P. G. Michalopoulos. Evaluation of ramp control effectiveness in two twin cities freeways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1811, No. 1, Transportation Research Board, 2002, pp. 21–29.
- [61] Jacobson, L., K. Henry, and O. Mehryar. Real-Time Metering Algorithm for Centralized Control. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol.1232, No. 1, Transportation Research Board, 1989, pp. 17–26.
- [62] Karimi A.; A. Hegyi; B. De Schutter; H. Hellendoorn and F. Middelham. (2004) Integration of dynamic route guidance and freeway ramp metering using model predictive control. Proceedings of the 2004 American Control Conference, Boston, Massachusetts, pp. 5533–5538.
- [63] Kotsialos, A. and Papageorgiou, M. and Diakaki, C. and Pavlis, Y. and Middelham, F. (2002) 'Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET.', *IEEE transactions on intelligent transportation systems.*, 3 (4). pp. 282-292.
- [64] Kotsialos, A., M. Papageorgiou, M. Mangeas, and H. Haj-Salem. Coordinated and integrated control of motorway networks via non-linear optimal control. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 10, No. 1, Elsevier, 2002, pp. 65–84.
- [65] Kotsialos, A., M. Papageorgiou (2004) Motorway network traffic control systems. *European Journal of Operational Research* 152(2):321-333.
- [66] Kotsialos, A. et Papageorgiou. M. (2004). Efficiency and equity properties of freeway network-wide ramp metering with AMOC. *Transportation research Part C: Emerging technologies*, 12(6):401–420, 2004.
- [67] Kwon, E., S. Nanduri, R. Lau, and J. Aswegan. Comparative analysis of operational algorithms for coordinated ramp metering. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1748, No. 1, Transportation Research Board, 2001, pp.144–152.
- [68] Landman, R.L.; A. Hegyi, S.P. Hoogendoorn (2015) Coordinated Ramp Metering Based on On-ramp Saturation Time Synchronisation.. TRB Annual Meeting 2015
- [69] Lipp, L., L. Corcoran, and G. Hickman. Benefits of Central Control for Denver Ramp Metering System. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1320, No. 1, Transportation Research Board, 1991, pp. 3–6.
- [70] Lu X. Y., Pravin Varaiya, Roberto Horowitz, Dongyan Su, Steven E. Shladover, "A Novel Freeway Traffic Control with Variable Speed Limit and Coordinated Ramp Metering". 90th TRB Annual Meeting Washington, D.C. Jan. 23-27, 2011, TRB Paper # 11-3458.
- [71] MAGISTER : <http://www.grettia.ifsttar.fr/lInstitut/cosys/laboratoires/grettia/equipements-logiciels-bases-de-donnees/#c18718>
- [72] May, A.D., Athol P., Parker W. and Rudden J.B. (1963): Development and evaluation of congress street expressway pilot detection system. *TRB Record* N°21, pp48-46.
- [73] Papageorgiou M. 1983: Application of automatic control concepts to traffic flow modelling and control. Springer-Verlag, Ed. A.Y. Balakrishnan and M. Thoma.

- [74] Papageorgiou, M (1990). Dynamic modeling, assignment, and route guidance in traffic networks. *Transportation Research Part B: Methodological*. Volume 24, Issue 6, Pages 471-495
- [75] Papageorgiou, M. Bloussville, J.M., Haj-Salem, H. (1990), Modelling and real-time control of traffic flow on the southern part of Boulevard Périphérique in Paris- Part II. *Transportation Research Part A*. Volume 24, Issue 5, 1990, Pages 361-370.
- [76] Papageorgiou, M. Bloussville, J.M., Haj-Salem, H. (1991) : ALINEA: a local feedback control law for on ramp metering. TRB 70th Annual Meeting. 13-17 January, Washington, DC.
- [77] Papageorgiou, M.; Kotsialos, (2003), A. Freeway Ramp Metering: An Overview. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Dearborn (MI), USA October 1-3, 2000. Pp 228-239.
- [78] Papamichail, I. and M. Papageorgiou. Traffic-responsive linked ramp-metering control. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 9, No. 1, IEEE, 2008, pp. 111–121.
- [79] Papamichail, I., M. Papageorgiou, V. Vong, and J. Gaffney. Heuristic ramp-metering coordination strategy implemented at monash freeway, australia. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 2178, No. 1, Transportation Research Board, 2010, pp. 10–20.
- [80] Rezaee.K., B. Abdulhai and H. Abdelgawad. (2015) "Decentralized Coordinated Optimal Ramp Metering: Application to the Gardiner Expressway in Downtown Toronto". TRB 2015 Annual Meeting
- [81] Shaaban K., M. A. Khan and R. Hamila (2016) Literature Review of Advancements in Adaptive Ramp Metering. The 7th International Conference on Ambient Systems, Networks and Technologies (ANT 2016). *Procedia Computer Science* 83 (2016) 203 – 211
- [82] Stephanedes, Y., Implementation of On-line Zone Control Strategies for Optimal Ramp Metering in the Minneapolis Ring Road. In 7th Int. Conf. Road Traffic Monitoring Control, 1994, pp. 181–184.
- [83] Su, D. X.Y. Lu, P. Varaiya, S. E. Shladover (2011) Variable Speed Limit and Ramp Metering Design for Congestion Caused by Weaving. 90th TRB Annual Meeting. Washington D. C.
- [84] Wang J. J. and A. D. May, "Computer model for optimal freeway on-ramp control," in *Highway Research Rec.*, 1973, No. 469, pp. 16–25.
- [85] Xu, J., Zhao, X., & Srinivasan, D. (2013). On optimal freeway local ramp metering using fuzzy logic control with particle swarm optimisation. *IET Intelligent Transport Systems*, 7(1), 95-104.
- [86] Yu, X. F., Xu, W. L., Alam, F., Potgieter, J., & Fang, C. F. Genetic fuzzy logic approach to local ramp metering control using microscopic traffic simulation. In *Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 2012 19th International Conference (pp. 290-297). IEEE
- [87] Zhang, Y. and P.A. Ioannou,(2017). Coordinated Variable Speed Limit, Ramp Metering and Lane Change Control of Highway Traffic, *IFAC*. Volume 50, Issue 1, Pages 5307-5312,
- [88] Zhang, L. and D. Levinson. Optimal freeway ramp control without origin–destination information. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol. 38, No. 10, Elsevier, 2004, pp. 869–887.
- [89] Zhang G. and Y. Wang (2013) An Innovative Coordinated Ramp Metering Control 1 Strategy for Freeway Congestion Mitigation 92st TRB Annual Meeting, Washington, D.C., January, 2013

8. Mes publications pour ce chapitre

- [LB. 1]. **Bhouri, N.**, M. Aron, H. Haj-Salem, A Data Driven Approach For Estimating The Fundamental Diagram. *PROMET - Traffic&Transportation (Scopus H1.10)*, under revision.
- [LB. 2]. **Bhouri N.**, H. Haj-Salem and J. Kauppila, Isolated versus Coordinated Ramp metering: Field Evaluation Results of Travel Time Reliability and Traffic Impact, *Transportation Research Part C*. Novembre 2011. (JCR IF, 3,075),
- [LB. 3]. **Bhouri, N.** "Comparaison entre deux stratégies de contrôle d'accès appliquées au Boulevard Périphérique de Paris". *Revue Recherche - Transports - Sécurité* n°28, décembre 1990. (SCOPUS, H1.8)
- [LB. 4]. Haj Salem, H., N. Farhi, J. P. Lebacque, **N. Bhouri**; Development of Coordinated Ramp-Metering based on Multi-Objective Nonlinear Optimization Technique: traffic and safety. *Advanced concepts, methodologies and technologies for transportation and logistics*". *Springer Series "Advance in Intelligent Systems and Computing*.
- [LB. 5]. Haj Salem H., Mammari S., **Bhouri N.**: « Isolated VS coordinated ramp metering strategies: Field evaluation results in France », EWGT2009, 23 – 26 Sept, 2009, Padua , Italy.
- [LB. 6]. **Bhouri, N.**, H. Haj-Salem, "Motorway Ramp Metering as a tool for improving the travel time reliability", 13th European Working Group in Transportation Conference (EWGT), Padua, Italy, 23-25 september 2009

- [LB. 7]. **Bhouri, N.** *"Une stratégie du contrôle d'accès autoroutier fondée sur la théorie de l'optimisation"*, 3^{ème} Colloque Maghrébin sur les modèles numériques de l'ingénieur, pp. 249-254, 26-29 novembre 1991, Tunis, Tunisie.
- [LB. 8]. **Bhouri, N.** et M. Papageorgiou *"Application of control theory to regulate traffic flow on periurban ringways"* ATT in Transportation Engineering, pp. 177-182, août 1991, Minneapolis, U.S.A.
- [LB. 9]. **Bhouri, N.**, M. Papageorgiou et J.M. Blosseville *"Optimal control of traffic flow on periurban ringways with an application to the Boulevard Périphérique in Paris"* IFAC, 11th World Congress, 13-17 août 1990, Tallinn, URSS.
- [LB. 10]. M. Papageorgiou, H. Haj-Salem, J.M. Blosseville et **N. Bhouri** *"Modelling and real time control of traffic flow on the Boulevard Périphérique in Paris"* IFAC/IFIP/IFORS International Symposium CCCT'89, septembre 1989, Paris.
- [LB. 11]. **Bhouri, N.**, J.M. Blosseville et M. Papageorgiou *"Simulation et visualisation graphique du trafic"* Conférence internationale et exposition sur l'informatique graphique pour la défense, l'administration et les grands projets, 13-16 juin 1989, Paris.

Chapitre C : Régulation du trafic urbain multimodal

1. Préliminaires

Equation Chapter 3 Section 1 Les années 1990 ont correspondu à une prise de conscience mondiale des inconvénients des habitudes de consommation massive et de gaspillage prises après la seconde guerre mondiale. Pour le trafic, l'espoir d'éradiquer la congestion est révolu. On se heurtait même à un cercle vicieux : plus on améliorait la circulation, plus le nombre de véhicules en circulation augmentait ! Il fallait donc trouver le moyen de limiter l'usage de l'automobile plutôt que de l'encourager. Cependant, une politique de transport visant à éliminer la voiture n'était plus possible. En effet, la périurbanisation avait introduit une modification des modes de vie des habitants des agglomérations et notamment de leurs pratiques de mobilité. L'allongement des distances qui en résultait induisait un fractionnement des déplacements, même réguliers, par l'enchaînement de plusieurs activités. Les transports en commun peinaient à satisfaire entièrement ces nouveaux comportements. Malgré son impact environnemental, c'est la voiture particulière qui satisfaisait ces déplacements plus longs et plus diffus.

Ce constat a fait émerger, au niveau international, l'idée d'un transport intermodal, où serait favorisée la complémentarité plutôt que la concurrence. On agit pour l'organisation et l'articulation de l'offre de transport afin de coordonner les différents modes. Sur le plan national, cette idée s'est concrétisée par la LAURE (Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie) du 30 décembre 1996 imposant aux villes de plus de cent mille habitants d'établir un Plan de déplacements urbains (PDU).

Dans ce but, la régulation de la voirie, auparavant considérée comme dédiée à la voiture particulière, s'est progressivement ouverte au transport collectif et aux modes actifs, donnant naissance à la régulation multimodale.

Notons que le terme multimodalité fait référence à l'usage (ou le traitement en cas d'un système) de modes de transport différents selon l'heure, la destination ou le motif du déplacement. Le terme est parfois utilisé quand seuls les acteurs sont différents, par exemple usage différencié de bus de différentes compagnies. J'utilise ce terme dans mes recherches sur la régulation où les modes concernés sont ceux de la voiture particulière (VP) et du transport en commun (TC), qui est souvent le bus. Dans ces systèmes, les piétons sont pris en compte de manière indirecte, puisque leurs temps de traversée des carrefours interviennent comme contraintes sur les temps de verts des courants antagonistes.

Les premières actions de régulation multimodale consistaient en une simple prise en compte des véhicules de transport collectif dans les stratégies de régulation des feux. On parle alors de systèmes munis d'une priorité aux bus. Quant à moi, j'ai privilégié dans mes recherches une prise en compte des transports en commun sur la totalité d'un réseau. L'avantage du réseau ou d'une étendue importante est double. Il offre la possibilité de prendre en compte la coordination des différents carrefours entre eux et de réguler les bus de manière cohérente pour leur avancement tout au long de leur itinéraire. Par ailleurs, toute action locale sur les feux d'un carrefour peut avoir des répercussions sur le trafic bien au-delà de ce carrefour. Par exemple, en situation de forte densité de trafic, une action locale de priorité peut alimenter des sections de voirie ou des carrefours congestionnés et contribuer à dégrader encore la situation. Les bus, qui partagent la même infrastructure que les voitures, peuvent donc aussi être pénalisés. Pour pallier cet inconvénient, les actions locales de priorité sont généralement désactivées en cas de trafic trop dense. Il restait donc là un réel champ de recherches sur la régulation du trafic urbain multimodal, ce qui a induit ma décision de m'y investir.

2. Problématiques de mes recherches

La problématique de recherche que j'ai traitée dans ce chapitre concerne l'amélioration des conditions de circulation des transports en commun de surface par action sur les feux aux intersections. Vu les interactions entre véhicules particuliers et transports en commun empruntant les mêmes voies, j'ai considéré cette problématique dans un cadre bimodal ou plutôt multimodal si l'on tient compte aussi des piétons (j'ai développé des stratégies de régulation où je considère les piétons de manière indirecte).

J'ai également traité la problématique de régulation pour des zones urbaines de grande étendue. Parce qu'une action au niveau d'une intersection ou d'un nombre limité d'intersections peut certes améliorer la circulation au niveau local, mais la dégrader en amont ou en aval de la zone régulée.

J'ai fait des propositions méthodologiques et des développements numériques que j'ai réalisés soit en collaboration avec des collègues, soit en encadrant des étudiants en thèse ou en stage. J'ai privilégié en premier la commande en boucle fermée en développant des stratégies fondées sur la commande linéaire quadratique. Puis j'ai posé la problématique dans un cadre multi-objectifs. J'ai privilégié la régulation multi-objectifs en utilisant la commande prédictive à base de modèle qui permettait une modélisation non linéaire, plus précise. Par la suite, devant la difficulté de modélisation d'un réseau multimodal de grande étendue, pour lequel une modélisation macroscopique du réseau VP est suffisante, mais une modélisation microscopique des TC nécessaire, j'ai proposé des stratégies fondées sur les systèmes multi-agents. Dans ce cas, la régulation multimodale est obtenue grâce à des mécanismes de négociations et/ou de collaborations. Enfin, pour l'évaluation, j'ai privilégié des logiciels de simulation microscopique, Dynasim et par la suite SUMO.

Contenu de ce chapitre

Dans la suite du document, je commence par une section sur les objectifs et les enjeux d'une priorité aux feux pour les autobus. Je présente dans la quatrième section une classification des systèmes de régulation en fonction de leur mode de prise en compte des bus. La cinquième section est composée de quatre paragraphes qui explicitent la stratégie NeTPrior (Network Transit Priority) qui consiste en une commande Linéaire Quadratique des durées de vert dans tout un réseau, favorisant, de manière dynamique, les arcs supportant les bus. Je présente par la suite la variante qui a été développée dans la thèse de Nadir Farhi, laquelle consiste en un asservissement autour d'une consigne obtenue à partir de la résolution d'un problème d'affectation suivant l'équilibre de Wardrop. Les sections sept et huit concernent la commande prédictive à base de modèle, premièrement avec le même modèle macroscopique pour pouvoir profiter de la linéarité du modèle. Puis la stratégie MPC (Model predictive control strategy) développée dans la thèse de Sofiane Kachroudi. Cette huitième section, détaille premièrement le modèle multimodal, qui consiste en un modèle non linéaire macroscopique pour la VP et microscopique pour le TC. Deuxièmement le critère d'optimisation multi-objectifs, par la suite la méthode d'optimisation métaheuristique, par essaim particulaire et enfin quelques résultats. Dans la neuvième section de ce chapitre, je présente la stratégie ASUR (Agent based Strategy for URban traffic network). Ma motivation de l'usage des systèmes multi-agents étant d'apporter une meilleure solution pour la combinaison des aspects macro et microscopique, j'explique cet aspect dans cette neuvième section, ainsi que le rôle de chaque agent et leurs méthodes de négociation pour aboutir à une régulation multimodale. La dixième section concerne encore la régulation multimodale à l'aide des systèmes multi-agents, mais on se place cette fois-ci dans le cas d'environnement de systèmes coopératifs. Ce problème, a été résolu dans la thèse de Matthis Gaciarz par l'allocation d'une date d'admission à chaque véhicule approchant une intersection. Je donne également dans cette section une brève description du mécanisme, qui s'appuie sur un modèle d'argumentation par lequel les agents cherchent à atteindre un accord collectif en faisant des concessions. La onzième section est consacrée aux travaux de thèse de Dihya Atamani qui a exploré la régulation des déplacements

multimodaux par le biais de l'information aux voyageurs et l'utilisation des véhicules autonomes. Il s'agissait de développer un système dynamique d'aide aux déplacements dans un réseau de transport multimodal pour les voyageurs équipés d'un système d'information et qui prend en considération les usagers non équipés de ce type de système. Les évaluations ont été conduites sur l'impact de l'information, sur les coûts des itinéraires, l'impact de la réorientation des usagers vers les transports en commun circulant sur le réseau routier, ainsi que l'intérêt de passer à des véhicules autonomes. Enfin, la douzième section de ce chapitre est consacrée à la modélisation microscopique du trafic, premièrement avec le modèle Dynasim, puis avec le modèle SUMO.

3. Objectifs et enjeux d'une priorité aux feux pour les autobus

Pour les exploitants de transport en commun, le temps de parcours des véhicules sur un tracé donné peut être augmenté si nécessaire pour la régulation, mais ne peut être diminué. Par contre, si l'on adopte un point de vue plus large qui inclut les actions sur les feux, l'augmentation de la vitesse commerciale peut devenir un objectif accessible. Y a-t-il d'autres objectifs que la priorité aux bus puisse satisfaire ? Quels gains potentiels peut-on attendre d'une telle priorité aux feux ?

Le temps de course, défini comme une succession d'horaires de passage entre deux terminus, comprend différents éléments : les temps d'arrêt aux stations, les temps de battement aux terminus (qui représentent une à deux fois l'écart type du temps passé en trajet), les temps d'attente aux feux, le temps de roulement, comprenant notamment les temps cumulés de décélération et d'accélération qui découlent des arrêts.

D'après un rapport du STIF [129], on considère qu'en facilitant le passage aux feux aux véhicules de transport en commun, on pourrait agir, en moyenne, sur 40% de ce temps de course, dont les temps d'attente aux feux (17%), les décélérations/accélération (15%) et le temps de battement qui, par une meilleure régularité, se trouverait réduit. Un autre rapport CERTU [7] estime qu'entre 20 et 30% du temps est perdu en attente aux feux ou en ralentissements dans la circulation. En termes de gains potentiels, donner la priorité aux véhicules de transport en commun est donc loin d'être négligeable.

D'autre part, favoriser les véhicules de transport en commun en leur donnant la priorité aux feux peut avoir des effets bénéfiques sur de nombreux aspects. En réduisant le nombre et la durée de leurs arrêts aux feux, on fait baisser le temps total de parcours sur l'itinéraire et la vitesse commerciale s'en trouve augmentée. La régularité des temps de parcours et la régularité de passage aux arrêts commerciaux (adéquation avec l'horaire théorique ou écart quasi constant entre deux passages successifs) peuvent être améliorées. Le confort des usagers et leur confiance dans le mode collectif s'en trouvent accrus : véhicules plus rapides et plus réguliers, donc également moins chargés, circulant avec moins d'accélération et de décélération. Enfin des aspects économiques et environnementaux découlent directement de ces différents éléments. La diminution des temps de parcours permet, à qualité de service constant, de diminuer la quantité de ressources nécessaires (véhicules et chauffeurs) ou, à moyens constants, d'améliorer la qualité de service par l'augmentation du nombre de courses dans les missions, donc d'accroître la fréquence de passage des véhicules. En ce qui concerne les gains énergétiques et le moindre rejet de polluants dans l'atmosphère, on ne peut évidemment se contenter de prendre en compte les seuls véhicules de transport en commun. Devant concerner la totalité du trafic, un bilan en la matière sera dégradé par d'éventuelles répercussions négatives sur le transport individuel. Cependant, si la stratégie de régulation traite conjointement les véhicules particuliers et collectifs, on peut espérer un résultat bénéfique pour les deux.

4. Classification des systèmes de régulation en fonction de leur mode de prise en compte des bus

Une stratégie de régulation des feux munis d'une priorité en faveur du transport collectif peut être considérée comme l'assemblage de deux algorithmes, parfois indissociables. Le premier concerne la régulation du trafic indépendamment des modes, sur la base des flux du trafic global. Le second concerne la manière dont les véhicules de transport en commun sont finalement pris en compte dans la commande des feux qui est appliquée sur le terrain.

Nous proposons dans cette partie une classification des stratégies exclusivement fondée sur leur façon de favoriser le transport en commun (Figure 20). Si une stratégie multimodale est globale, étendue à tout un réseau, mais locale, limitée à un carrefour, pour la prise en compte des véhicules de transport en commun, elle sera étiquetée comme locale dans cette classification.

Donner aux véhicules de transport en commun la priorité aux feux de signalisation peut s'opérer de manière passive ou active. Cela consiste dans le premier cas à favoriser les voies où passent des bus, sans détection individuelle de ces derniers. La seconde, appelée également priorité dynamique, consiste à modifier en temps réel les feux du carrefour pour permettre à un ou plusieurs véhicules de transport en commun détectés de passer plus rapidement.

On peut subdiviser les systèmes dynamiques selon l'étendue géographique de leur action de priorité aux bus. Celle-ci peut être locale si elle porte uniquement sur les feux du carrefour en aval du bus, par zone si elle porte sur quelques carrefours, ou globale si elle concerne tous les carrefours régulés et que leur nombre n'est pas limité (éventuellement une ville entière).

Enfin, indépendamment de l'étendue, on distingue encore deux familles parmi les stratégies actives selon la méthode utilisée pour donner la priorité. Dans la première, la priorité est accordée sur la base d'une optimisation, qui consiste à intégrer un critère de satisfaction concernant un ou plusieurs bus au critère global d'écoulement du trafic, puis à optimiser ce critère agrégé. Dans la seconde, la méthode, dite hors optimisation, à base de règles ou encore micro-régulation, consiste à prendre en compte directement la position d'un bus pour construire une plage de vert coïncidant avec sa date d'arrivée au feu. Lorsque cela n'est pas possible, on recherche une modification des feux qui réduise au maximum son temps d'attente. Cette méthode consiste à utiliser des règles permettant de distordre le phasage prévu des feux afin de prendre en compte un bus.

Par ailleurs, nous avons ajouté à cette classification des différents systèmes une information relative à la manière dont y est conçue la régulation du trafic global (Figure 20). Certains systèmes comme TRANSYT [43] établissent un plan de feux de toutes pièces. D'autres apportent des modifications en temps réel à un plan de feux préétabli afin de l'adapter aux conditions de circulation et à la présence éventuelle de véhicules de transport en commun. Ceux-ci ne modifient en général pas l'ordre des phases de trafic et utilisent souvent une durée de cycle fixe. Ils peuvent donc agir sur les durées de vert dans le cycle et éventuellement sur le décalage entre les carrefours (lorsqu'ils en contrôlent plusieurs). Parmi ces systèmes, on mentionnera SCOOT [16], SCATS [6], TUC [13] et NeTPrior [LB. 39]. Enfin, une troisième famille est constituée de commandes adaptatives qui établissent continuellement la couleur des feux sur un horizon de temps glissant. Il s'agit, entre autres, des systèmes CRONOS [3], OPAC [24], PRODYN[29], SPPORT [15] et UTOPIA [37]. Une synthèse de la plupart de ces méthodes est présentée dans [5].

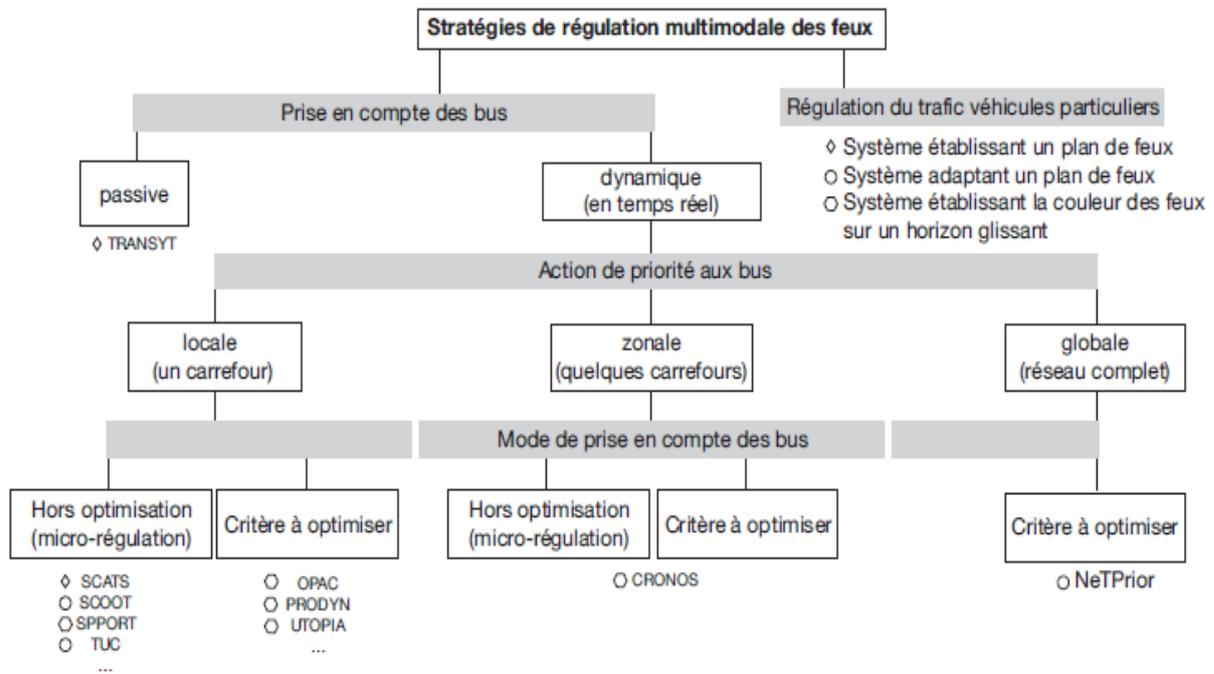


Figure 20 : Classification des stratégies de régulation multimodale en fonction de leur mode de prise en compte des véhicules de transport en commun

On peut remarquer que, dans les systèmes temps réel, la manière dont la priorité est accordée aux véhicules de transport en commun est corrélée à la méthode de régulation du trafic général.

Les systèmes qui gèrent le trafic en adaptant des plans de feux préétablis accordent la priorité aux véhicules de transport en commun sur la base de règles préétablies (la micro-régulation décrite en § 4.1), mis à part le système NeTPrior qui accorde la priorité sur la base d'un critère à optimiser.

Les systèmes qui établissent la couleur des feux sur un horizon de temps glissant accordent la priorité aux véhicules de transport en commun après optimisation d'un certain critère. CRONOS est un peu particulier, car il allie la prise en compte des bus dans le critère à optimiser à une méthode fondée sur la modification des contraintes avant optimisation qui est plus proche d'une priorité sur la base de règles.

Plateformes multimodales

La fin des années 1990 a vu également le développement de plusieurs projets de plateforme multimodale. Nous pouvons citer la plateforme multisite et multisource Claire-SITI, développée à l'INRETS [46], le projet ENTERPRICE développé à Cologne [41], [35], le projet MOBINET développé à Munich [33], le projet 5T-TITOS développé à Turin [20], etc.

Ces plateformes visent à mettre à la disposition des opérateurs et des usagers des transports des outils informatiques pour l'information et l'aide à la décision en matière de transport multimodal. Tous ces systèmes se sont intéressés à la concentration et à la fusion des données des différentes sources [LB. 36]. Les réalisations qui produisent des services différents d'un projet à un autre. MOBINET et ENTERPRICE ont privilégié l'élaboration d'une information multimodale à valeur ajoutée. Certaines plateformes proposent des fonctions de régulation, souvent monomodales, à l'exception de la plateforme SITI dotée du puissant système de régulation multimodale CLAIRE-SITI.

CLAIRE-SITI s'appuie, d'une part, sur un système de traitement de la congestion des réseaux routiers urbains appelé CLAIRE et, d'autre part, sur le système SATIR d'aide au régulateur des transports publics en cas de perturbation [1]. La fusion, en 2003, des dernières versions de CLAIRE et SATIR a permis d'aboutir au concept générique CLAIRE-SITI de supervision multimodale des réseaux.

Plusieurs applications temps réel de CLAIRE-SITI ont montré des gains importants sur les conditions de la circulation multimodale. On a obtenu ainsi une réduction du temps de parcours des véhicules particuliers de 10 à 20% à Toulouse et une amélioration du temps de parcours des bus jusqu'à 20% à Rennes, etc. [46]. En plus de ses capacités en régulation, Claire-Siti possède des fonctions temps réel de supervision multicritère des réseaux de transport au niveau de l'interprétation, du diagnostic, de l'information voyageurs et de la décision ; et des fonctions temps différé d'observatoire et d'analyse des performances et des perturbations affectant les réseaux de transport. Sa plus grande force réside sans doute dans son modèle générique des données, capable de décrire les interactions entre les différents réseaux de transport à travers un graphe unique [43]. Ce sont ces capacités d'intégration de données et supervision des réseaux que j'exploiterai dans le projet INDIRA_B pour évaluer la qualité de service des transports en commun (voir chapitre 3).

5. Commande Linéaire Quadratique

L'idée dans la stratégie de régulation NetPrior que j'ai développée, en partie avec Pablo Lotito, Post-doctorant à l'INRETS à l'époque, est d'utiliser la puissance de la commande en boucle fermée pour réguler conjointement le trafic des véhicules particuliers et des transports en commun. L'objectif fixé est de déterminer les durées de vert de tous les feux du réseau suivant les conditions du trafic (les véhicules particuliers et les véhicules de transport en commun présents sur chaque arc). NetPrior considère un cycle de feux fixe. Les décalages entre les carrefours et la séquence des phases sont connus.

Cette stratégie utilise la même philosophie que la stratégie TUC [11]. Elle détermine la commande optimale en se fondant sur la théorie de commande linéaire quadratique (LQ). L'avantage de cette méthode réside dans le calcul préalable d'une matrice (la matrice de Riccati) qui permet d'alléger considérablement les calculs. Ce système peut ainsi traiter en temps réel des réseaux de grande taille. Les durées des feux sont calculées sur la base des mesures, en temps réel, du nombre total de véhicules et du nombre de véhicules de transport en commun présents sur chaque arc du réseau. La commande est calculée de manière à donner des durées de feu vert suffisantes pour évacuer les bus des arcs où ils sont, au moment où ils y sont.

5.1.1 Principes généraux

Le modèle de NetPrior est constitué de deux équations, l'une pour le trafic général sur les arcs, l'autre pour le transport en commun.

Le trafic des véhicules particuliers est modélisé par la même équation de conservation du nombre de véhicules que dans la stratégie TUC (équation 1) :

$$X_a(k+1) = X_a(k) + Q_a(k) - U_a(k) \quad (C.1)$$

où $X_a(k)$ est le nombre de véhicules sur l'arc a à l'instant kT , T étant l'intervalle d'échantillonnage pris égal au cycle des feux $Q_a(k)$ (resp $U_a(k)$) le débit entrant sur l'arc a (resp. sortant de l'arc a) entre kT et $(k+1)T$. Ces débits seront exprimés en fonction des durées de vert ($G_a(k)$) et des débits de saturation suivant la méthode classique *Store and Forward*.

Le trafic de transport collectif est modélisé, ligne par ligne, par une équation de retard : connaissant les itinéraires des lignes de transport en commun, la progression sur la ligne b_i de transport collectif est donnée par :

$$x_a^{b_i}(k) = x_{a'}^{b_i}(k - \zeta_a^i) \quad (C.2)$$

où $x_a^{b_i}(k)$ est le nombre de véhicules de transport en commun de la ligne b_i sur l'arc a au $k^{\text{ème}}$ cycle de feux, a' est l'arc précédant l'arc a pour la ligne b_i , et ζ_i est un paramètre qui exprime le temps moyen de déplacement des véhicules sur la ligne b_i à partir de l'arc a' jusqu'à l'arc a . Ces valeurs ont normalement des valeurs réelles, Cependant pour des raisons évidentes de commande ζ_i doit être un entier, ce qui signifie que le temps de parcours du bus doit être un multiple de l'intervalle d'échantillonnage T . On considère dans ce travail ζ_i égal à 1 si la ligne de bus n'a pas de station sur l'arc a , sinon ζ_i est égal à 2. En écriture matricielle, ceci donne:

$$X^b(k+1) = A_0^b X^b(k) + A_1^b X^b(k-1) \quad (C.3)$$

où A_0^b est la matrice d'adjacence correspondant à la ligne de bus pour les arcs sans arrêts, A_1^b est celle correspondant à la ligne de bus pour les arcs avec un arrêt, et $X^b(k)$ est le vecteur de nombres de bus sur chaque arc. L'écriture de la formule peut être encore simplifiée, en ajoutant si nécessaire des variables d'état supplémentaires:

$$X^B(k+1) = A^b \cdot X^B(k) \quad (C.4)$$

où X^B est le vecteur rassemblant $X^b(k)$ et $X^b(k-1)$ et A^b est la matrice à quatre blocs donnée par l'équation (C.5).

$$A^b = \begin{pmatrix} A_0^b & A_1^b \\ I & 0 \end{pmatrix} \quad (C.5)$$

La dynamique du système voiture particulière et bus est donc représentée par l'équation (C.6) :

$$X(k+1) = AX(k) + BG(k) \quad (C.6)$$

où A est une matrice de dimension $(N+2N_b) \times (N+2N_b)$. N étant le nombre d'arcs dans le système, N_b le nombre d'arcs traversés par les lignes de transport public. La matrice B est composée de deux blocs, le premier est défini par l'équation (C.4), le deuxième est nul.

Avec ces matrices, il est clair qu'il ne sera pas possible de commander le transport en commun à cause du bloc nul de la matrice B . Cependant, ceci répond à notre objectif d'agir de telle façon que le bus puisse se conformer à leurs horaires.

Critère d'optimisation

L'objectif principal retenu est de minimiser le trafic sur tous les arcs, encore plus pour les arcs parcourus par des lignes de transport en commun, au moment où y passent des bus et proportionnellement à leur nombre. Ceci se traduit par le critère suivant :

$$\min_G J(G) = \sum_k \left[\alpha (X(k)' X^b(k)) + \beta \|X(k)\|^2 + \gamma \|G(k)\|^2 \right] \quad (C.7)$$

Le premier terme des critères ($X(k)' X^b(k)$) met en avant les conditions de circulation sur les arcs traversés par les bus au moment où ces véhicules sont présents sur ces arcs. Le deuxième terme vise à réduire le nombre de véhicules sur chaque arc du réseau. Le dernier terme est utilisé afin d'éviter de grandes variations de la commande (durées des feux verts). α , β et γ sont des paramètres positifs pour garantir l'existence d'une solution et son unicité si β et γ sont non nuls. Le choix des valeurs de ces paramètres permet de modifier l'objectif de la régulation. Par exemple, pour $\alpha = 0$, $\beta = \gamma = 1$, la stratégie est équivalente à TUC, qui ne tient pas compte de la présence des bus. D'autre part, un paramètre α significatif ($\alpha \gg \beta$) pénalisera fortement les arcs où il n'y a pas de bus.

Comme nous allons le voir avec les résultats numériques, nous avons proposé différentes variantes suivant les valeurs de ces paramètres, y compris la combinaison de deux critères différents.

Loi de commande

Le problème du contrôle optimal consiste à minimiser le critère quadratique donné par l'équation (C7) et la dynamique du système donnée par les équations (C.3) et (C.6). Afin de s'affranchir des débits d'entrée et de sortie, nous définissons comme dans [14][11], un temps de vert nominal G^N qui est solution de l'équation $BG^N = 0$. Dans ce cas, l'état nominal correspondant est constant et nous pouvons écrire l'équation de commande:

$$X(k+1) = AX(k) + B\Delta G(k) \quad (C.8)$$

où $\Delta G(k) = G(k) - G^N$ représente la déviation par rapport à l'état nominal.

La commande LQ du système est donnée par l'équation (C.9)

$$G(k) = G^N - FX(k) \quad (C.9)$$

où F est la matrice de commande suivante :

$$F = (R + B^T P B)^{-1} B^T P A \quad (C.10)$$

et P la matrice de Riccati donnée par l'équation suivante:

$$P = Q + A^T P A - A^T P B F. \quad (C.11)$$

Si l'on applique l'équation (C.10) aux instants (k et $k-1$) par simple soustraction, on obtient:

$$G(k) - G(k-1) = -F(X(k) - X(k-1)) \quad (C.12)$$

Notons que le choix d'un horizon de temps infini dans l'équation (C.7) implique que la matrice de Riccati P soit indépendante du temps. Ce choix est justifié par la volonté d'une commande temps réel des feux des carrefours, ce qui impose la simplification des calculs pour chaque commande. Il présente néanmoins l'inconvénient d'obliger à considérer une moyenne temporelle du critère, ce qui réduit l'importance de notre principal objectif qui est de réduire le *nombre de véhicules sur les arcs aux instants où les véhicules TC s'y trouvent*. D'où notre idée de tester différentes stratégies suivant que l'on utilise une seule matrice de Riccati ou une combinaison de matrices, chacune d'elle étant calculée pour un état différent du système.

Stratégie combinée (COMB ou Mixte)

Les stratégies diffèrent par les critères caractérisant la présence ou non d'un véhicule bus sur l'arc. La première ne tient pas compte des bus (c'est la stratégie TUC, $\alpha=\beta$), appelons F_1 cette matrice, tandis que la seconde en tient compte très fortement ($\alpha \gg \beta$), soit F_2 la matrice correspondante. L'équation de commande s'écrit alors :

$$Gk = Gnom + (\lambda Pk F1 + (I - \lambda Pk) F2)(Xk - Xk - 1) \quad (C.13)$$

où P_k est une matrice diagonale dont chaque élément vaut 1 si, à l'instant k , un bus se trouve sur l'arc correspondant et λ est un paramètre à fixer pour diminuer encore la congestion (voir la section Expériences numériques pour plus de détails).

Les contraintes

Comme dans [14], ce problème a été résolu par une projection des valeurs des commandes qui ne respectent pas les contraintes sur les valeurs les plus proches. On résout donc un problème d'optimisation sous contraintes :

$$\text{Minimiser } J = \min_{\bar{G}} \sum_{i \in P_j} (G_{j,i} - \bar{G}_{j,i})^2 \quad (C.14)$$

En respectant :

$$\sum_{i \in P_j} G_{j,i} + R_j = C$$
$$G_{j,i,min} \leq G_{j,i}(k) \leq G_{j,i,max}$$

Résultats

Nous avons testé la stratégie pour différentes configurations :

- la stratégie TUC [14] ;
- PPT : stratégie favorisant légèrement les bus ; les paramètres α et β de l'équation (C.7) sont tous les deux égaux à un ;
- PFPT : stratégies favorisant plus fortement les bus ; α est nettement supérieur à β ;
- Stratégie combinée ou mixte ;
- Pr-L1 : stratégie favorisant les arcs où passe le bus L1 ; les valeurs de α sont égales à 400% de β ;
- PrArc5 : seul l'arc 5 est favorisé.

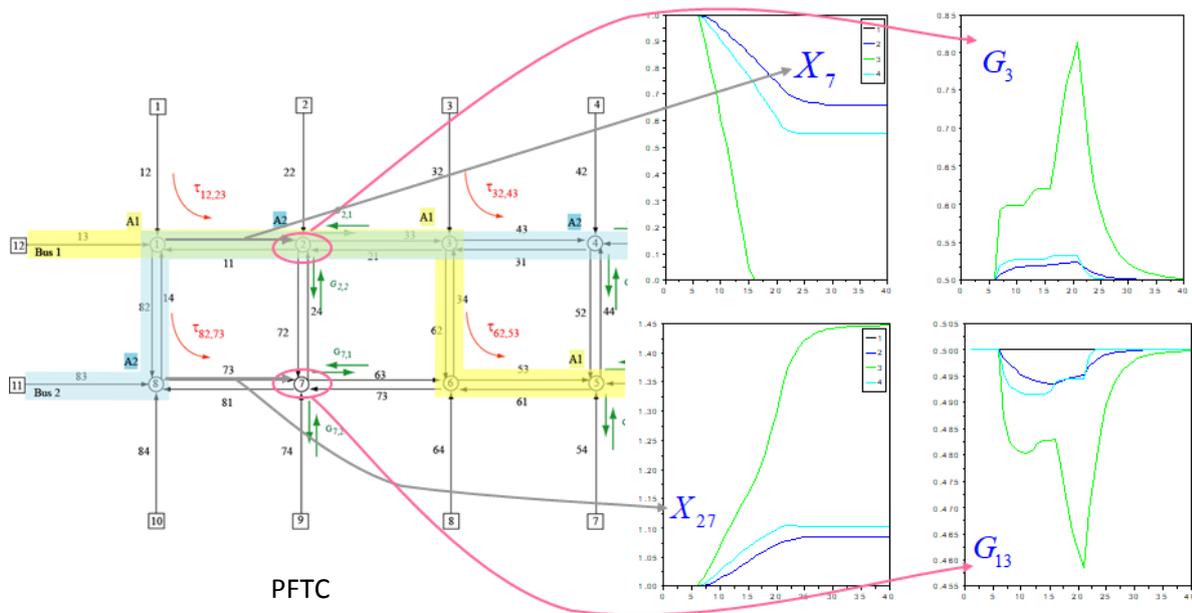


Figure 21 : Comparaison des résultats pour différents paramètres du critère sur des axes avec et sans bus

Différents tests et analyses de la stratégie, du point de vue de la performance de l'optimisation, influence des valeurs des paramètres sur l'optimisation, (voir [LB. 33] [LB. 35]).

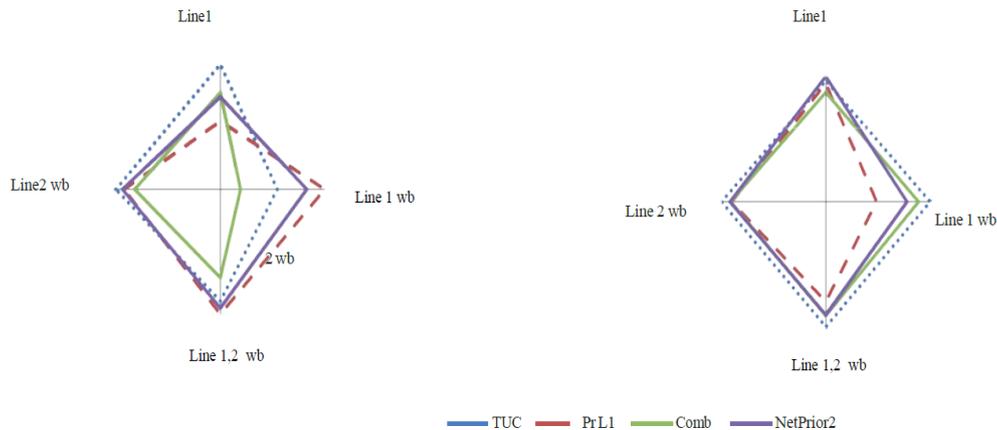


Figure 22 : Représentation multicritères de différentes variantes de NetPrior

Comb est la stratégie combinant PrL1 et TUC; NetPrior est la stratégie mixte décrite par l'équation (A.13).

Les figures (Figure 21 et Figure 22) donnent les résultats de différentes variantes de la stratégie en ce qui concerne l'impact sur le trafic général. L'analyse de ces résultats montre que la meilleure stratégie du point de vue des transports en commun consiste à favoriser fortement les bus ($\alpha \gg \beta$). Nous pouvons également choisir de favoriser une ligne de transport en commun par rapport aux autres. Cependant, dans tous ces cas, l'impact sur l'amélioration du trafic général est très faible, voire négatif. Ceci s'explique par le fait que la stratégie pénalise beaucoup les VP qui prennent les arcs non traversés par les bus. La Stratégie Mixte permet cependant de trouver un bon compromis, favorisant les TC tout en régulant le trafic global. Cette stratégie est réaliste du point de vue de sa mise en oeuvre et les résultats numériques montrent son efficacité.

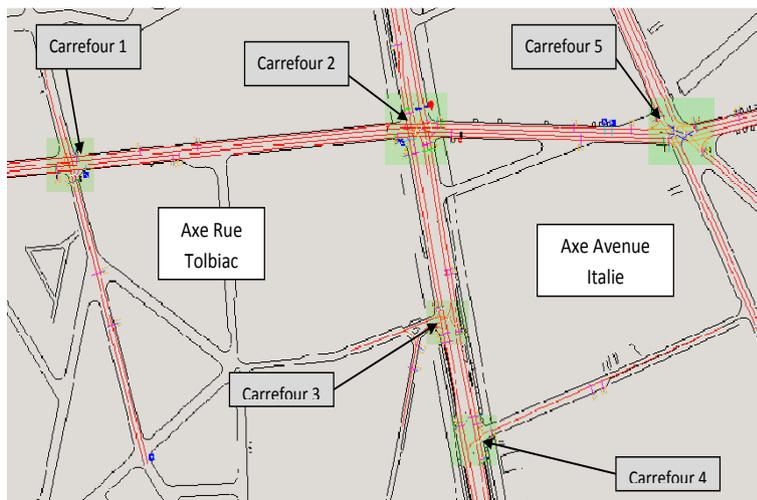


Figure 23 : Réseau de test modélisé avec le logiciel Dynasim

Nous avons testé également cette stratégie à l'aide du modèle de simulation microscopique Dynasim (voir paragraphe 12.1). Les tests ont été effectués sur cinq carrefours du réseau réel de la ville de Paris. La ligne de bus circule sur l'avenue d'Italie du sud au nord avec une fréquence d'un bus toutes les cinq minutes (voir Figure 23). Les tests ont été effectués sur deux heures et quart, avec un flux de véhicules correspondant à une heure de pointe avec d'importantes perturbations.

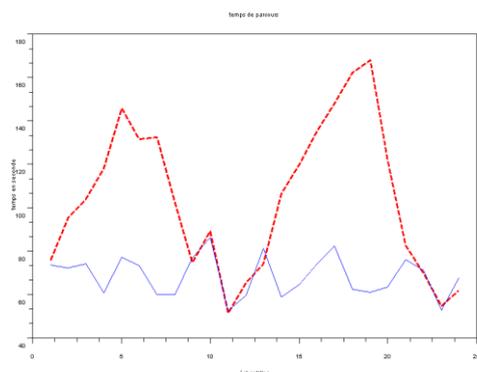


Figure 24 : Temps de parcours d'une ligne de bus avec et sans la stratégie NeTPrior

Comme le montre la Figure 24, le temps de parcours que mettent les autobus pour traverser le réseau est plus faible, et également plus stable dans le temps. Nous n'observons plus de grandes disparités suivant l'état du trafic, ce qui est très important pour les exploitants des bus qui ont toujours comme objectif d'éviter absolument ce que l'on appelle un *train de bus*, qui est causé par la disparité des temps de parcours.

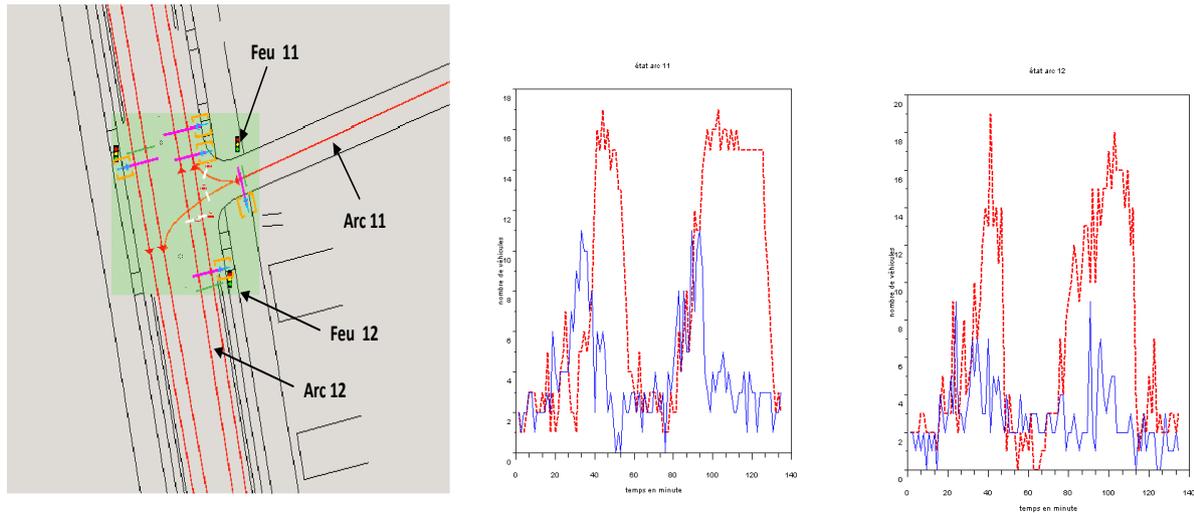


Figure 25 : Résultats de NeTPrior pour l'état du trafic général sur l'arc 12 où passe un bus et l'arc 11 du carrefour n°4

Comme le montre la Figure 25 qui fait un zoom sur un des carrefours du réseau, les conditions du trafic sont bien meilleures avec NeTPrior que dans le cas où les feux sont fixes. La situation est meilleure sur l'arc 12 où passe le bus, comparé à l'arc 11, ce qui est conforme à l'objectif poursuivi (se rapporter à [132] pour plus de précisions).

6. Asservissement autour d'une consigne

Dans le chapitre de la thèse de Nadir Farhi dédié à la régulation du trafic multimodal et en co-cadrement avec Jean Pierre Quadrat, directeur de recherche à l'INRIA, Nadir a exploré une approche légèrement différente de celle de NetPrior. L'objectif consiste à maintenir une fluidité sur les arcs où se trouvent les véhicules de transport en commun. Pour ce faire, un problème d'affectation des débits des véhicules particuliers est résolu par le calcul d'un équilibre de Wardrop. L'équilibre trouvé fournit le nombre de véhicules sur chaque itinéraire. La consigne de fluidité s'en déduit en réduisant ce nombre au moment du passage des véhicules de transport en commun sur les itinéraires. L'avantage de cette méthode est de pallier le problème de négativité possible du nombre des véhicules sur les arcs dans la stratégie NetPrior lors du calcul de la commande optimale. En effet, les contraintes sont envisagées dans NetPrior après le calcul de la commande optimale, par projection de celle-ci sur la surface des commandes admissibles.

6.1.1 Le problème d'affectation

On considère que l'état idéal du trafic des voitures pendant une période correspondant à une demande stable de transport est donné par un équilibre de Wardrop : à l'équilibre, les temps de parcours de tous les chemins utilisés d'un couple origine-destination sont égaux et inférieurs aux temps de parcours des chemins non utilisés. On obtient les trajectoires optimales en perturbant le moins possible ces équilibres par des perturbations améliorant la circulation des bus.

Pour pouvoir calculer cet équilibre, il faut définir pour chaque rue une fonction donnant le temps de parcours sur cette rue en fonction du débit, ainsi que les demandes de transport en commun pour chaque couple origine-destination. On calcule alors l'équilibre en résolvant un problème d'optimisation dont on montre que les conditions d'optimalité coïncident avec les conditions

d'équilibre. Plus précisément, un vecteur f dont chaque composante f_r représente le flux sur le chemin r est un équilibre de Wardrop (individuel) si:

$$\begin{cases} f_r(t_r - t_{pq}^*) = 0, & t_r - t_{pq}^* \geq 0, & t_{pq}^*, t_r, f_r \geq 0, \\ \sum_{r \in R_{pq}} f_r = d_{pq}, & \forall r \in R_{pq}, \forall p, q \in \mathcal{D}. \end{cases} \quad (\text{C.15})$$

où \mathcal{D} est la demande de l'ensemble des paires origine-destination ; d_{pq} est la demande entre la paire p et q ; R_{pq} est l'ensemble des chemins menant de l'origine p à la destination q ; R^a est l'ensemble des chemins qui passent par l'arc a ; t_r est le temps de parcours sur le chemin $r \in R_{pq}$; t_{pq}^* le temps de parcours le plus court parmi tous les chemins de R_{pq} ; f_a le flux sur l'arc a ; $t_a(f_a)$ est le temps de parcours sur l'arc a en fonction du flux f_a .

La formulation variationnelle de cet équilibre est :

$$\min_{f_a} \sum_a \int_0^{f_a} t_a(s) ds, \quad (\text{C.16})$$

sous les contraintes :

$$f_a = \sum_{r \in R^a} f_r, \quad \sum_{r \in R_{pq}} f_r = d_{pq}, \quad f_r \geq 0.$$

Le problème (C.16) étant statique, on considère un certain nombre de tranches horaires formant une partition \mathcal{S} de l'ensemble des temps $\{0, \dots, T-1\}$ et on résout un problème d'affectation sur chaque tranche. La résolution numérique du problème (C.16) est faite à l'aide de la boîte à outils CiudadSim [56] de Scilab.

Une fois résolus ces équilibres de Wardrop indexés par la tranche horaire, on définit la trajectoire idéale que l'on va poursuivre par la procédure suivante :

f^S la solution optimale du problème (C.16) sur une tranche horaire $s \in \mathcal{S}$ et t_a^S le temps de parcours sur l'arc $a \in \mathcal{A}$ pour le flux optimal de la tranche horaire S .

La trajectoire idéale (\bar{x}^k) et la commande optimale (\bar{u}^k) sont définies comme suit :

$$\begin{aligned} \bar{u}^k &= f^S, \quad \forall S \in \mathcal{S}, \forall k \in \mathcal{S}, \\ \tilde{x}_a^k &= f_a^S t_a^S, \quad \forall S \in \mathcal{S}, \forall k \in \mathcal{S}, \forall a \in \mathcal{A}, \\ \bar{x}^k(y) &= \frac{\beta}{1 + \sum_h y_h^k} \tilde{x}^k, \quad 1 \geq \beta \geq 0. \end{aligned} \quad (\text{C.17})$$

La robustesse du feedback obtenu a été étudiée en simulation avec des perturbations des nombres de véhicules particuliers et/ou des horaires de passage des véhicules de transport en commun prévus grâce au problème d'affectation.

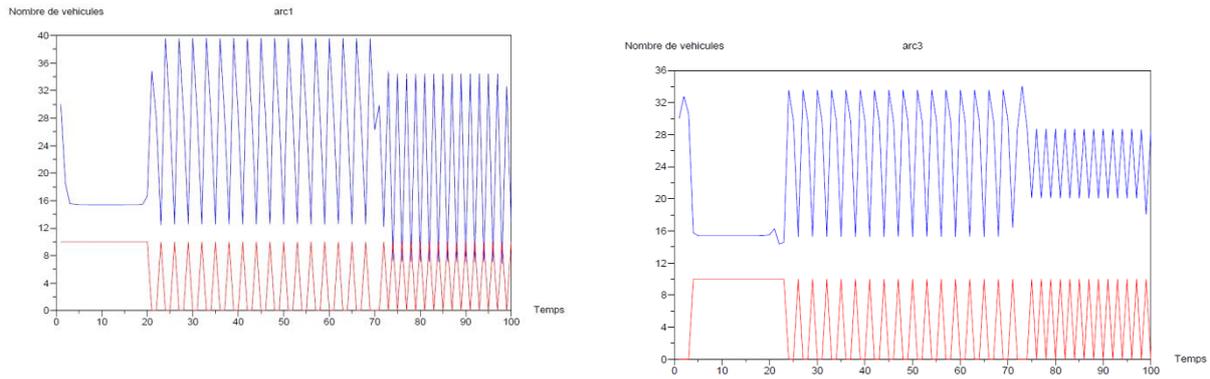


Figure 26 : Résultat de l'asservissement autour d'une consigne pour le trafic général et le bus

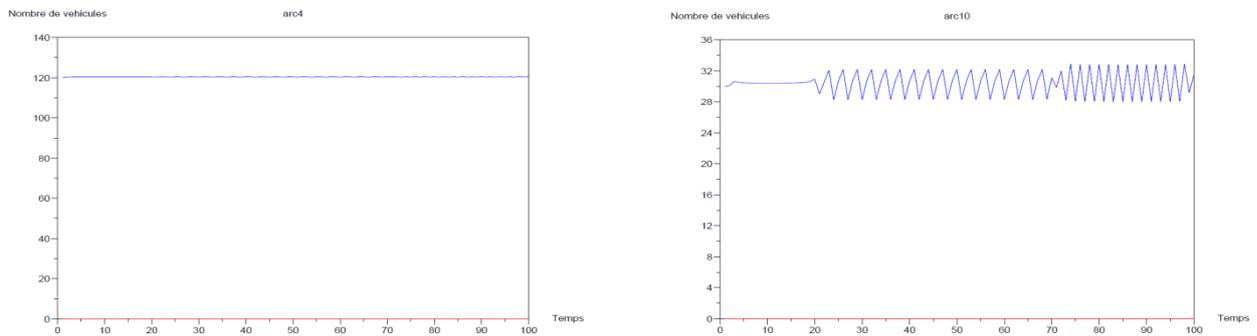


Figure 27: : Respect de la consigne dans le cas d'un arc où passe le bus (arc 4) ou non (arc 10)

Comme nous pouvons le voir sur la Figure 26, la courbe donnant le nombre de véhicules particuliers est complémentaire de celle du nombre de bus sur les arcs. Ceci montre que la stratégie réduit le nombre de véhicules particuliers pour laisser le passage au bus au moment de sa présence. Nous pouvons voir sur la Figure 27 que la stratégie respecte exactement la consigne sur un arc où passe le bus (arc n°4), alors qu'elle ne la suit qu'imparfaitement sur l'arc 10 qui ne supporte pas de ligne de bus.

D'autres tests menés (voir [LB.Nadir]) montrent la robustesse de la commande obtenue. Les comparaisons entre ces résultats et ceux obtenus dans le paragraphe précédent (NeTPrior) montrent les similitudes des résultats des deux méthodes. Notons que NeTPrior nécessite moins de données sur l'état du trafic, lesquelles sont sources d'imprécision.

7. Commande prédictive à base de modèle

La puissance de la boucle fermée fait que, malgré ses faiblesses, NeTPrior donne de très bons résultats. En effet, la commande est calculée régulièrement sur la base des mesures en temps réel et non sur la base du modèle. Que se passerait-il alors si l'on avait une stratégie pouvant agir en boucle fermée et s'appuyant sur un modèle plus précis que celui de NeTPrior où, de plus, les contraintes étaient considérées directement dans le problème d'optimisation ? En effet, la commande prédictive à base de modèle est une méthode avancée de contrôle automatique des systèmes dynamiques. Le principe fondamental de cette commande est l'utilisation d'un modèle interne qui prédit l'état du système dans

le futur. La première formalisation théorique remonte à 1978 avec les travaux de J. Richalet [41]. Elle est ensuite généralisée par D.W. Clarke en 1987 ([9] et [10]).

Initialement, cette commande a été appliquée aux systèmes dynamiques lents à cause de la lourdeur des calculs qu'elle nécessite. Avec le développement de la puissance calculatoire des machines, la commande prédictive est devenue une puissante méthode de contrôle de tous systèmes, qu'ils soient lents ou rapides. La commande prédictive peut se résumer à la formule *étant donné l'état actuel du système, comment prendre une décision (sur les variables de commande) pour minimiser un critère donné ?* Nous retrouvons alors un vocabulaire propre au domaine de l'optimisation, sauf qu'il s'agit ici de systèmes dynamiques. La commande prédictive est généralement constituée de deux modules : un module de prédiction (modèle interne) et un module d'optimisation.

J'ai conduit des recherches tout d'abord pour explorer la puissance de la méthode. Ce fut fait lors du stage de master de Djilali Touazi. Et ensuite pour développer une stratégie plus complète, lors de la thèse de Sofiane Kachroudi.

Dans la première recherche, l'objectif étant d'explorer la méthode, nous avons utilisé le même modèle bimodal linéaire et le même critère quadratique que dans NetPrior. La modification a consisté à inclure les contraintes dans le problème d'optimisation.

Ce problème a été résolu par la méthode d'activation des contraintes. Vu la simplicité du modèle, l'horizon glissant optimal trouvé est $N=1$ et une optimisation est donc nécessaire à chaque pas de temps. Les résultats sont comparables à ceux de NetPrior [LB. 32], d'où l'idée d'appliquer la méthode avec un modèle plus précis.

8. Régulation multi-objectifs du trafic urbain bimodal

L'objectif dans la thèse de Sofiane Kachroudi n'était pas seulement de réguler le trafic sur le réseau en agissant activement sur les arcs en présence des véhicules TC, mais de réguler en plus les intervalles entre les bus afin de s'assurer de leur régularité. Dans ce contexte, le modèle des déplacements des TC doit être plus précis pour modéliser l'intervalle entre les bus. Le choix s'est porté sur un modèle à base de règles. Nous avons opté, comme expliqué précédemment, pour une commande prédictive à base de modèle afin d'avoir un fonctionnement en boucle fermée. Le problème est résolu comme un problème d'optimisation multi-objectifs avec deux critères d'optimisation, chacun exprimant l'objectif de régulation pour un mode.

8.1.1 Modèle

Vu l'objectif de réguler le trafic bimodal sur tout un réseau, on a opté pour un modèle macroscopique pour la voiture particulière. Sofiane Kachroudi a utilisé le même modèle que dans la stratégie NetPrior, mais a pu introduire une modification pour tenir compte des conditions de trafic sous-saturé, vu que la contrainte de linéarité du modèle présente dans NetPrior a disparu.

Quant aux véhicules de transport en commun, puisque l'objectif fixé est de réduire le temps d'attente aux feux et de réguler les intervalles entre les véhicules, le choix a été fait de modéliser la position dynamique des bus.

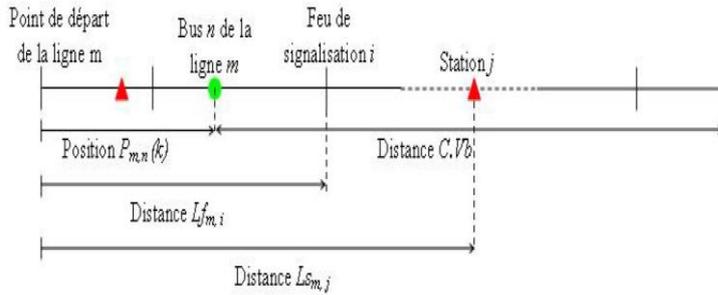


Figure 28 : Progression d'un véhicule de transport en commun

Le réseau urbain est traversé par plusieurs lignes de bus et, pour chaque ligne, il peut y avoir plusieurs véhicules bus sur le réseau de la même ligne ou de différentes lignes. La dynamique du véhicule *bus n* de la *ligne m* est représentée par sa position $P_{m,n}(k)$ dans le réseau, position comptée à partir du point de départ des bus de la ligne *m*. Durant le cycle de durée C , le bus peut parcourir la distance maximale de $C.V_b$ où V_b est la vitesse libre du bus.

Sur cette distance, le bus peut traverser $i_{m,n}$ feux de signalisation. Les durées totales des phases de vert de ces feux sont regroupées dans l'ensemble $G_{m,n}$. Le bus peut également s'arrêter dans $j_{m,n}$ stations. Les temps d'arrêt à ces stations sont regroupés dans l'ensemble $St_{m,n}$. Si l'on note $Nb_{m,n}$ le vecteur constitué par le nombre de véhicules particuliers devant le bus *n* de la ligne *m* dans tous les arcs qui peuvent être traversés par le bus durant la période $[k.C; (k + 1).C]$, la modélisation consiste alors à trouver la fonction f qui décrit la position dynamique des véhicules de transport en commun. Elle est donnée par l'équation :

$$P_{m,n}(k+1) = f(P_{m,n}(k); G_{m,n}(k); Nb_{m,n}(k); St_{m,n}(k)) \quad (C.18)$$

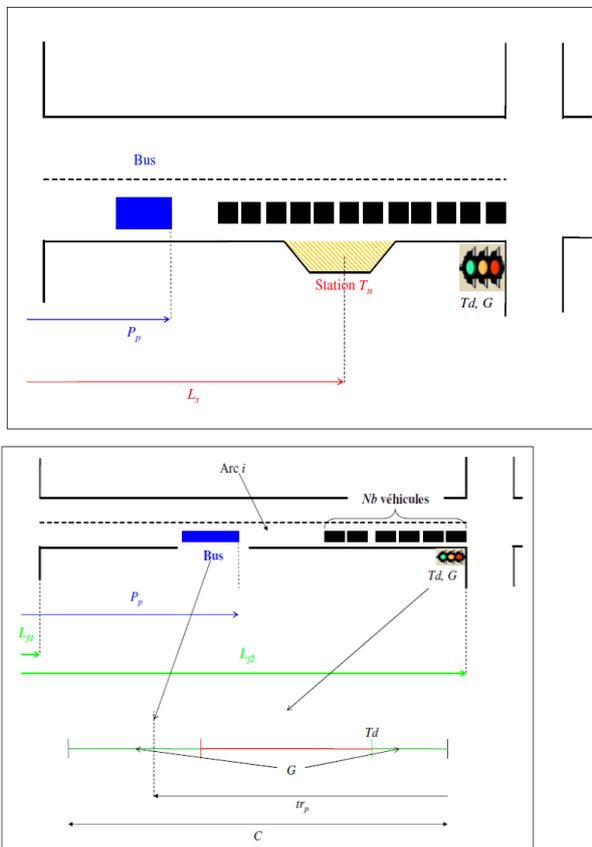


Figure 29 : Modélisation des carrefours et des arrêts comme des événements

La philosophie du modèle consiste à percevoir les carrefours successifs et les stations comme des obstacles à passer. Autrement dit, le passage des carrefours et des stations sont des événements après lesquels une réinitialisation de certaines variables est nécessaire. Après le passage d'un événement, le bus doit immédiatement passer à un autre jusqu'à ce que le cycle actuel se termine ou qu'il sorte de la zone contrôlée du réseau. Deux types d'événements peuvent se produire : le passage d'un carrefour à feux et le stationnement à un arrêt commercial. Ces deux événements sont mis à jour dans le modèle par les algorithmes respectifs « g_feu » et « g_station ». Avant le passage d'un événement, la position du bus et le temps restant avant la fin du cycle sont désignés par P_p et tr_p . L'objectif est de déterminer la nouvelle position du bus P_n et le nouveau temps restant tr_n après le passage du carrefour ou à la fin du cycle de feu actuel.

Fonction générale du modèle

$$P_p = P(k)$$

$$tr_p = C$$

tant que ($tr_p > 0$) faire

si (événement=station) alors

$$(P_n, tr_n) = g_station(P_p, tr_p, T_{st})$$

sinon

$$(P_n, tr_n) = g_feu(P_p, tr_p, G, Nb)$$

fin si

$$P_p = P_n$$

$$tr_p = tr_n$$

fin tant que

$$P(k + 1) = P_n$$

G étant la durée de la phase de vert durant laquelle le bus peut passer et Nb , le nombre de véhicules particuliers intercalés entre le bus et la ligne de feu.

Les algorithmes « g_station » et « g_feu » calculent la position du bus et le temps restant, en considérant les différentes configurations par rapport au nombre de véhicules devant lui et sa position.

8.1.2 Objectif de régulation

Le problème est résolu comme un problème d'optimisation multi-objectifs avec deux critères d'optimisation (un pour chaque mode). Pour les véhicules particuliers, la régulation consiste à minimiser les temps de parcours qui dépendent essentiellement des longueurs de file d'attente au niveau des carrefours. Ainsi le premier critère est la somme de tous les véhicules sur chaque arc du réseau. Pour les transports en commun, la régularité correspond soit au respect d'une table horaire préétablie, soit au respect d'un intervalle régulier entre les véhicules successifs. Pour tenir compte de tous ces cas de figure, un critère a été choisi qui exprime l'écart quadratique entre les positions réelles des véhicules de transport en commun et les positions de référence à atteindre. Les positions de référence dépendent du type de régulation envisagée. Ce sont soit des intervalles, soit des horaires.

Minimiser

$$\begin{cases} C_VP(G) = K_p \times \sum_{i=1}^{N_a} X_i(j)^2 \\ C_TC(T_d, G) = \sum_{m=1}^{n_l} \sum_{n=1}^{n_m} [P_{m,n}(j) - P_{m,n}^s(j)]^2 \end{cases} \quad (C.19)$$

$P_j^S(k)$ représente la position consigne à respecter pour le bus «j» au début du cycle «k»; $Td_{jp}(k)$ représente l'instant de début de la phase du vert du feu «p» pour le bus «j» au début du cycle «k»; et K_p est un paramètre introduit pour avoir le même ordre de grandeur pour tous les termes du critère.

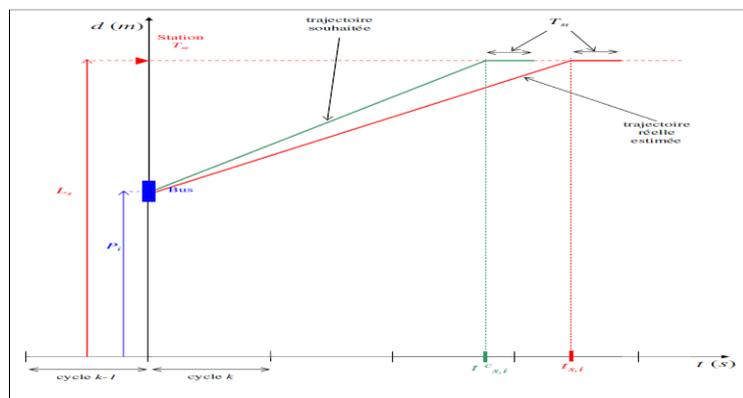


Figure 30 : Trajectoires d'un bus souhaitée et réelle estimée

1.1.1 Optimisation

La méthode d'optimisation par essaims particulaires (PSO en anglais pour Partical Swarm Optimisation) a été adoptée. Il s'agit d'une méta-heuristique très prisée dans la littérature et très prometteuse du fait de sa simplicité de mise en œuvre et de son efficacité de convergence.

Comme toutes les méthodes méta-heuristiques, le PSO explore l'espace de recherche de manière efficace et intelligente. Les chances de satisfaire l'objectif de cette recherche avec un seul agent peu intelligent sont quasi inexistantes. On peut par contre imaginer différentes tactiques pour que plusieurs de ces agents *imbéciles* se comportent collectivement de manière astucieuse. L'algorithme PSO fait appel à une population d'agents ou particules.

Les premiers articles sur le PSO datent de 1995 [44]. La méthode est née presque par hasard. Au départ, les inventeurs souhaitaient simuler des interactions sociales, essentiellement en s'appuyant sur les algorithmes culturels adaptatifs. Ces algorithmes sont souvent décrits comme une sorte d'algorithmes évolutionnaires, avec une population d'individus (agents), dans laquelle, à chaque pas de temps, les "meilleurs" (selon un critère prédéfini) sont plus ou moins imités par les autres. Un aspect essentiel, qui la différencie, par exemple, des algorithmes génétiques classiques, est l'existence d'une mémoire, à laquelle ne contribuent que les meilleurs éléments. Le modèle est censé expliquer et reproduire certains comportements sociaux, mais s'est révélé un peu simpliste. Par contre, convenablement modifié, il peut résoudre des problèmes d'optimisation, car le processus fait apparaître des individus de plus en plus performants.

Contrairement à d'autres méthodes de la famille des méta-heuristiques, l'efficacité de l'PSO est due à la collaboration entre agents plutôt qu'à la compétition. Un exemple souvent cité pour illustrer la coopération dans la méthode PSO : deux pêcheurs sont sur un étang où le gros poisson se trouve au plus profond de l'étang. A chaque pas de temps, chaque pêcheur indique à son collègue l'endroit le plus profond qu'il a déjà trouvé. Au début, il n'y a pas de différence, chacun suit sa propre route indépendamment. Ensuite, le pêcheur B trouve un meilleur emplacement, alors le pêcheur A tend à le rejoindre assez vite. Ce faisant, il détériore sa position. Dès lors, il a un compromis à faire entre la meilleure position qu'il a trouvée jusque-là et celle trouvée par B. Il continue d'aller vers B, mais plus lentement. Le point important est que, ce faisant, il échappe au minimum local. Dans cet exemple,

nous trouvons les notions essentielles : position, vitesse (ou, plus précisément, un opérateur modificateur de position), échange d'informations, mémoire (très limitée), capacité rudimentaire à combiner les informations pour prendre une décision.

Dans la thèse de Sofiane Kachroudi deux algorithmes ont été testés : l'algorithme de base (PSO) et un algorithme modifié (GCP SO) [51]. Ce dernier permet d'éviter que la meilleure particule ne stagne dans une région (minimum local), ce qui empêcherait d'explorer toute la zone et aboutirait alors à une convergence prématurée.

8.1.3 Les essais particuliers pour l'optimisation multi-objectif

Les approches Pareto sont les principales employées pour résoudre les problèmes multi-objectifs, du fait de leur capacité à trouver un ensemble potentiellement efficace via la recherche menée sur une population de solutions. Elles utilisent la notion de dominance pour comparer les solutions et leur affecter un score ou en sélectionner certaines. Goldberg [58] a été l'un des premiers à utiliser cette notion. Ces approches ont connu un important développement à partir de la seconde moitié des années 1990 [36].

Lors du design de méthodes heuristiques, il est nécessaire d'évaluer la qualité des résultats retournés. En optimisation mono-objectif, il s'agit de comparer la meilleure valeur trouvée avec les précédentes. Dans le cadre multi-objectif, cela est plus complexe. Pour un problème, il n'y a pas forcément d'optimum connu, du fait de la complexité à le calculer et de l'attention limitée portée jusque récemment aux méthodes exactes. Comparer deux approximations n'est pas trivial non plus. Les approximations étant un ensemble de points, il est possible que deux ensembles ne soient pas comparables, dès lors que l'un d'entre eux ne domine pas complètement le second. De nombreuses mesures ont été proposées dans la littérature, mais elles ne sont pas toutes valables et ne permettent pas toutes de classer les résultats de manière significative. Parmi les mesures existantes, certaines affectent un score absolu à une approximation, d'autres un score relatif à un ensemble ou un point de référence, tandis que d'autres calculent l'apport d'une approximation par rapport à une autre.

De plus, certaines mesures se concentrent sur l'aspect de convergence, d'autres sur l'aspect de diversification, tandis que certaines mesures évaluent les deux aspects simultanément. L'objectif étant d'augmenter le nombre de solutions dans le front de Pareto et d'assurer une répartition uniforme des solutions sur le front de Pareto.

La question porte sur la façon de mettre à jour la meilleure position d'une particule dans le cas où nouvelle comme ancienne position sont non dominées, ou de sélectionner la meilleure particule voisine s'il y en a plusieurs qui sont non dominées. Ce problème a été résolu en suivant les trois mécanismes : (1) Sélection d'une solution non dominée parmi plusieurs. (2) Conservation et répartition uniforme des solutions non dominées. (3) Amélioration de la diversité des solutions dans la création de nouvelles solutions.

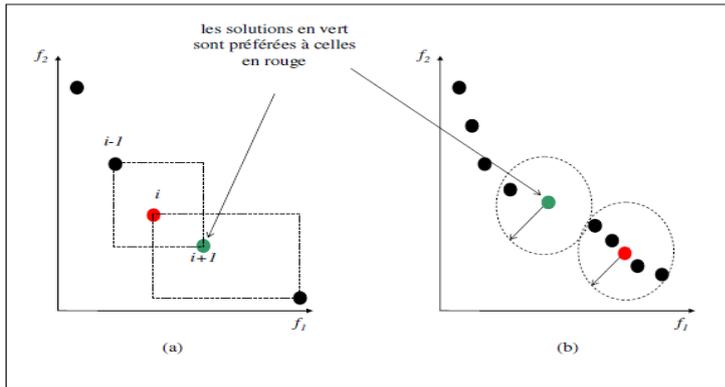


Figure 31 : Sélection d'une solution non dominée parmi plusieurs

Deux architectures de commande ont été testées. La première a la forme classique de la commande prédictive. La deuxième utilise la commande linéaire quadratique NeTPrior pour orienter l'algorithme d'optimisation vers les régions les plus prometteuses de l'espace de recherche. Cette architecture fait économiser des recherches inutiles à l'algorithme d'optimisation.

En simulation, cette stratégie a réussi à satisfaire les objectifs de départ, à savoir améliorer significativement le trafic général et la régularité des lignes de transport en commun. Dans certaines situations, les résultats sont même exceptionnellement bons, ce qui démontre l'efficacité de la stratégie.

Résultats

Plusieurs études ont été faites au sein de la thèse. Sur un réseau de grande dimension (16 carrefours et 51 arcs), traversé par 4 lignes de transport en commun, on a considéré des flux permettant d'observer toutes les conditions du trafic.

Performance de l'algorithme d'optimisation

Des tests ont été effectués pour faire ressortir la sensibilité par rapport aux paramètres de l'algorithme d'optimisation, par rapport à l'horizon de simulation, par rapport à l'horizon de contrôle, enfin par rapport au temps de convergence (en fonction de la taille de l'essai).

Tableau 1 : Numérotation en fonction des horizons de contrôle et de simulation

Entier	1	2	3	4	5	6	7	8	9
H_c	1			2			4		
H_s	H_c	$H_c + 2$	$H_c + 4$	H_c	$H_c + 2$	$H_c + 4$	H_c	$H_c + 2$	$H_c + 4$

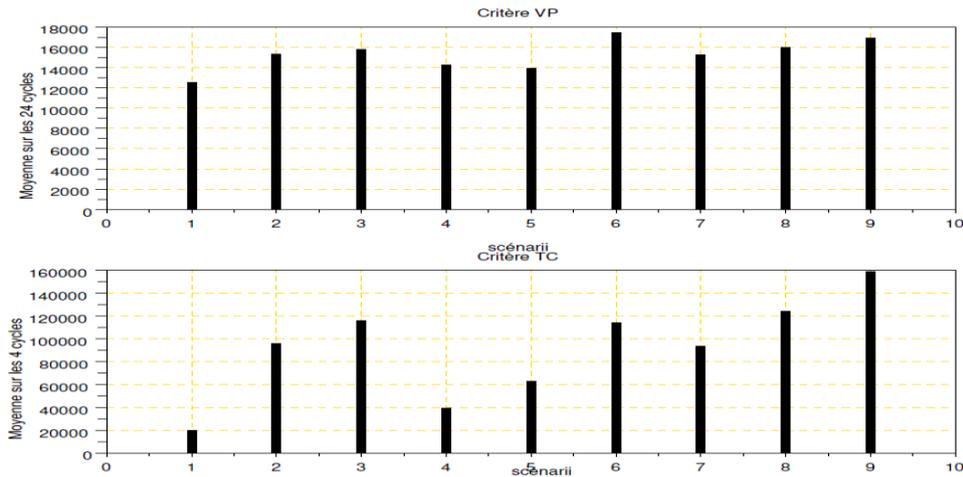


Figure 32 : Critères VP et TC pour différents horizons de contrôle pour l'algorithme GCPSO

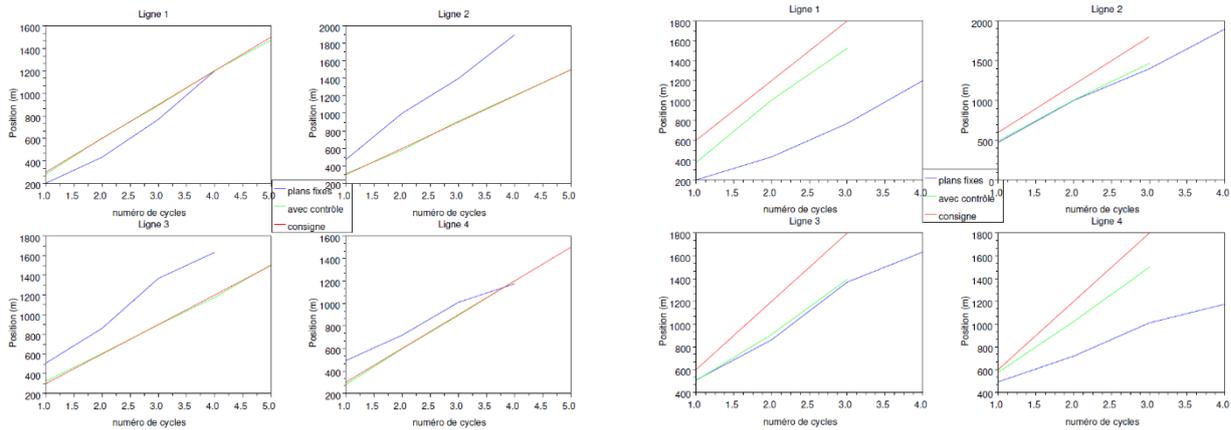
Plusieurs tests et analyses de l'influence de la longueur de l'horizon de contrôle H_c et de l'horizon de simulation H_s sont donnés dans la thèse de Sofiane Kachroudi pour les deux algorithmes PSO et l'algorithme modifié GCPSO [LB. 46]. Pour chaque longueur de l'horizon de contrôle $H_c = 1; 2; 4$, trois longueurs de l'horizon de simulation sont considérées : $H_s = H_c; H_c + 2; H_c + 4$ (voir Tableau 1). Les deux histogrammes de la Figure 13 tracent les valeurs des objectifs pour les différentes valeurs de H_c et de H_s pour l'algorithme modifié GCPSO. En abscisse, sont représentés les scénarii par des entiers allant de 1 à 9 du Tableau 1 ; en ordonnée, la moyenne des critères pour les cycles considérés.

Comme nous pouvons le voir, les meilleures performances sont obtenues pour $H_s = H_c = 1$ et les pires sont obtenues pour $H_c = 4$ et $H_s = H_c + 4 = 8$. On peut l'expliquer par les deux arguments suivants :

- Il est nécessaire de disposer d'estimations des entrées exogènes non contrôlables. Ces estimations s'appuient sur des moyennes calculées sur l'historique. Or, pour le trafic, les valeurs réelles s'écartent des moyennes et les perturbations sont nombreuses.
- L'augmentation de l'horizon de contrôle provoque celle du nombre de variables de décision du problème d'optimisation. Or les méthodes méta-heuristiques comme les algorithmes PSO et GCPSO sont très sensibles à ce nombre et leurs performances décroissent avec son élévation.

Analyse selon les consignes de régularité données aux transports en commun

Les performances de la stratégie ont été également analysées par rapport au respect des consignes de régularité données aux véhicules TC. Les consignes sont des positions que ces véhicules doivent respecter à la fin de chaque cycle de feu. Avec une longueur de cycle $C = 80$ secondes et une vitesse libre des véhicules fixée à 8 m/s , un véhicule peut parcourir au maximum la distance de 640 m en un seul cycle. Sept tests ont alors été conduits pour vérifier le respect par les véhicules TC de la consigne qui varie entre 100 et 650 m pour un cycle de feu (consigne $\in \{100, 200, 300, 400, 500, 600 \text{ et } 650\} \text{ m}$). Les Figure 33 a et b, donnent l'exemple des consignes de 300 et 600 m pour les 4 lignes de transport en commun.



a- Progression pour une consigne de 300

b-Progression pour une consigne de 600

Figure 33 : Progression moyenne des 4 lignes de bus avec un trafic avec et sans perturbation

On observe que la stratégie essaye de faire en sorte que la progression réelle des bus suive la consigne donnée. Elle y parvient généralement sauf dans les cas extrêmes où les consignes sont de 100 et 650 m. Les résultats sont cependant meilleurs quand la consigne est de 300 m que quand elle est plus élevée. Nous remarquons que les bus sont en avance quand la consigne est élevée (voir Figure 33.b). Ceci s'explique par le fait que la stratégie donne plus de feu vert aux arcs traversés par le bus, les vidant ainsi des véhicules particuliers qui gênent sa progression. Un juste milieu est donc à rechercher.

Différents scénarii sont traités dans la thèse avec des objectifs de régulation différents pour les deux modes de transport : répartition équitable entre véhicules de transport en commun et véhicules particuliers, véhicules de transport en commun plus ou moins favorisés, dans les cas avec et sans perturbations. La stratégie donne les résultats escomptés en fonction de l'objectif fixé.

9. Système multi-agents pour la régulation du trafic bimodal

Avec les méthodes d'optimisation classiques, la commande LQ ou prédictive à base de modèle, nous avons obtenu de bons résultats pour réguler le trafic tout en agissant sur la régularité des transports en commun. Cependant, comme nous l'avons vu, pour agir directement sur les intervalles des transports en commun, une modélisation microscopique de ces derniers est nécessaire. Ceci complique le déploiement de la stratégie en temps réel sur tout un réseau. Les systèmes multi-agents peuvent donner une réponse plus simple au problème, principalement dans la combinaison des aspects macroscopique et microscopique de la régulation multimodale. Ceci d'autant plus que ces systèmes permettent d'utiliser pleinement les nouvelles techniques de l'information et de la communication (NTIC) qui offrent aujourd'hui des informations très précises sur les véhicules et leurs positions. L'idée serait d'exploiter les informations provenant des systèmes d'aide à l'exploitation (SAE, AVM en anglais ; voir Figure 34).

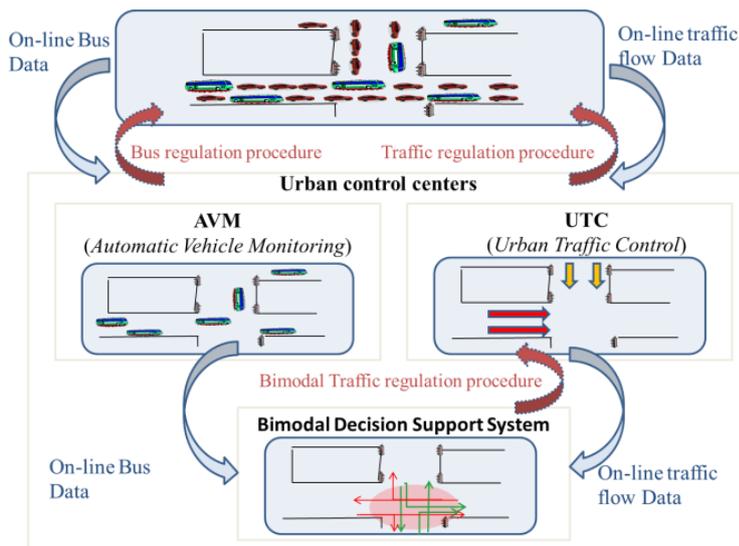


Figure 34 : Architecture d'une stratégie de régulation intermodale VP et TC

Dans ce but, j'ai tout d'abord développé la stratégie ASUR avec l'aide de stagiaires du Master EDDIMO de l'université Paris-Dauphine (Sofiane Haciane, Mohammed Tlig, Hicham Bouhoussa) en collaboration avec les professeurs Flavien Balbo et Suzanne Pinson. J'ai par la suite co-encadré, avec le professeur Samir Aknine, la thèse de Matthis Gaciarz, financée par la région Rhône-Alpes. Je présente ci-dessous le principe de la stratégie ASUR, puis la stratégie développée dans la thèse de Matthis Gaciarz.

9.1 Architecture d'ASUR

L'originalité de l'approche multi-agents adoptée dans ASUR est qu'elle permet deux niveaux de régulation grâce aux interactions entre agents : une macro-régulation, qui concerne les flux de véhicules particuliers, et une micro-régulation des véhicules de transport en commun (voir Figure 35). ASUR est constituée des quatre types d'agent suivants :

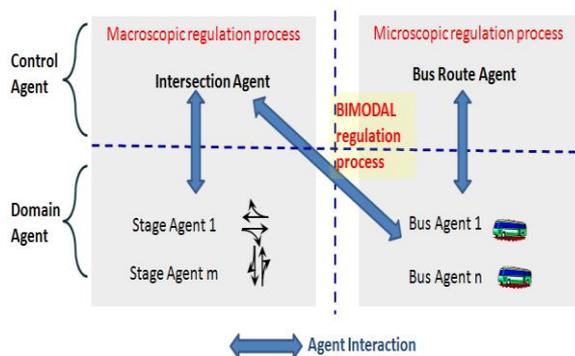


Figure 35 : Processus de régulation du trafic bimodal

9.2 Identification des agents

Afin d'identifier les agents du système, nous faisons abstraction du système réel : à chaque entité du monde réel nous associons une entité (agent) dans le monde virtuel. L'ensemble de ces entités interagissent entre elles et forment un système multi-agents (SMA). ASUR est constituée des quatre types d'agent suivants :

Agent carrefour (ACar) : chargé de contrôler un carrefour à feux et de générer les plans de feux en fonction de son état actuel, ainsi que de l'état actuel des carrefours adjacents et des requêtes de priorité envoyées par les bus.

Agent phase (APhase) : chargé de déterminer la durée de temps de vert optimale pour évacuer les véhicules en attente de cette phase. Ainsi, quelle que soit la complexité du carrefour (quelle que soit sa configuration physique), il est vu comme un ensemble d'agents phases qui interagissent avec l'agent carrefour pour élaborer le plan de feux. L'élaboration des plans de feux pourra être ainsi résolue d'une façon collaborative par les agents phases.

Agent bus (ABus): représente un bus du monde réel. Il circule d'un arc à un autre, s'arrête aux arrêts commerciaux, s'arrête aux feux rouges et obéit aux consignes de l'agent ligne. L'objectif de chaque agent bus est de minimiser son temps perdu aux feux (i.e. minimiser son temps de parcours).

Agent ligne de bus (AL): contrôle et modifie le comportement des agents bus de la ligne pour assurer un service régulier. En effet, les agents bus (AB) ne possèdent qu'une vue locale de leur environnement et plus particulièrement de la course qu'ils effectuent et l'optimisation locale à laquelle ils procèdent peut avoir un impact globalement négatif sur la ligne, notamment sur sa régularité (d'où la possibilité de formation de trains de bus). L'agent ligne veille quant à lui à la régularité globale.

9.3 Comportement des agents

Je décris ici les tâches exécutées par les différents agents et la façon d'y parvenir. Il s'agit là des grandes lignes. Pour plus de détails, on se référera à [LB. 24] [LB. 23] [LB. 22].

Agent Bus (AC)

L'Agent Bus récupère les informations de l'arc (le nombre de véhicules passés devant lui, la longueur de l'arc, la capacité et le débit de sortie de l'arc) et calcule l'intervalle de temps $[t_b, t_e]$ qui lui permet de passer sans s'arrêter au feu rouge du carrefour suivant. t_b , donné par l'équation 1, est l'instant auquel le bus arrivera à la ligne de feu et t_e , l'instant auquel l'arrière du bus quittera l'arc.

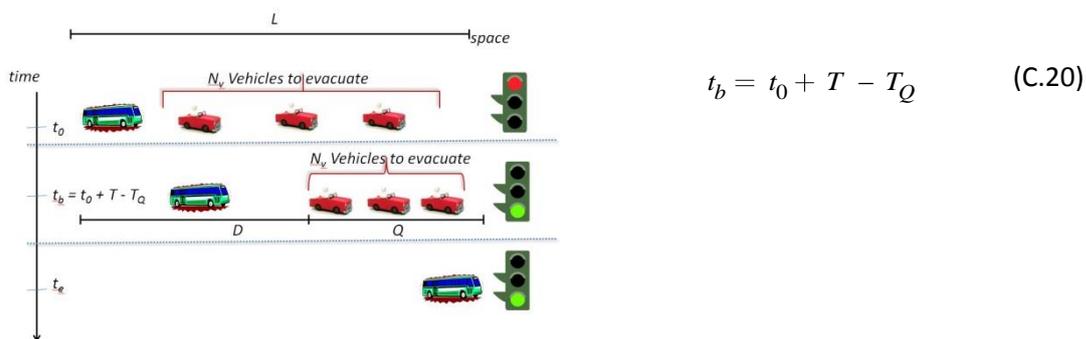


Figure 36 : Réserve par un bus de la durée du feu vert

A l'approche d'un arrêt, l'Agent Bus en informe l'Agent Ligne auquel il est rattaché. Ce dernier calcule alors la durée de régulation éventuelle, si le bus ne respecte pas l'intervalle voulu avec son prédécesseur. Il calcule également le nouveau niveau de priorité du bus et les lui envoie. Le bus doit ainsi attendre pendant le temps de chargement des usagers, plus éventuellement cette durée de régulation pour quitter l'arrêt actuel. Il dispose désormais de l'ensemble des informations qui lui sont

nécessaires pour communiquer avec l'agent carrefour, à savoir, $R=(P_i, t_b, t_o, \text{Priorité})$, où P_i est la phase qui va permettre son passage et Priorité est le niveau de priorité défini par l'Agent Ligne pour ce bus.

Agent Ligne

Cet agent possède une vue globale sur tous les bus de la ligne qu'il gère et intervient à chaque fois qu'il détecte une irrégularité. Dans l'exemple de la Figure 5, l'Agent Ligne AL123 doit détecter le train de bus formé par les Agents Bus B4, B5 et B6 et le décomposer en retardant B6 et B5 qui sont en avance.

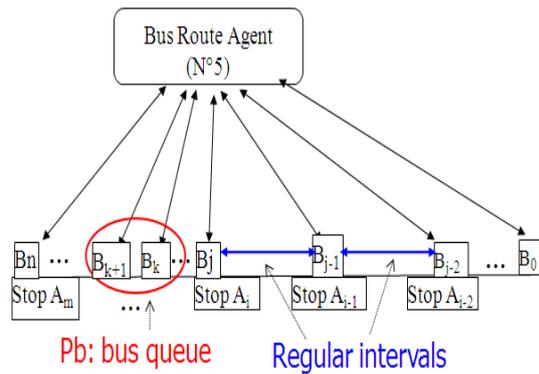


Figure 37 : Supervision des agents bus pas l'agent ligne bus

Pour deux arrêts consécutifs A_i et A_j , l'Agent Ligne garde la durée de parcours $d_{i,j}$ du dernier bus. Cela permet de suivre l'évolution des bus et de calculer l'avance ou le retard d'un bus par rapport à son prédécesseur. A l'approche d'un arrêt, l'Agent Bus transmet à l'Agent Ligne le temps consommé (t) pour parcourir la distance qui le sépare des deux arrêts suivants A_i et A_{i-1} . L'Agent Ligne compare alors ce temps t à la durée ($d_{i,j}$) consommée par le bus précédent et décide par la suite si le bus est en avance ou en retard. L'Agent Ligne calcule la nouvelle priorité de l'Agent Bus ainsi qu'un temps d'attente que le bus doit respecter à son arrêt commercial s'il est en avance. Cinq niveaux de priorité sont définis suivant le seuil d'avance du bus.

Agent Phase

L'Agent Phase gère l'ensemble des mouvements compatibles aux entrées du carrefour. Il est chargé de calculer la durée optimale pour évacuer les véhicules en attente sur les arcs concernés et de collaborer avec les autres agents pour élaborer le plan de feux.

L'Agent Phase calcule tout d'abord la durée T (équation 1) qui lui est nécessaire pour évacuer tous les véhicules qui sont sur les arcs qu'il gère. Il mesure également un indice d'urgence de la phase (l_i , équation 2), qu'il transmet à l'Agent Carrefour.

Soit l'Agent Carrefour donne confirmation à l'Agent Phase, lequel arrête alors le processus. Soit il lui envoie un appel d'offre avec un coût c . Ce coût est égal au nombre d'arcs que l'Agent Phase doit pénaliser pour réduire la durée demandée (en premier $c=1$ et puis 2, ...). L'Agent Phase calcule alors la nouvelle offre, c'est-à-dire le temps nécessaire pour évacuer les arcs non pénalisés et l'envoie à l'Agent Carrefour.

$$T_i = \frac{N_i}{d_i} + \frac{N_i * L_i}{C_i * V_i} \quad T = \max_{i=...m} T_i \quad (C.21)$$

$$I = \sum_{i=0}^m (e^{w_i} + e^{b_i}) \quad (C.22)$$

où $w_i = N_i/C_i \in [0,1]$ mesure le degré de congestion de l'arc i ; b_i représente le nombre de bus présents sur l'arc i ; m est le nombre d'arcs entrant pendant cette phase et T_i le temps nécessaire pour évacuer l'arc i .

Agent Carrefour (AC)

Chaque Agent Carrefour est chargé de contrôler un carrefour à feux et de gérer les plans de feux optimaux ou quasi optimaux. L'ensemble des Agents Carrefours communiquent entre eux pour éviter une optimisation locale. L'Agent Carrefour supervise l'ensemble des Agents Phases et essaye de satisfaire au mieux les réservations des bus.

Nous avons fixé 6 valeurs possibles du cycle de feu, $\{40, 60, 80, 100, 120, 140\}$. L'ensemble des phases du carrefour : $P=\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$.

Le plan de feux : le plan de feux spécifie l'ordre de passage des phases ainsi que la durée de chaque phase. Entre deux phases successives une durée de rouge intégral de 2 secondes est imposée.

A la fin de chaque cycle l'Agent Carrefour lance le processus de calcul du plan de feux pour le cycle suivant. Ce plan doit déterminer la durée de vert et l'ordre de passage de chaque phase.

Quand l'Agent Carrefour reçoit une réservation de la part d'un bus, il l'enregistre dans sa base de données. Une réservation $R=(P_i, t_d, t_f, \text{Priorité})$ n'est pas prise en compte au moment de sa réception (t_0). L'Agent Carrefour décidera d'accepter ou de refuser cette demande à l'instant t_d , dernier instant permettant au bus qui a fait la première requête d'avoir une réponse avant d'atteindre la ligne de feu (calculé en fonction du temps de parcours du bus et la longueur de la file d'attente).

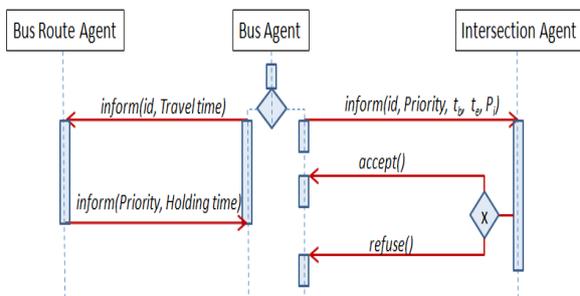


Figure 38 : Communication de l'Agent Bus avec l'Agent Intersection et l'Agent Route

9.4 Calcul d'un plan de feux

1. L'AC (Agent Carrefour) crée un groupe de collaborateurs appelé *collab_group* contenant la liste des agents phases qu'il doit gérer.
2. L'AC initialise les variables : $C=CycleMax$ et $t=0$. La variable C permet de contrôler la taille du cycle qui $\in E_c \{40,60,80,100,120,140\}$.
3. L'AC envoie un message *request* aux Agents Phase de *collab_group* leur demandant le temps nécessaire pour évacuer tous les véhicules sur leurs arcs, en commençant à l'instant t .
4. Chaque agent i de *collab_group* calcule sa durée de vert souhaitée (T_i) et son indice d'urgence (I_i) et les renvoie à l'AC.

5. Quand l'AC reçoit toutes les réponses, il calcule la somme de toutes les durées $T = \sum_{i=0}^n t_i$ et réactualise sa durée de cycle.

- Si $T < CycleMax$, la valeur C est actualisée et sera égale à la première valeur au-dessus de T de l'ensemble E_c . la différence $(C-T)$ est partagée à la proportionnelle entre les différentes phases. Le AC exécute le cycle (envoie un message *accept* à l'Agent Phase avec sa durée supplémentaire, le retire de *collab_group* ; met à jour les variables $C=C-T_j$, $T=t+T_j$; et enfin il passe à 4) tant que *collab_group* n'est pas vide).
- si $T > CycleMax$; une négociation commence. La résolution du conflit se termine par la modification des durées des phases calculées auparavant.

Algorithme 1 : partie principale du calcul du plan des feux

1. Choisir le cycle égal à la valeur juste supérieure à T parmi les valeurs possibles autorisées pour le cycle $\{40, 60, 80, 100, 120, 140\}$. Par exemple, si $T = 49$ secondes, prendre $Cycle = 60$ secondes. La différence entre $Cycle$ et T ($\Delta T = (Cycle-T)$) sera partagée de façon égale entre toutes les phases ($\Delta T_i = \Delta T / m$); m étant le nombre de phases.
2. Ordonner les phases par rapport à leur indice d'urgence I_i
3. AC envoie un message d'acceptation à chaque Agent Phase avec son ordre de passage et sa nouvelle durée ($T_i + \Delta T_i$) et exécute le cycle.

Algorithme 2 : Protocole d'exécution de cycle normal
(quand $T \leq CycleMax$)

- Le AC fixe le coût, $c=1$ (un seul arc peut être pénalisé) et lance un appel d'offre auprès des agents phases de *collab_group*.
- Chaque Agent Phase répond en proposant la partie de la durée de vert qu'il peut offrir pour résoudre le problème (Δt) en respectant le coût de l'offre c .
- Le AC vérifie le nouveau cycle, s'il est inférieur à $CycleMax$ il arrête la négociation, sinon il incrémente $c=c+1$ et lance un nouveau appel d'offre. A chaque fois, il vérifie si l'exécution d'une phase est urgente (indice $I_j > \text{à tous les } I_i$) ; il exécute alors cette phase et continue la négociation avec les autres.

Algorithme 3 : Résolution des conflits quand $T > CycleMax$)

9.5 Résultats

ASUR est implémenté sous la plateforme JADE. Le logiciel permet de tracer le réseau de manière graphique très simple et d'introduire ses paramètres (voir Figure 39). Les résultats sont analysés en termes de régularité des bus et de temps total de retard des bus et des voitures particulières (voir Figure 41).

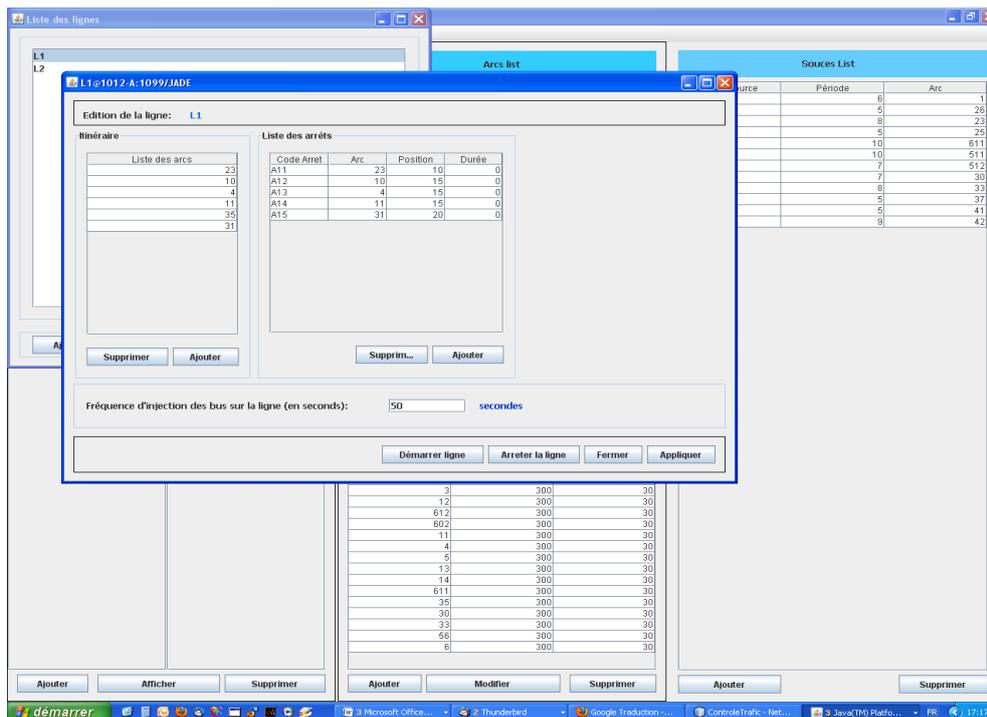


Figure 39 : Configuration d'une ligne bus sous le logiciel ASUR

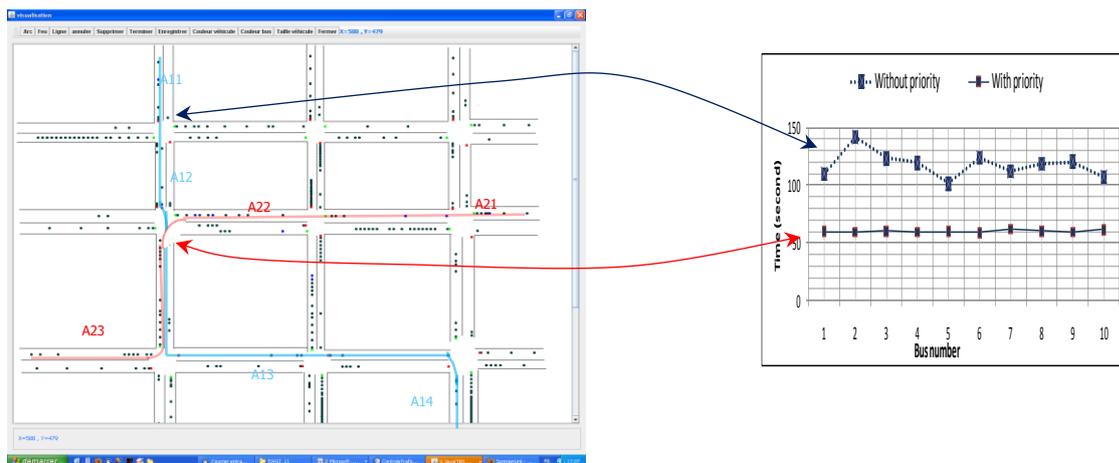
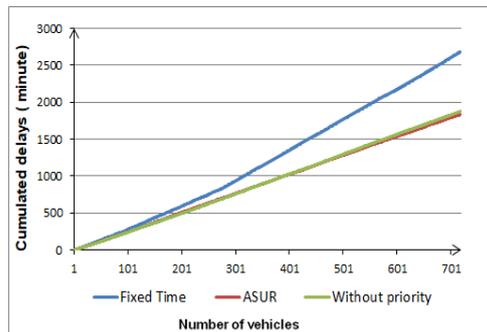


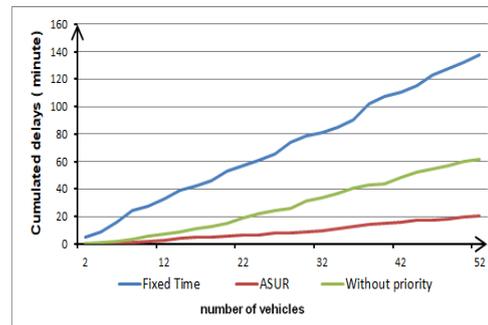
Figure 40 : Temps de parcours du bus sur deux carrefours, dont un régulé avec ASUR

Les figures (Figure 41) donnent les résultats de simulation de trois stratégies : ASUR, une stratégie à feu fixe et une stratégie multi-agents qui ne donne pas de priorité aux transports en commun (ASUR sans priorité). Ces figures donnent les sommes des temps perdus par tous les bus (véhicules) lors des arrêts aux feux de circulation (Figure 41.a) et aux stations des bus (Figure 41.b). Comme nous le constatons, la stratégie ASUR améliore le temps de trajet en bus (retards cumulés) de 85% par rapport à la stratégie à temps fixe. Si l'on applique la stratégie ASUR sans la priorité aux bus, le retard cumulé des bus se trouve amélioré de 76%, mais, comme le montre la Figure 41.a, les retards de la voiture particulière ne se trouvent pas plus améliorés qu'avec la stratégie ASUR. La stratégie « sans priorité » et la stratégie ASUR donnent les mêmes retards cumulés pour les voitures particulières. Ils améliorent tous les deux les retards des véhicules TC de 30%. Grâce à la stratégie ASUR le délai moyen (temps perdu) par bus est égal à 23 secondes, alors qu'il est égal à 2,6 minutes avec la stratégie Fixed Time. La Figure 40 montre également qu'ASUR n'améliore pas seulement la durée du parcours des bus, mais

aussi leur régularité. Considérant ces deux résultats, nous pouvons conclure que la stratégie ASUR est la meilleure, puisqu'elle améliore significativement le trafic des bus, ainsi que le trafic général.



a: Retards des véhicules particuliers



.b. Private vehicles cumulated

Figure 41. Retards cumulés des VP et des TC

10. Régulation dans un environnement de systèmes coopératifs

La thèse de Matthis Gaciarz a également porté sur la modélisation multi-agents du problème de la régulation du trafic urbain multimodal. La différence entre le problème traité par la stratégie ASUR et celui de la thèse de Matthis réside dans les méthodes de mesure et de communication. En effet, la thèse se place dans un environnement coopératif.



Figure 42 : Régulation du trafic dans un environnement coopératif

Les systèmes coopératifs sont fondés sur les communications et le partage d'informations entre véhicules, infrastructures routières et infrastructures de communication. Ils permettent aux véhicules d'interagir avec leur environnement et aux conducteurs d'avoir une meilleure perception des conditions de circulation. L'usage de ces systèmes influence la manière de circuler et de réguler la circulation.

10.1 Quelques approches pour la régulation du trafic dans un environnement coopératif

Les travaux sur la régulation des systèmes coopératifs appartiennent, comme ceux qui s'intéressent à la gestion des véhicules autonomes, à la famille souvent désignée par le terme AIM (*Autonomous Intersection Management*). Ils concernent souvent la coordination des véhicules, soit par les véhicules eux-mêmes, soit de la part de l'intersection. Certaines méthodes s'appuient sur le comportement des conducteurs, d'autres sur les contrôleurs des intersections. Nous pouvons citer par exemple la publication Bazzan et al. [2] qui traite des effets de l'intégration de la prise de décision concernant les choix d'itinéraire par les conducteurs et les mesures de contrôle par les feux de circulation. Les auteurs évaluent différents types d'adaptation, dans lesquels les conducteurs seuls, les contrôleurs seuls, ou les deux à la fois adaptent leurs comportements. Le travail conclut que la coadaptation mène à une amélioration du trafic, en particulier dans les situations à plus large échelle qui impliquent des centaines de véhicules.

Certains chercheurs ont traité le cas du trafic mixte, comme Dresner and P. Stone ([18][19]) qui proposent une régulation dans un environnement mixte entre des véhicules autonomes et des conducteurs humains. Ils proposent un mécanisme d'attribution du droit de passage pour les véhicules autonomes s'appuyant sur la réservation et un mécanisme de régulation classique pour les conducteurs humains.

Certains auteurs ont traité le cas d'une intersection isolée, comme dans [46] où les différents flux du trafic dans une intersection sont organisés en courants de circulation. Les courants sont organisés sans conflits possibles et le problème d'attribution des phases de vert est alors résolu par ordonnancement. Dans les articles [47] et [48], des auteurs proposent des mécanismes évaluant l'importance d'un gain de temps pour chaque conducteur. Dans ces mécanismes, chaque véhicule a un budget lui permettant d'acheter ou de vendre des créneaux temporels. Dans [47], un mécanisme d'enchère est proposé: lorsqu'un véhicule s'approche d'une intersection, il a la possibilité d'enchérir avec une partie de son budget pour tenter d'obtenir le premier créneau de passage disponible, qui lui assurera une traversée rapide de l'intersection. Dans [48], les véhicules peuvent échanger leurs créneaux respectifs contre du crédit. Un conducteur pressé pourra dépenser ce qu'il a économisé pour gagner du temps, les autres gagneront ainsi du crédit. Un agent courtier gère ces échanges en fonction des demandes de chaque conducteur.

[51] propose également une approche inspirée par les marchés. Lorsqu'ils choisissent leurs itinéraires, les conducteurs optent souvent pour le plus rapide après avoir estimé le temps de trajet pour chacun des itinéraires potentiels. Dans ce modèle, les conducteurs doivent acheter une réservation auprès d'agents gestionnaires, afin de pouvoir franchir les intersections. Ce système de réservation fournit des incitations aux conducteurs afin de les amener à explorer des itinéraires alternatifs. Dans ce mécanisme, chaque gestionnaire d'intersection doit déterminer ses frais de réservation afin de maximiser son profit. Avec quelques véhicules, le gestionnaire d'intersection obtient un profit peu élevé, mais avec un grand nombre de véhicules, il perd son profit du fait de la congestion. Il doit donc ajuster ses frais de réservation afin d'éviter d'attirer un trop grand nombre de véhicules. Les gestionnaires d'intersection utilisent un Q-learning afin d'ajuster ces frais de réservation.

Le modèle proposé dans [15] utilise la coordination entre les agents. Dans ce modèle, les agents calculent les conséquences de leurs actions en utilisant des réseaux de contraintes permettant de prédire et d'éviter l'apparition d'états indésirables. À l'échelle d'une intersection, des situations d'interblocage (*deadlocks*) peuvent avoir lieu. Ces situations sont considérées comme des états indésirables par l'algorithme, lequel cherche à les éviter.

[32] propose une approche pour construire des politiques de régulation multi-agents en utilisant des méthodes d'apprentissage automatique non supervisé. Sur une intersection isolée, les véhicules peuvent se déplacer et doivent éviter les collisions.

[24] et [11][25] ont proposé une approche d'évitement des collisions (CA, *Collision Avoidance*). Cette approche consiste à ajuster la vitesse des véhicules autonomes approchant une intersection afin d'éviter toute collision. L'ajustement de la vitesse des véhicules affecte leur ordre d'admission dans l'intersection. [38] présente le problème de d'évitement des collisions comme un problème d'optimisation sous contraintes non linéaires.

[20] propose une stratégie coordonnée hiérarchisée à trois niveaux : des agents locaux (LTA, *Local Traffic Agents*) réalisent une politique de régulation à l'échelle de l'intersection. Un agent à une plus large échelle (ITA, *Information Traffic Agent*) mémorise des informations sur l'état de chaque intersection. Puis, des agents coordinateurs (CTA, *Coordinator Traffic Agents*) surveillent les intersections d'une zone pour fournir aux LTA des informations sur l'état de leurs voisins, en particulier en cas de congestion, leur permettant ainsi d'ajuster leurs comportements en prenant en compte des informations et des objectifs à plus large échelle.

Comme dans [50], [36] s'appuie sur des groupes de courants compatibles (*signal groups*), qui sont représentés par des agents. À l'échelle de l'intersection, chaque groupe de courants négocie avec les autres pour obtenir le feu vert, ou une extension de vert, en fonction de la taille des files d'attente des véhicules pour chaque groupe de courants. La logique floue est utilisée pour déterminer si les files doivent être considérées comme longues ou courtes, de manière non booléenne. À l'échelle du réseau, les intersections sont capables d'échanger leurs données de trafic et de contrôle. Cela permet aux groupes de courants de prendre en compte les décisions de contrôle des intersections voisines.

[9] représente le contrôle du trafic comme un jeu stochastique. Le trafic a différents états possibles et les différentes politiques de trafic sont les actions pouvant être réalisées par l'agent contrôlant l'intersection. Un *Q-learning* distribué est réalisé afin d'apprendre à appliquer la meilleure politique de trafic pour chaque état.

[27] propose un mécanisme dans lequel les véhicules communiquent leurs itinéraires aux intersections. Ceci permet à chaque agent gestionnaire d'intersection de produire une estimation de la date d'admission des véhicules. Cette date de passage est ensuite communiquée aux véhicules, lesquels peuvent alors changer leur itinéraire à partir de ces estimations plus réalistes. Cependant, permettre ainsi aux véhicules de réaliser un choix dynamique d'itinéraires avec des buts individuels est susceptible de mener au paradoxe de Braess. Les auteurs proposent un changement dynamique de la topologie du réseau pour l'éviter.

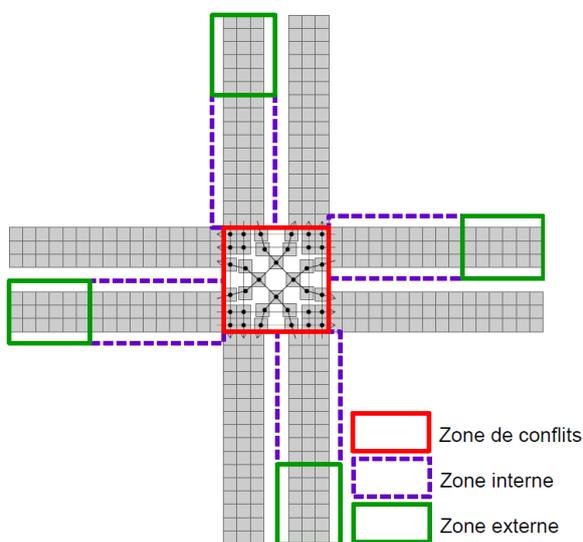
Dans [39], le réseau est représenté par un graphe, subdivisé en sous-graphes appelés "mondes". Cette division du graphe s'appuie sur certaines des propriétés classiques des graphes. Le problème principal est ainsi subdivisé en sous-problèmes, plus faciles à résoudre, et les agents négocient la position des "portes" permettant aux agents d'aller d'un monde à un autre. Un scénario de gestion du trafic est par ailleurs présenté succinctement, illustrant comment cette approche pourrait être appliquée à la gestion du trafic.

Plusieurs de ces publications ont inspiré les travaux de thèse de Matthis Gaciarz, principalement les mécanismes d'attribution du droit de passage de [18][19], l'organisation des courants de circulation dans l'intersection de [46], la négociation [50] et [36] et la communication [25], etc. Matthis a proposé deux stratégies. La première concerne la régulation de l'intersection ou *comment donner le droit de passage à chaque véhicule voulant traverser le carrefour*. La seconde est une stratégie qui inclut en plus la contrainte de la régularité des véhicules de transport en commun sur le réseau.

10.2 Modélisation du problème d'attribution du droit de passage

La première stratégie de régulation du trafic s'applique pour l'intersection et s'appuie sur la négociation automatique. La méthode se fonde sur un système d'argumentation décrivant l'état du trafic et les préférences de chaque véhicule, appuyé par des méthodes de raisonnement pour les véhicules et les infrastructures.

Le problème résolu consiste à attribuer une date d'admission à chaque véhicule approchant d'une intersection. Cette date est définie comme un créneau durant lequel le véhicule a le droit de s'engager dans la zone de conflit de l'intersection afin de la traverser. Tous les véhicules et les intersections sont modélisés par des agents. La représentation physique du réseau est faite par un modèle s'appuyant sur un automate cellulaire.



Intersection composée de deux zones :

- Zone de conflit composée de cellules. Les cellules appartenant à différentes trajectoires (toutes les cellules de la zone de conflit dans cet exemple) sont des points de conflit. Le véhicule s'engage dans la zone de conflit quand il a le droit de passage.
- Le mécanisme de négociation tient compte de manière dynamique des véhicules arrivant dans la zone interne de l'intersection.

Négociation du droit de passage

Les véhicules à l'approche d'une intersection négocient une "configuration", i.e. un ensemble de dates d'admission dans l'intersection pour chaque véhicule à l'approche de celle-ci. Dans cette négociation, chaque véhicule est capable de proposer des configurations. Les véhicules doivent s'accorder sur une de ces configurations, usant d'arguments sur l'état du trafic pour influencer les décisions des autres. Ces configurations sont construites par les véhicules en utilisant des contraintes obligatoires (s'appuyant sur la position physique de chaque véhicule) et des contraintes de sécurité (visant à éviter les collisions au sein de la zone de conflit en utilisant un délai de sécurité). De plus, les véhicules peuvent utiliser des contraintes optionnelles pour guider leurs explorations individuelles de l'espace de recherche,

Attribution du poids aux véhicules

Les véhicules ont la capacité de communiquer et de choisir collectivement la configuration de l'intersection. Pour des raisons de sécurité, l'intersection n'a qu'une seule configuration courante à la fois. Les agents utilisent cette configuration comme point de départ pour la négociation. Dans cette négociation, le but d'un agent est de remplacer la configuration courante par une autre configuration qui améliore son utilité individuelle.

Pour mener cette négociation, les agents s'appuient sur un langage de communication spécifique pour interagir. Chaque véhicule dispose d'un poids déterminant son importance dans les négociations. Ce poids est fixé par l'infrastructure en fonction du niveau de coopération de chaque véhicule.

Le mécanisme s'appuie sur un modèle d'argumentation. À travers ce processus de négociation, les agents cherchent à atteindre un accord collectif en faisant des concessions. Pour réaliser une négociation, l'agent véhicule s'appuie sur son propre état mental fondé sur ses connaissances, ses buts et ses préférences (Figure 43). Cet état mental évolue durant la négociation. Les agents utilisent des arguments pour modifier les états mentaux des autres agents et pour faire évoluer leur propre état mental afin d'atteindre un meilleur compromis pour chacun.

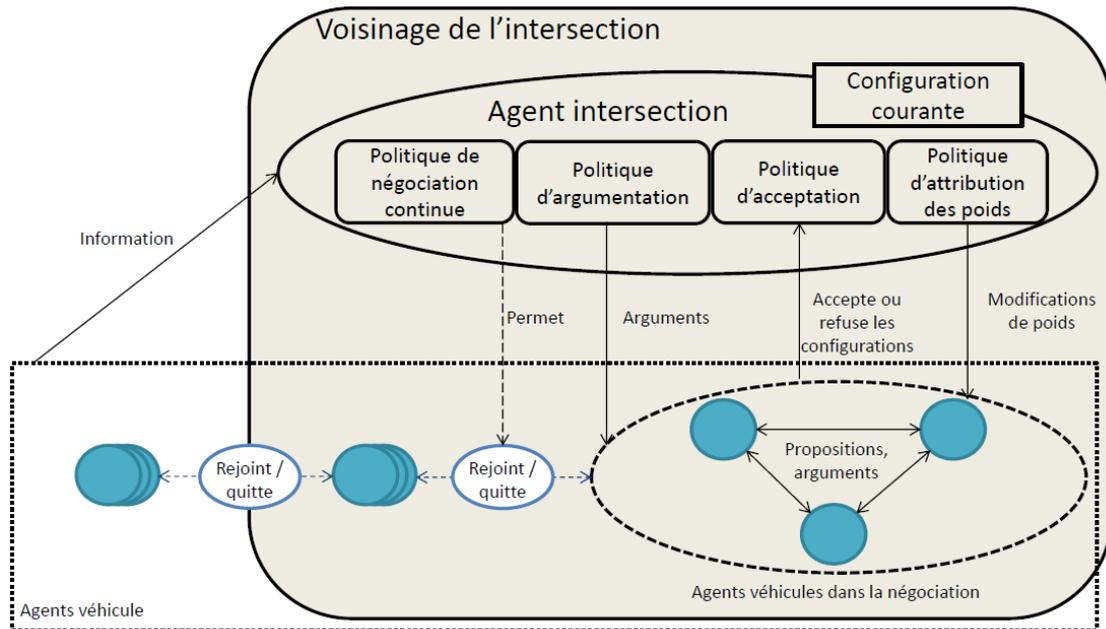


Figure 43 : Architecture des agents véhicules et du système de négociation

La décision est distribuée : chaque agent est capable de raisonner et de communiquer avec l'intersection et les autres véhicules. L'Agent Intersection prend part à la coordination des interactions des véhicules. Les véhicules construisent individuellement des configurations complètes, puis décident collectivement du choix final avec un processus de négociation. Afin de construire des configurations, le problème d'attribution du droit de passage est modélisé comme un problème de satisfaction de contraintes CSP (*Constraint Satisfaction Problem*). Le CSP convient bien pour la résolution de ce problème, parce qu'il permet une modélisation facile des contraintes structurelles (contraintes de sécurité et contraintes physiques).

Le système d'attribution de poids incite les véhicules à la coopération, mais laisse à chaque agent la possibilité de participer comme il l'entend à une décision collective et à prendre des décisions de manière indépendante. Signalons que ce mécanisme prend en compte les véhicules approchant directement de l'intersection. Etant donné que les véhicules s'approchent de l'intersection de manière continue, un mécanisme de gestion dynamique des configurations est proposé. Celui-ci gère cet aspect en définissant quels agents prennent part à chaque étape de la négociation, pour quels véhicules la configuration doit fournir une date d'admission, ainsi que les conditions dans lesquelles la configuration peut être révisée une fois qu'elle a été choisie. La Figure 44 donne l'état du trafic dans le cas où la négociation entre les véhicules est continue (CP : *Continuous Policy*) et dans le cas *premier arrivé, premier servi* (FCFS).

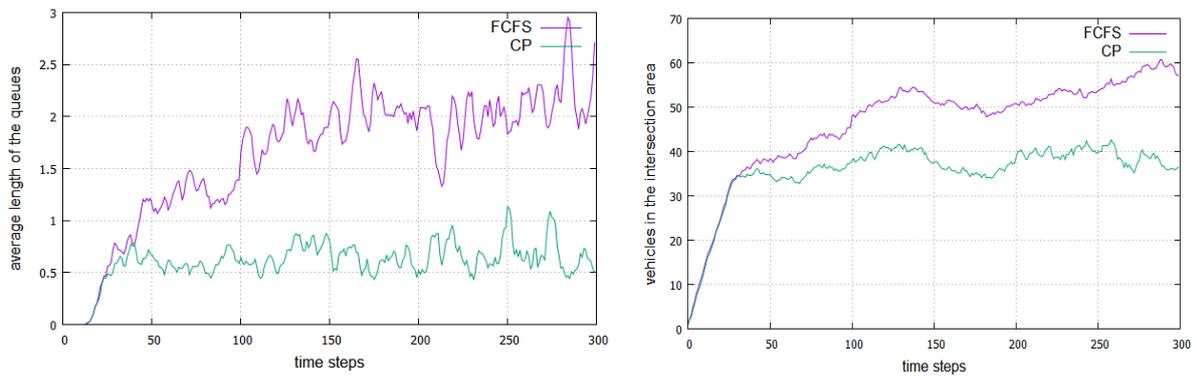


Figure 44 : Politique de négociation continue versus politique *premier arrivé, premier servi*

10.3 Coordination des intersections pour le passage du bus

L'objectif est d'identifier une progression du bus et une politique conjointe des intersections permettant de donner l'ensemble des dates d'admission du bus b dans toutes les intersections de son itinéraire jusqu'au prochain arrêt.

Deux politiques sont proposées.

* Une stratégie descendante : dans ce cas, le bus est responsable de la décision finale. Dans cette approche, le bus fait une demande de passage et les intersections font une ou plusieurs propositions de politiques individuelles. Ces propositions contiennent la date de passage de bus, le nombre de véhicules qui passent devant le bus et le nombre de véhicules qui s'ajoutent avant le bus dans sa voie. Le bus construit un arbre pour examiner la compatibilité de ces propositions et le score de chaque composition possible. Il choisit ensuite une politique conjointe réalisable qui sera mise en œuvre par les intersections.

Dans cette approche, les intersections sont des agents et communiquent au bus leur capacité à appliquer certaines politiques compte tenu de leur propre contexte local. Cette capacité dépend de différents critères, dont l'état du trafic autour de l'intersection, mais aussi autour des intersections voisines qui sont potentiellement localisées en dehors de l'itinéraire du bus. Communiquer l'ensemble des différentes possibilités aurait un coût important.

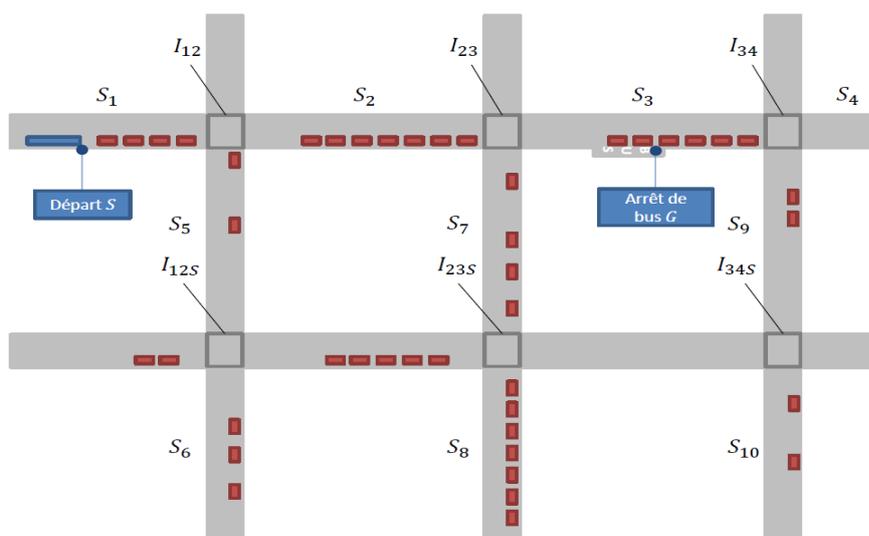


Figure 45 : Scénario de priorité pour un bus traversant n intersections

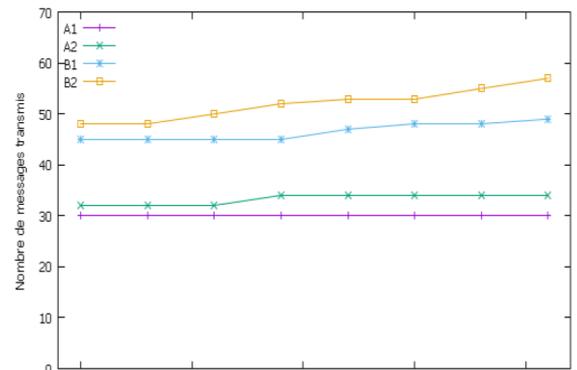
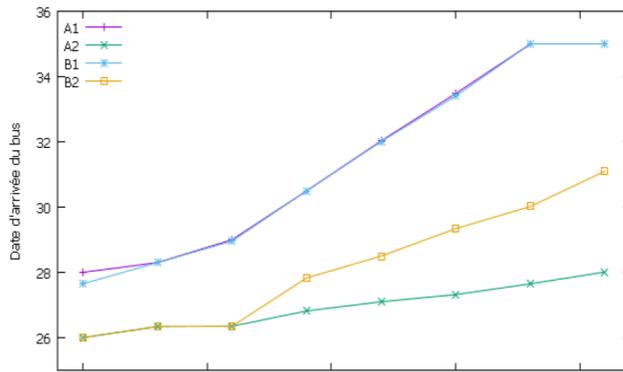


Figure 46.b : Nombre moyen de messages émis avant l'obtention d'une première politique jointe valide.

Figure 46 : Résultat de la stratégie descendante pour un bus

* Une stratégie ascendante : les intersections reçoivent les requêtes d'un ou plusieurs bus et se coordonnent elles-mêmes afin de produire une politique conjointe permettant de satisfaire la (ou les) requêtes(s) reçue(s) de(s) bus. Dans cette approche, la recherche de solutions est réalisée de manière arborescente par des intersections ou des groupes d'intersections appelés "coalitions". L'arbre est constitué de politiques jointes partielles.

Avec cette approche, des coalitions entre intersections sont formées préalablement à la coordination entre le bus et les intersections. Pour cela, les intersections s'envoient mutuellement des propositions une fois que le bus a fait sa demande de passage. Les intersections les moins compatibles entre elles, forment des coalitions. Ces coalitions sont ensuite considérées comme des entités uniques. Une coalition ne propose pas au bus de politique individuelle d'intersection, mais directement des politiques jointes pour les intersections composant la coalition. Ceci a pour intérêt de réduire l'espace de recherche pour le bus.

Matthis a réalisé plusieurs tests et analyses sur les améliorations du temps de parcours des bus, et le temps de communication et nombre de messages échangés avec la première méthode (descendante). Ses évaluations montrent d'excellents résultats quand il s'agit d'un seul bus. Les recherches doivent être poursuivies pour résoudre le problème d'un réseau avec plusieurs lignes de bus.

11. Guidage et véhicules autonomes

Il est évident que la combinaison et la synergie de multiples actions sont nécessaires pour réduire la congestion tout en préservant le niveau de mobilité dans les zones urbaines. Dans la thèse de Dihya Atmani, la régulation est fondée sur la planification des déplacements multimodaux par le biais de l'information aux voyageurs et l'utilisation des véhicules autonomes.

Il s'agissait de développer un système dynamique d'aide aux déplacements dans un réseau de transport multimodal pour les voyageurs équipés d'un système d'information tout tenant compte des usagers non équipés de ce type de système.

La partie développement a consisté à construire l'outil informatique d'aide aux déplacements grâce à une modélisation multi-agents. Cet outil a été développé dans le même environnement que celui de la stratégie ASUR et a bénéficié de son interface graphique. Il permet de donner l'information à l'utilisateur sur l'itinéraire optimal qui satisfait ses besoins et ceux du réseau. L'itinéraire est calculé suivant l'équilibre de Wardrop, grâce à la transformation de Beckman. L'idée est de donner au voyageur

l'information qui permet d'optimiser le trafic du point de vue du réseau. Des évaluations ont été conduites sur l'impact de l'information sur les coûts des itinéraires, l'impact de la réorientation des usagers vers les transports en commun empruntant le réseau routier, ainsi que l'intérêt de passer à des véhicules autonomes.

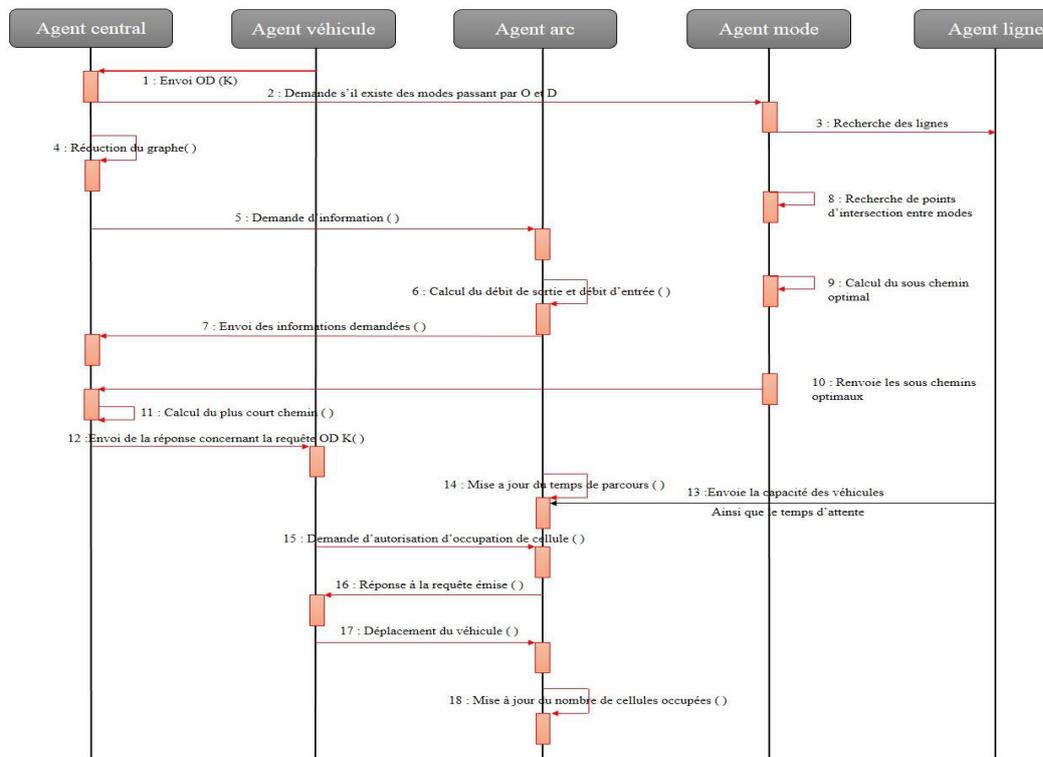


Figure 47 : Diagramme des séquences du modèle multi agent d'affectation dynamique multimodale

Grâce à mes activités au sein de l'action COST ARTS, Dihya Atmani a pu bénéficier d'un séjour scientifique à l'université de Newcastle. Ceci lui a permis d'obtenir les données du réseau de la ville contenant 320 nœuds et 679 arcs (voir Figure 48). Elle a ainsi pu tester l'outil en simulation, d'abord pour le seul cas de la voiture sur la totalité du réseau, puis pour le cas multimodal (voiture, bus et métro) sur un sous-réseau de la ville. Pour valider le modèle, les résultats ont été comparés à ceux fournis par l'université de Newcastle. Dans les deux cas, mono et multimodal, les résultats ont montré que la présence d'usagers informés permet de réduire les coûts de déplacements et donc d'améliorer la performance générale du réseau. Afin d'appuyer ce résultat, une étude théorique a été menée sur le paradoxe de Braess.

Puisque l'objectif est d'encourager les usagers à utiliser les transports en commun, une étude qui consiste à inciter les adeptes du mode voiture particulière à se réorienter vers les transports en commun a été menée. Pour ce faire, une modélisation des parkings, ainsi que des arcs de transfert en mode marche à pied a été effectuée. Plusieurs scénarios de l'impact de la tarification du stationnement sur l'usage de la voiture particulière ont été testés.

Les véhicules autonomes ont été introduits par la suite comme un mode de transport à part entière. Les évaluations en simulation ont montré que ce mode améliore considérablement les performances générales du réseau.

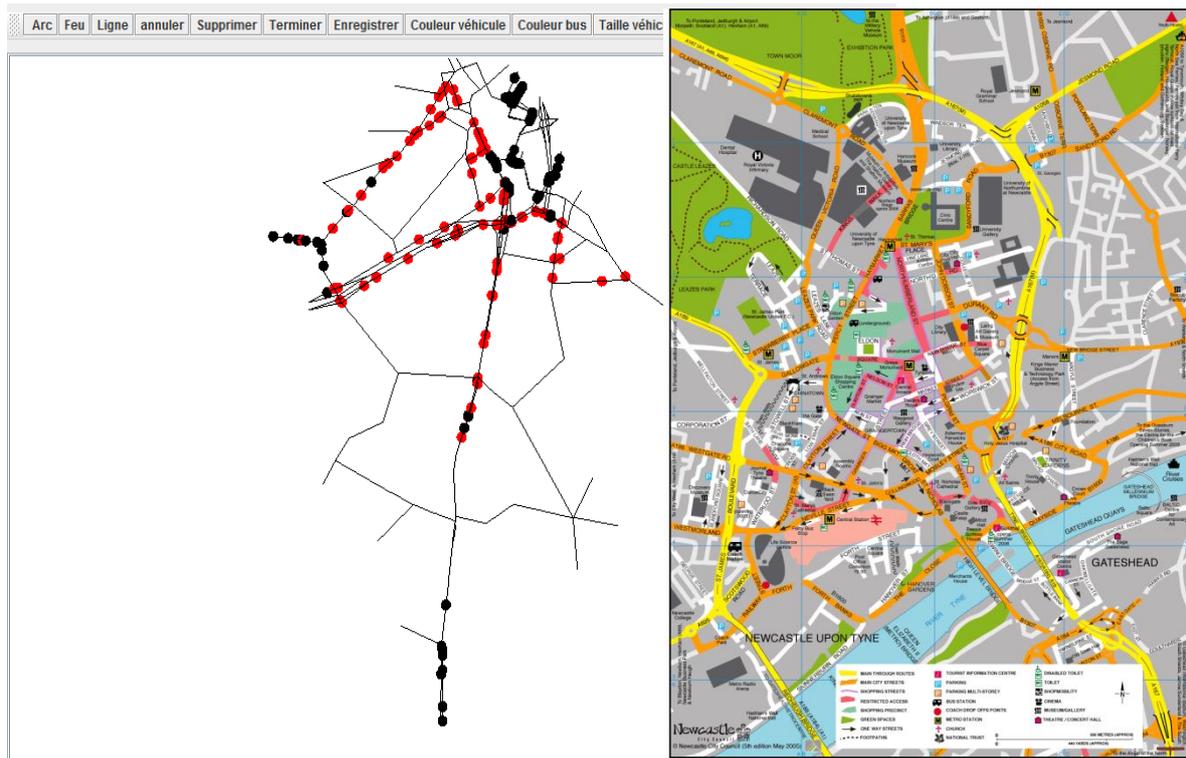


Figure 48 : Réseau de Newcastle, Royaume-Uni

12. Modélisation microscopique du trafic

12.1 Modélisation à l'aide du logiciel DYNASIM

Afin d'évaluer les stratégies de régulation du trafic bimodal développées, il était important de disposer d'un outil d'évaluation pour un réseau. Le choix a été fait d'une jeune entreprise française qui a développé un outil de simulation microscopique. Moyennant des frais de licence très faibles compte tenu du marché, DYNALOGIC mettait à notre disposition l'outil de simulation Dynasim. Pour cette société c'était une opportunité de faire connaître l'outil à travers nos publications d'une part, et de développer l'aspect multimodal en s'appuyant sur nos applications d'autre part. J'ai donc modélisé un réseau de la ville de Paris, en concertation avec mes collègues Florence Boillot, Pierre Vinant et Gérard Scemama, qui enrichissaient ce travail par leur connaissance des réseaux réels. J'ai également encadré à cet effet un stagiaire de licence, Fabien Guillon, qui a participé à la modélisation de plusieurs carrefours et aux mesures sur le terrain des pourcentages de mouvements tournants quand les données fournies par la ville de Paris étaient trop anciennes. Le réseau modélisé comprenait 24 carrefours au sud de Paris, incluant la place d'Italie traversée par quatre lignes de bus (voir Figure 49).

La modélisation avec Dynasim n'est pas aisée. Une intersection est modélisée sur deux calques. Le premier concerne le réseau physique (voies de circulation, signaux de signalisation, feux, etc.). Le second comprend les flux, les origines-destinations, le mode de transport, ... (voir Figure 50) La complexité de la modélisation vient du fait que le changement de voies et les règles de traversée des carrefours sont gérés par des panneaux *Cédez le passage*, les véhicules arrivant par une voie comportant un tel panneau devant donner la priorité aux autres. Les emplacements précis de ces panneaux sont très importants : même un faible écart dans leur position change fondamentalement le comportement du trafic sur le carrefour.

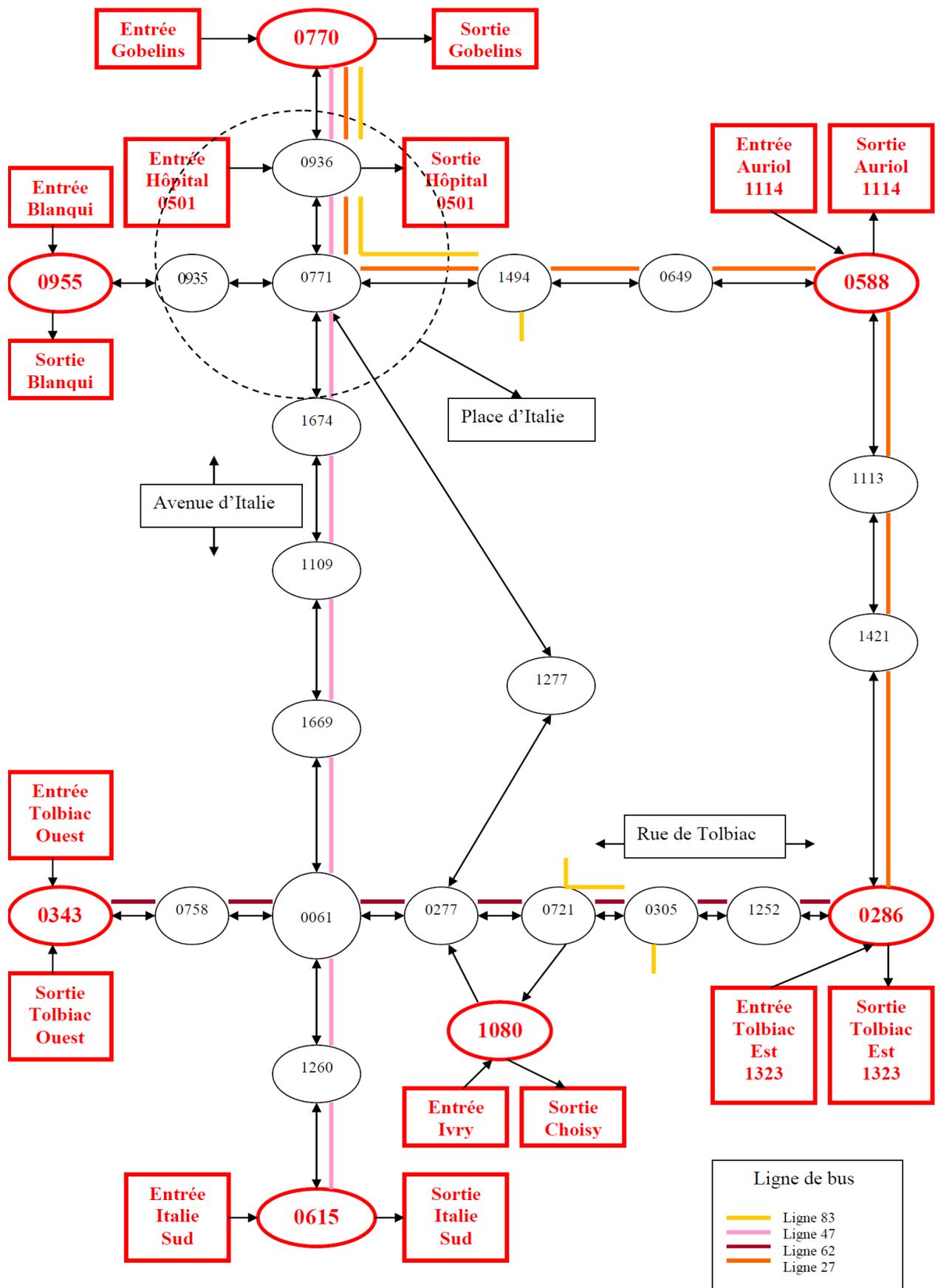


Figure 49 : Réseau modélisé par le modèle Dynasim

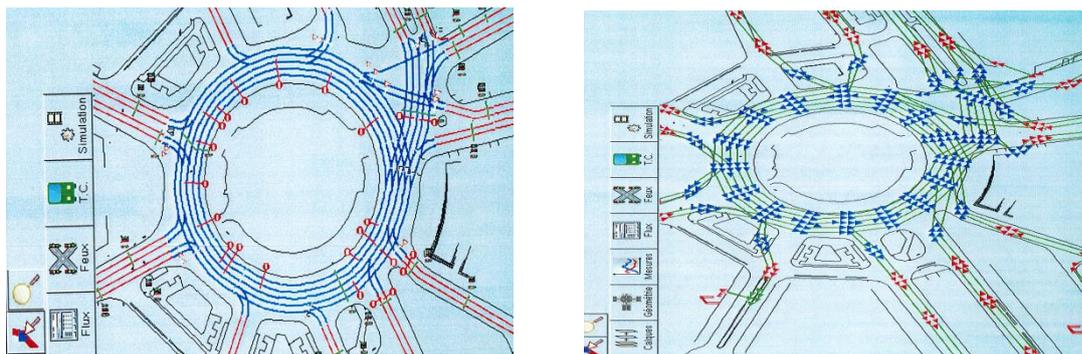


Figure 50 : Modélisation de la place d'Italie avec le logiciel Dynasim

Par la suite, DYNALOGIC s'est orienté vers le marché américain, négligeant de poursuivre les développements de commandes spécifiques pour le réseau bus. Nous n'avons donc pas pu bien exploiter le logiciel pour tester les stratégies en réseau. C'est ce qui explique que je me sois tournée par la suite vers le logiciel SUMO. L'expérience fut cependant très enrichissante, puisqu'elle m'a permis de mieux connaître tous les détails du trafic urbain du point de vue opérationnel.

12.2 Modélisation à l'aide du logiciel SUMO

Consciente de la nécessité de disposer d'un modèle microscopique pour l'évaluation des stratégies de régulation, j'ai profité du stage de Dora Lee Borg, de l'université de La Valette, Malte, pour modéliser une partie du réseau du Conseil Général de Seine-Saint-Denis (CG93) sur lequel nous travaillons dans le cadre du projet Lasdim. Dora Lee Borg a été sélectionnée pour bénéficier d'une bourse de l'ambassade de France à Malte qui lui permettait d'effectuer un stage de trois mois dans un laboratoire de son choix. Conseillée par son encadrant avec lequel j'avais travaillé au sein de l'action COST ARTS, elle a choisi d'effectuer son stage sous ma direction. Ce stage m'a permis de mesurer de nouveau la difficulté de modéliser un réseau réel. Alors que deux heures avaient suffi à Dora pour modéliser une intersection théorique avec le logiciel SUMO, il lui a fallu trois mois pour modéliser avec des données réelles trois intersections de la ville de Bobigny. Plusieurs déplacements sur le terrain ont été nécessaires pour identifier les erreurs des configurations obtenues d'OpenStreetMap et pouvoir les corriger. Des échanges réguliers avec le CG93, fournisseur des données, ont également été nécessaires durant cette période.

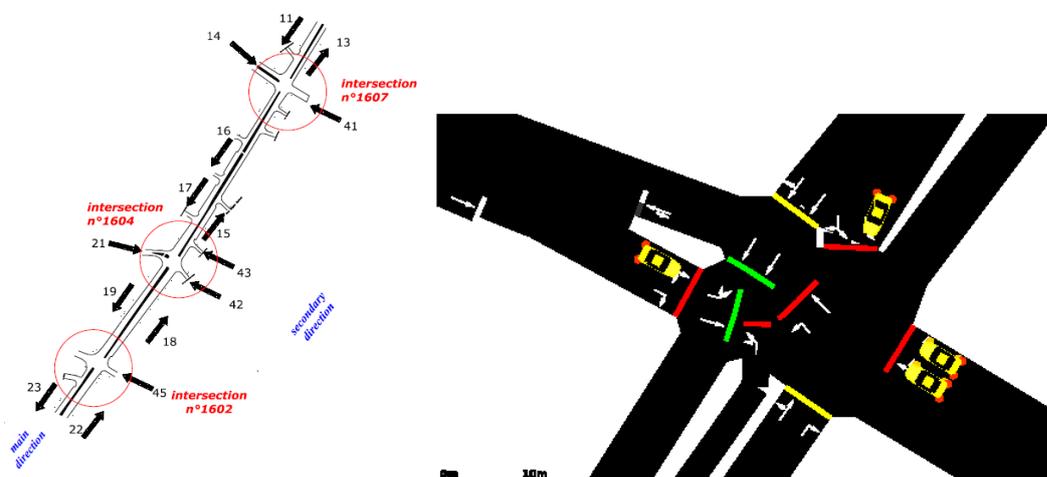


Figure 51 : Modélisation du réseau de la ville de Bobigny avec le logiciel SUMO

SUMO a un avantage indéniable comparé au logiciel Dynasim et à d'autres modèles microscopiques. Développé à l'origine par DLR et amélioré grâce aux recherches internationales, il s'appuie sur une solide théorie du trafic. Une fois la modélisation effectuée, les résultats sont rationnels et ne dépendent pas de petits détails comme dans Dynasim. C'est ce qui m'a convaincue de privilégier ce même modèle pour la thèse de Mouloud Khelef (Figure 52).



Figure 52 : carrefour multimodal de la ville de Constantine

13. Mes contributions à la recherche sur cette thématique

Sur cette thématique de régulation du trafic urbain multimodal, mes principales contributions obtenues soit par mes recherches individuelles, soit en collaboration avec des collègues ou en encadrant des étudiants en thèse ou en stage, se situent au niveau des différents modules des stratégies de régulation. A savoir (1) le modèle, (2) l'objectif de régulation, (3) la méthode d'optimisation, et enfin (4) l'évaluation des résultats. Ces contributions consistent principalement en:

1- Développement de modèles des réseaux urbains multimodaux :

- Modèle macroscopique linéaire pour les TC.
- Modèle événementiel pour les TC.
- Modèle multi-agents multimodal VP et TC.
- Modèle multi-agents multimodal VP et TC dans un environnement coopératif.
- Modèle multimodal d'affectation du trafic, appliqué aux modes train, VP classique, VP autonome et bus.

2 –Spécification de l'objectif de régulation

L'objectif était soit seulement de réguler le trafic général et de favoriser le passage des véhicules de transport en commun, soit de faire respecter en plus l'intervalle entre les véhicules TC grâce à une optimisation mono ou multi-objectifs.

3- Application de techniques connues dans les domaines de la programmation dynamique, des méta-heuristiques ou des systèmes multi-agents, pour résoudre ce problème pratique de grande dimension. Ceci dans les domaines suivants :

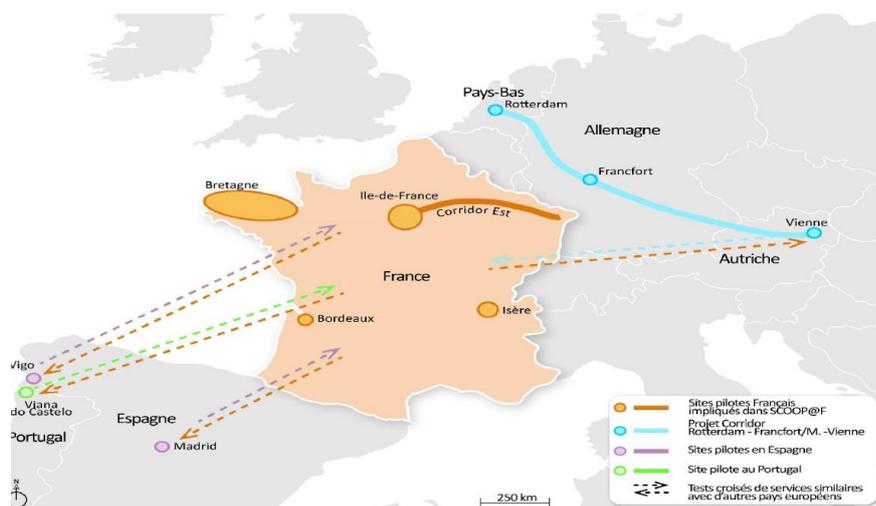
- Commande Linéaire quadratique
- Commande prédictive à base de modèle
- *Particle swarm optimisation*
- Négociation
- Collaboration

4- Pour l'évaluation des réseaux urbains, j'ai effectué, à l'aide de stagiaires de licence, la modélisation microscopique d'un :

- Réseau de vingt-quatre carrefours réels de la ville de Paris sur lesquels circulent quatre lignes de bus avec le modèle microscopique Dynasim,
- Réseau réel de cinq carrefours de la ville de Bobigny en Seine Saint-Denis avec le modèle microscopique SUMO.

14. Perspective

Les véhicules autonomes sont déjà une réalité. D'une part, quatre mille d'entre eux sont aujourd'hui commercialisés et près de deux mille kilomètres de route sont aujourd'hui équipés en systèmes communicants. D'autre part, la France a annoncé cette année que le cadre législatif allait évoluer pour permettre la circulation des véhicules autonomes "d'ici 2022". Ceci permettra d'expérimenter sur les routes les véhicules autonomes de niveau 4, pour lesquels l'autonomie est quasi totale, mais reste limitée à certaines voies telles que les autoroutes.



Or systèmes coopératifs et véhicules autonomes modifient la manière de réguler le trafic. Dans mes perspectives pour 2018 est prévue une expertise, pour le compte de Renault, sur l'introduction des Robotaxis en ville (projet en cours de montage).

Par ailleurs, on sait qu'une liaison par un transport en commun classique n'est pas recommandée lorsque la demande de transport est insuffisante. Ainsi, dans une partie des cas, la création d'une ligne de bus « à la demande » est justifiée - selon la configuration et le nombre des origines-destinations compatibles avec le tracé principal. Cependant, il reste de nombreux cas où le covoiturage est nécessaire – il devient d'ailleurs de plus en plus important, pour des raisons économiques, écologiques, humaines.

Enfin, la part du vélo en ville est devenue importante et l'on peut prévoir également une croissance des engins de mobilité personnelle (catégorie de véhicules destinés à transporter un individu à des vitesses n'excédant normalement pas 25 km/h, qui comprend des skateboards électriques, des monocycles auto-équilibrants, des *Segways*, etc.). Grâce aux nouveaux moyens de mesure et de communication, ces mobiles seront inclus dans les systèmes de régulation multimodale.

15. Bibliographie

- [1] Balbo, F., Scemama, G., Tendjaoui, M., 2002. SATIR: a multi-agent decision support system for bus networks. Workshop ECAI Agent Technologies in Logistics, juillet, Lyon, France.
- [2] Bazzan, A., D. De Oliveira, F. Klügl et K.i Nagel. (2008) « To adapt or not to adapt—consequences of adapting driver and traffic light agents ». In : Adaptive Agents and Multi-Agent Systems III. Adaptation and Multi-Agent Learning. Springer., p. 1–14
- [3] Boillot, F., Midenet, S., Pierrelée, J.-C., 2006. The real-time urban traffic control system CRONOS, algorithm and experiments. Transportation Research, Part C, 14 (1).
- [4] Boje, B.F., Nookala, M., 1996. Signal Priority for TCSes: an Operational Test at Louisiana Avenue, Minneapolis. Compendium of Technical Papers for the 66th ITE annual meeting, Washington DC, États-Unis, 309-313.
- [5] Braban, C., Boillot, F. 2003. Les systèmes temps réel de commande de feux en milieu urbain. Synthèse INRETS, 44.
- [6] Camponogara E. et W. Kraus JR. 2003. « Distributed learning agents in urban traffic control ». In: Progress in Artificial Intelligence. Springer. p. 324–335.
- [7] CERTU, 2001. La priorité aux feux pour les véhicules de transport en commun, In : Aménagement et Exploitation de la voirie. Rapport CERTU, 108.
- [8] Chen, W., Jarjees, G., Drane, C.R. 1998. New approach for bus priority at signalized intersections. Proceedings of the Conference of the Australian Road Research Board, 391-399.
- [9] Clarke D.W., C. Mohtadit, and P.S. Tuffs. 1987. Generalized predictive control part i. the basic algorithm. Automatica, Vol. 23, pages 137_148.
- [10] Clarke D.W., C. Mohtadit, and P.S. Tuff_s. 1987.Generalized predictive control part ii. Extensions and interpretations. Automatica, Vol. 23, pages 149_160,
- [11] Coogan, M. 2002, Models of Mobility, The outcomes supported by the data we collect, a white paper for the TRB workshop. Workshop on the national transportation information infrastructure, 13 à 17 janvier, Washington DC, États-Unis.
- [12] De Campos G.R., P. Falcone et J. Sjöberg. 2013. « Autonomous cooperative driving: a velocity based negotiation approach for intersections crossing ». In : 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems.
- [13] Diakaki, C., Papageorgiou, M., Aboudolas, K., 2002. A multivariable regulator approach to traffic-responsive network-wide signal control. Control Engineering Practice, 10, 183-195.
- [14] Diakaki C., Dinopoulou, V., Aboudolas, K., Papageorgiou, M., Ben-Shabat, E., Seider, E., Leibov, A., 2003. Extensions and new applications of the traffic signal control strategy TUC. Transportation Research Record, 1856.
- [15] Dion, F., Hellinga, B., 2001. A methodology for obtaining signal coordination within a distributed real-time signal control system with transit priority. Quatre-vingtième meeting annuel du TRB, Washington DC, Etats-Unis.
- [16] Dion, F., Rakha, H., Zhang, Y. 2004. Evaluation of potential transit signal priority benefits along a fixed-time signalized arterial. Journal of Transportation Engineering, 130 (3), 294-303.
- [17] Doniec , A. R. Mandiau, S. Piechowiak et S. Espié .2008. « Anticipation based on constraint processing in a multi-agent context ». In : Autonomous Agents and Multi-Agent Systems 17.2, p. 339–361.
- [18] Dresner K. et P.Stone (2008)«A multiagent approach to autonomous intersection management». In : Journal of artificial intelligence research 31, p. 591–656.
- [19] Dresner K. et P.Stone (2007) « Sharing the Road : Autonomous Vehicles Meet Human Drivers. » In : IJCAI. T. 7, p. 1263–1268.
- [20] France J. et A.Ghorbani. 2003. « A multiagent system for optimizing urban traffic ». In : Intelligent Agent Technology. IAT 2003. IEEE/WIC International Conference on. IEEE. 2003, p. 411–414.
- [21] Franco, G., 2000. TITOS: an open platform and test bed for its. Seventh World Congress on ITS, Turin, Italie.
- [22] Froloff, E., Rizzi, M., Saporito, A., 1989. Bases et pratiques de la régulation. Rapport RATP, Direction du réseau routier.
- [23] GART/CERTU, 2000. Suivi national des plans de déplacements urbains, Le point au 30 juin 2000. Rapport d'étude Transport et Mobilité.
- [24] Gartner, N.H, 1982. Development and Testing of a Demand Responsive Strategy for Traffic Signal Control. American Control Conference.
- [25] Goodwin, G.C., Seron, M.M., and Dona, J.A. (2005). Constrained Control and Estimation: an optimization approach. Springer, Berlin. No. of pages: 411. ISBN: 1852335483

- [26] Hafner, M.R., D CUNNINGHAM, L CAMINITI et D DEL VECCHIO. « Automated vehicle to-vehicle collision avoidance at intersections ». In : Proceedings of World Congress on Intelligent Transport Systems. 2011.
- [27] Hausknecht, M., T.C.Au et P. Stone. 2011 « Autonomous intersection management : Multi-intersection optimization ». In : Intelligent Robots and Systems (IROS), IEEE/RSJ International Conference on. IEEE., p. 4581–4586.
- [28] D. Helbing, A. Hennecke, V. Shvetsov, and M. Treiber. Micro- and macro- simulation of freeway traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 25:517–547, 2002.
- [29] Henry, J.-J., Farges, J.-L., Tuffal, J., 1983. The PRODYN Real Time Traffic Algorithm. Fourth IFAC/IFIP/IFORS conference on Control in Transportation Systems, Baden Baden, Allemagne, 307-312.
- [30] Hunt, P.B., D.L. Roberston, R.D. Bretherton, and M.C. Royle. The scoot on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering & Control*, 23:190–199, 1982.
- [31] ITS-France, 2002. Systèmes et services de transport intelligents, les ITS dans notre vie quotidienne. Rapport ERTICO & Navigation Technologies, Traduction ITS France.
- [32] Joyce, P., Yagar, S. 1990. Representing stochastic transit dwell times in traffic signal optimization. *TRA*, 24 A(2), 87-98.
- [33] Kellermann, A., Schmid, A., 2000. MOBINET: Intermodal traffic management in Munich control centre development. Seventh World Congress on ITS, Turin, Italie.
- [34] Clerc M. and J. Kennedy. 2002. The particle swarm-explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, pages 58_73.
- [35] Kirschfink, H., Boero, M., 1999. Case studies of systems: the ENTERPRICE model. ERUDIT Workshop, Delft, Pays-Bas.
- [36] Kosonen I. (2003). « Multi-agent fuzzy signal control based on real-time simulation ». In : Transportation Research Part C : Emerging Technologies 11.5, p. 389–403
- [37] Kronborg, P., Davidsson, F., 2000. Improvements for Scandinavian SPOT urban traffic signal control system. Rapport Transport Research Institute, Stockholm, Suède.
- [38] Lee. J. et B. Park. (2012). « Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment ». In: Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on 13.1, p. 81–90.
- [39] Marsa-Maestre I. ; E. De la Hoz, C.M Jonker. et M. Klein. 2015. « Using graph properties to enable better negotiations in complex self-interested networks ». In : The Eighth International Workshop on Agent-based Complex Automated Negotiations (ACAN2015)
- [40] Morales, J., M. Lopez-Sanchez et M. Esteva. 2011. « Using experience to generate new regulations ». In : IJCAI. Citeseer. 2011, p. 307–312.
- [41] Richalet, J. A. Rault, J.L. Testud, and J. Papon. Model predictive heuristic control : Applications to industrial processes. *Automatica*, pages 413_428, 1978.
- [42] Riegelhuth, G., Stern, G., Behrendt, F., 1997. The ENTERPRICE project: a step towards information and mobility management. Fourth World congress on intelligent transport systems, 21 à 24 octobre, Berlin, Allemagne.
- [43] Roberston, D., Vincent, R. 1975. Bus priority in a network of fixed-time signals, Rapport TRRL, 666, Grande-Bretagne.
- [44] Poli, R., Kennedy, J. & Blackwell, T. Swarm Intell (2007) Particle swarm optimization. 1: 33. <https://doi.org/10.1007/s11721-007-0002-0>
- [45] Scemama, G., Carles, O. 2004. CLAIRE-SITI, public and road transport network management control, a unified approach. Congrès IEE, Londres, Grande-Bretagne.
- [46] Scemama, G., Tendjaoui, M. 2003. CLAIRE-SITI, système pour la supervision intelligente, intermodale et intégrée des réseaux de transport de surface. Congrès ATEC, Paris.
- [47] Schepperle H., et K. Böhm. 2007. « Agent-based traffic control using auctions ». Cooperative Information Agents XI. Springer, p. 119–133.
- [48] Schepperle H., K. Böhm et S. Forster. 2009. « Traffic management based on negotiations between vehicles—a feasibility demonstration using agents ». In: Agent-Mediated Electronic Commerce and Trading Agent Design and Analysis. Springer. p.90-104.
- [49] STIF : Guide technique des systèmes de priorité bus aux carrefours à feux. Paris, France, Rapport 2001.

- [50] Yan, F.; J. Wu, et D. Mahjoub (2014) « A scheduling model and complexity proof for autonomous vehicle sequencing problem at isolated intersections ». *Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI)*, 2014 IEEE International Conference on. IEEE, p. 78–83.
- [51] Van Den Bergh F. 2002. An Analysis of Particle Swarm Optimizers. PhD thesis, Department of Computer Science, University of Pretoria.
- [52] Vassiri, M. et S. Ossowski. 2009 « A market-inspired approach to reservation based urban road traffic management ». In : *Proceedings of The 8th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems-Volume 1*. International Foundation for Autonomous Agents et Multiagent Systems., p. 617–624
- [53] Smith, H.R., Hemily, B., Ivanovic, M., Flemmeing, G., 2005. Transit Signal Priority: a planning and implementation Handbook. Rapport ITS America.
- [54] J. F. Gabard. *Consise encyclopedia of Traffic and Transportation systems*, chapter Car Following Models, pages 65–68. Pergamon Press, 1991.
- [55] D.C. Gazis and R.B. Potts. The oversaturated intersection. In *2nd International Symposium on Traffic Theory*, pages 221–237, London, UK, 1963.
- [56] P. Lotito, E. Mancinelli, and J.-P. Quadrat. A min-plus derivation of the fundamental car-traffic law. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(5):699–704, 2005.
- [57] P. A. Lotito. Issues on the implementation of the dsd algorithm for the traffic assignment problem. *EJOR, European Journal of Operational Research*, 175, 2006.
- [58] V. Mauro and C. Di Tranto. Utopia. In *Proceedings in the 6th IFAC/IFIP/IFORS symposium on control, computers, communications on Transportation*, pages 245– 252, Paris-France, 1989.
- [59] K. Nagel. *Cellular Automata Models for Transportation Applications*. Springer, 2002.
- [60] M. Papageorgiou. 1983. *Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control*. Springer
- [61] M. Patriksson. A survey on the continuous nonlinear resource allocation problem. *European Journal of Operational Research*, 185(1):1–46, February 2008.
- [62] P. Wu, A. Che and F. Chu, "Optimal lane reservation in urban bus transit network", Congrès Annuel de la Société Française de Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision (ROADEF), 26-27 Février 2015, Marseille, France.
- [63] Samia Smaïli, Dalil Ichalal, Feng Chu, Salim Mammam, Saïd Mammam. Model predictive control for an urban trimodal model
- [64] Wu, P. A. Che, F. Chu and Y. Fang, "Exact and heuristic algorithms for rapid and station arrival-time guaranteed bus transportation via lane reservation", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems (IEEE TITS)*, vol. 18, n° 8, pp. 2028-2043, 2017. (WoS)

16. Mes publications pour ce chapitre

- [LB. 1]. Bhouri N., F.J. Mayoranno, P.A Lotito, H. Haj-Salem; JP. Lebacque" Public Transport Priority for Multimodal Urban Traffic Control". *Cybernetics and Information Technologies. Journal of Cybernetics and Information Technologies (Scopus) Volume 15, Issue 5, Pages 17–36, ISSN 1314-4081, DOI: 10.1515/cait-2015-0014, April 2015.*
- [LB. 2]. Flavien Balbo, Neila Bhouri and Suzanne Pinson. Bimodal traffic regulation system: A multi-agent approach. *Web Intelligence and Agent Systems: An International Journal (WIAS)*, 2016, 14 (2), pp. 139-151.
- [LB. 3]. Bhouri, N., F. Balbo, S. Pinson. An Agent-Based Computational Approach for Urban Traffic Regulation, *Progress in Artificial Intelligence* 1(2), pages 139-147, Springer-Verlag, 2012.
- [LB. 4]. Bhouri, N., Boillot, F, Vinant P, Régulation multimodale du trafic routier et des transports en commun de surface. Une classification des méthodes. *Revue RTS n° 98 Janvier-Mars 2008.*
- [LB. 5]. Bhouri, N., Touazi, D.. Commande prédictive à base de modèle pour le trafic urbain bi-modal. *Revue E-STA, Siences et Technologies de l'Automatique. Volume 6, 2009. Numéro Spécial CIFA 2008. ISSN: 1954-3522.*
- [LB. 6]. Bhouri, N. "Comparaison entre deux stratégies de contrôle d'accès appliquées au Boulevard Périphérique de Paris". *Revue Recherche - Transports - Sécurité n°28, décembre 1990.*
- [LB. 7]. Bhouri, N., H. Haj-Salem, M. Papageorgiou et J.M. Blosseville "Estimation of traffic density on motorways". *Traffic Engineering + Control*, pp. 579-583, novembre 1988.
- [LB. 8]. Bhouri, N., section « 5.5. Les systèmes de priorité aux feux pour les tramways » du "Chapitre 5. Interfaces voie-véhicule, sites propres et exploitation" "Innovations dans les transports guidés

- urbains et régionaux (Traité Systèmes Automatisés - IC2)", ISBN 978-2-7462-2974-7, Hermès-Lavoisier, octobre 2010: p.238-244.
- [LB. 9]. Atmani, D., N. Bhouiri, F. Galatioto, P. Franco, J.P. Lebacque, H. Haj Salem, M. Bell « Towards autonomic transport systems in a multi-modal environment ». ITS2015, 5 - 9 Octobre 2015 Bordeaux, France.
- [LB. 10]. Atmani, D. J.-P. Lebacque, N. Bhouiri, H. Haj-Salem. « Multi agent dynamic traffic assignment on guided vehicles", 1st International conference on Transportation and Logistics (ICTL 2015), May 13-14, 2015 Sousse, Tunisia;
- [LB. 11]. Atmani, D., F. Galatioto, P., N. Bhouiri, Franco, J.P. Lebacque, H. Haj Salem, M. Bell "Towards the introduction of an autonomous transportation line in a multimodal transportation system". ARTS ECR.27-28 Mai 2015. La Valetta, Malta.
- [LB. 12]. Campisi, T., N. Bhouiri, G. Tesoriere. Environmental Aspect on Road Network: A Mesoscopic Approach to Define CO2 and NOX Concentration. ARTS ECR Conference. 27th-28th May 2015 La Valletta, Malta.
- [LB. 13]. Gaciarz, M., S. Aknine, N. Bhouiri: Constraint-based negotiation model for traffic regulation. 2015 International Conference on Intelligent Agent Technology (IAT 2015), 6-9 December 2015.
- [LB. 14]. Gaciarz, M., N. Bhouiri, S. Aknine: Continuous Negotiation for a Vehicle-Regulated Intersection. Autonomic Road Transport Support Systems Early Career Researcher Conference (ARTS ECR 2015), 27-28 May 2015. (Price of best paper)
- [LB. 15]. Gaciarz, M., S. Aknine, N. Bhouiri: Automated Negotiation for Traffic Regulation. International Workshop on Collaborative Agents Research & Development (CARE 2015), 4 May 2015.
- [LB. 16]. Gaciarz, M., S. Aknine, N. Bhouiri: A continuous Negotiation based model for traffic regulation at an intersection. Proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS2015), 4-8 May 2015.
- [LB. 17]. Gaciarz, M., S. Aknine, N. Bhouiri: A coalition-based approach for cooperative urban traffic regulation. European Workshop on Multi-Agent Systems (EUMAS 2013), 12-13 December 2013.
- [LB. 18]. Atmani, D., J.P. Lebacque, N. Bhouiri, H. Haj Salem, "A simulation-based model for dynamic traffic assignment on guided vehicles" 12th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2014). 22-28 September 2014, Rhodes, Greece.
- [LB. 19]. Atmani D., Lebacque J.P, Bhouiri N., Haj-Salem H. ; "Dynamic assignment with user information in multimodal networks » ; EWGT2014, 2-4 July 2014, Seville, Spain.
- [LB. 20]. Tlig, M. and Bhouiri, N., "A Multi-Agent System to Urban Traffic and Buses Regularity Control. Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 20, 2011, Pages 896-905. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042811014789>. 14th Meeting of the EURO Working Group on Transportation (EWGT). Septembre 2011.
- [LB. 21]. Bhouiri, N., Balbo, F., S. Pinson et M. Tlig. Collaborative agents for modelling traffic regulation systems, In Proceedings Intelligent Agent Technology (IAT 2011), pages 7-13, 2011. 22-27th August.
- [LB. 22]. Bhouiri, N. F. Balbo, S. Pinson. Towards Urban Traffic Regulation Using a Multi-Agent System, In Proceedings 9th International Conference on Practical Applications of Agents and Multi-Agent Systems (PAAMS'11), pp. 179-188, 2011. 28-30th March.
- [LB. 23]. Bhouiri, N., Balbo, F. et S. Pinson 2010. A Multi-Agent System to Regulate Bimodal Urban Traffic. 8th European Workshop on Multi-Agent Systems. EUMAS, Paris, France, 16-17 December 2010.
- [LB. 24]. Bhouiri, N., S. Haciane and F. Balbo, 2010. A Multi-Agent System to Regulate Urban Traffic: Private Vehicles and Public Transport. 13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. ITSC 2010, Madeira Island, Portugal. pp 1575-1581.
- [LB. 25]. Bhouiri, N. et S. Haciane, 2010. Régulation du trafic urbain avec priorité aux transports en commun à l'aide d'un système multi-agents. MOSIM'10 - 10 au 12 mai 2010 - Hammamet – Tunisie.
- [LB. 26]. Haj Salem H., Mammar S. , Bhouiri N., « Isolated VS coordinated ramp metering strategies: Field evaluation results in France", EWGT2009, 23 – 26 Sept, 2009, Padua, Italy.
- [LB. 27]. Bhouiri, N., H. Haj-Salem, "Motorway Ramp Metering as a tool for improving the travel time reliability", 13th European Working Group in Transportation Conference (EWGT), Padua, Italy, 23-25 september 2009

- [LB. 28]. Kachroudi S., Bhouiri, N., "A multimodal traffic responsive strategy using particle swarm optimization", 12th IFAC Symposium on Control of Transportation Systems. California, September 2-4, 2009. Pp 531-537.
- [LB. 29]. Bhouiri, N., "Constrained optimal control strategy for multimodal urban traffic network", IFAC Workshop on Control Applications of Optimization (CAO'09), 6-8 May, 2009 Jyväskylä, Finland. 7 pages... \Publis\IFAC_08 bhouiri Finland.pdf
- [LB. 30]. Kachroudi S., Bhouiri N., "A multimodal modal for an urban traffic control policy". 17th IFAC World Congress Seoul - Corée, 6-11 juil 2008. pp 13070-13078
- [LB. 31]. Kachroudi S., Bhouiri N., Mammam S., Scamama G. « Modèle de prédiction semi-macroscopique pour les véhicules de transport en commun en milieu urbain CIFA : Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Bucarest-Roumanie 3-5 septembre 2008
- [LB. 32]. Bhouiri N., Touazi D., «Commande prédictive à base de modèle pour le trafic urbain bi-modal. CIFA : Conférence Internationale Francophone d'Automatique. Bucarest-Roumanie 3-5 septembre 2008.
- [LB. 33]. Kachroudi S., Bhouiri N., « Communication interprocessus entre Dynasim et Scilab pour l'évaluation d'une stratégie de régulation du trafic urbain », Congrès International ATEC-ITS France, Issy-les-Moulineaux (France), Janvier 2007.
- [LB. 34]. Farhi N., Bhouiri N., Lotito P., « Regulation of the bimodal traffic », 11th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems. Delft - The Netherlands. August 29-31, 2006.. \Publis\IFAC-06_Farhi_Bhouiri_Lotito.pdf
- [LB. 35]. Bhouiri N., Lotito P., «Régulation du trafic urbain multimodal avec priorité pour les transports en commun», 6ème Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation - MOSIM'06. Rabat – Maroc. 3-5 avril 2006.
- [LB. 36]. Bhouiri, N., Lotito P., 2005. "An intermodal traffic control strategy for private vehicle and public transport". 10th Euro Working Group on Transportation, Poznan, Poland, pp423-428
- [LB. 37]. N. Bhouiri et G. Scémama, "Intermodalité : bilan et perspective des systèmes informatiques d'information", Congrès de l'ATEC, 23-24 janvier 2002
- [LB. 38]. G. Scémama et N. Bhouiri, "l'opportunité d'information mutuelle VP et TC : Synopsis du projet SITPBhouiri, N., 2002. Intermodalité : bilan et perspectives des systèmes informatiques. Rapport de convention INRETS/DTT.
- [LB. 39]. Bhouiri, N., Lotito, P., 2005. An intermodal traffic control strategy for private vehicle and public transport. Tenth Euro Working Group on Transportation, Poznan, Pologne.
- [LB. 40]. Bhouiri, N., Lotito, P. 2006. Régulation du trafic urbain multimodal avec priorité pour les transports en commun, Modélisation, optimisation et simulation des systèmes : défis et opportunités. MOSIM'06, Rabat, Maroc. Bhouiri and P. Lotito. (2 0 0 5) An intermodal traffic control strategy for private vehicle and public transport. In *10th Euro Working Group on Transportation*, Poznan-Poland, September..
- [LB. 41]. Kachroudi, S., Bhouiri, N., 2007. Communication interprocessus entre DYNASIM et SCILAB pour l'évaluation d'une stratégie de régulation du trafic urbain. Congrès de l'ATEC, Paris.
- [LB. 42]. N. Bhouiri, Balbo, F., Pinson, S., Tlig, M., 2011. "Collaborative agents for modeling traffic regulation systems". IEEE / WIC / ACM International Conferences on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (WI-IAT). Lyon, France, 22 - 27 August.
- [LB. 43]. N. Bhouiri, Balbo, F., Pinson, S. (2012). An agent-based computational approach for urban traffic regulation. *Progress in Artificial Intelligence*, 1(2), 139-147

Thèses encadrées

- [LB. 44]. Matthis GACIARZ, « Régulation de trafic urbain multimodal : une modélisation multi-agents ». Université Claude Bernard Lyon 1, Spécialité : Informatique. Soutenue le 05/12/2016.
- [LB. 45]. Dihya ATMANI, « Affectation dynamique dans les systèmes de transport multimodaux ». Université Paris Est, Spécialité : Signal, Image, Automatique. Soutenue le 18/12/2015.
- [LB. 46]. Sofiane Kachroudi, « Commande et Optimisation d'un système de régulation du trafic urbain multimodal : priorité pour les transports en commun de surface ». Université d'Evry Val d'Essonne. Soutenue le 11 Janvier 2010.
- [LB. 47]. Nadir Farhi, « Modélisation Minplus et Commande du Trafic de Villes Régulières ». Université Paris 1 - Panthéon – Sorbonne. Soutenue le 03 juin 2008.

Chapitre D : Fiabilité et qualité de service

1. Préliminaires

« L'évolution des structures de l'emploi, le développement des offres de loisirs, la diversité et la dispersion géographique des activités ont entraîné une intensification du recours aux réseaux de transport et une plus grande dépendance à l'égard de leur fiabilité pour éviter que les retards ne se répercutent en cascade sur un calendrier d'activités chargé ». Telle était la constatation dégagée par le groupe de travail de l'OCDE et du Forum International des Transports (FIT) réuni pour discuter de la fiabilité, duquel j'ai fait partie. C'est d'ailleurs à l'occasion de ma participation à ce groupe comme experte des réseaux de transport de surface que j'ai commencé à m'intéresser à la thématique de la fiabilité des réseaux de transport. Du travail de ce groupe a résulté le rapport "Améliorer la fiabilité des réseaux de transport de surface" (2006-2010).

Il ressortait de ce rapport que la fiabilité était encore un phénomène peu connu. Alors même que les usagers sont attachés à la fiabilité, à laquelle ils accordent beaucoup d'importance, celle-ci ne faisait pas partie des performances évaluées au même titre que la sécurité routière ou la congestion. Beaucoup de travail restait à accomplir pour offrir aux décideurs un cadre de compréhension des questions de fiabilité et d'élaboration de politiques de gestion de la fiabilité.

La recherche sur la fiabilité est en plein essor aujourd'hui. Dans sa revue des recherches sur la fiabilité, (Taylor, 2013) s'est référé à 140 articles parmi lesquels 109 datent du 21^e siècle. La première conférence dédiée à la question a eu lieu en 2001⁴. J'ai alors décidé d'apporter une contribution à ces recherches, avec comme objectif de faire progresser la compréhension de la notion de fiabilité et des méthodes à suivre pour améliorer la fiabilité et l'intégrer dans l'évaluation des projets.

2. Problématiques de mes recherches

La fiabilité peut être étudiée de différents points de vue et de différentes manières. Elle peut être classée en deux catégories: fiabilité temporelle et fiabilité physique. La première est liée à la variabilité du temps de parcours, alors que la seconde est liée à celle du réseau. Je traiterai dans ce chapitre la fiabilité du temps de parcours. D'autres recherches que j'ai entamées dernièrement, celles sur la fiabilité physique et la résilience, trouvent place dans la partie perspective.

Mes intérêts sur cette thématique concernent la connaissance et l'évaluation de la fiabilité du temps de parcours. Je me suis intéressée aux indicateurs de mesure de la fiabilité et aux évaluations a priori et a posteriori. Les connaissances que je tire des évaluations a posteriori permettent d'une part d'évaluer l'impact des systèmes, après installation sur le terrain, sur la fiabilité, d'autre part de construire des connaissances sur les distributions du temps de parcours, connaissances qui seront utiles pour préparer l'évaluation a priori de nouveaux systèmes.

Pour cela, j'ai fait des propositions méthodologiques et réalisé des applications numériques. Elles se déclinent selon les problématiques suivantes.

1. Évaluer a posteriori des systèmes conçus pour agir sur la congestion pour étudier leurs impacts sur la fiabilité du temps de parcours : fiabilité et congestion sont-ils deux faces d'un même problème ?
2. Analyser la pertinence des indicateurs recommandés pour l'évaluation de la fiabilité, en particulier a posteriori.

⁴1st International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR), Kyoto, 31/07-1/08; 2001

3. Développer une méthodologie permettant d'isoler les facteurs exogènes à la stratégie à évaluer sur la totalité de la distribution, dans les cas des évaluations par la méthode avant-après.
4. Développer de nouveaux indicateurs, notamment pour mesurer la qualité de service des transports en commun.
5. Modéliser la distribution du temps de parcours par niveau de service. Disposer d'une loi de probabilité pour modéliser le temps de parcours offre un moyen synthétique de calcul pour différents usages lors des évaluations a priori de l'impact d'une stratégie sur la fiabilité.
6. Enfin, j'ai posé la problématique des impacts des agrégations temporelle et spatiale et de l'auto-corrélation des données sur les résultats de la fiabilité.

Dans la suite de ce document, je commence par définir la notion de fiabilité du temps de parcours et présenter les méthodes classiques pour la calculer. Je décris par la suite mes activités dans ce domaine dans un ordre presque chronologique. En effet, disposant de données de gestion du trafic, telles que les résultats de l'implémentation du contrôle d'accès sur l'autoroute A6 ou de la gestion dynamique des voies du tronçon A4-A86, il m'a semblé naturel et utile d'**évaluer l'impact de ces stratégies sur la fiabilité** du temps de parcours. Ces évaluations ont soulevé d'autres questions, qui nécessitaient à mes yeux d'autres recherches et approfondissements. Je m'y suis attelée en développant trois axes de recherches. Le premier concerne **la méthodologie pour évaluer la fiabilité** des temps de parcours par la méthode ex-post en visant à isoler les facteurs exogènes à la stratégie étudiée. Le deuxième concerne **la connaissance de la distribution du temps de parcours**, sa modélisation par des lois de probabilité et **l'étude de l'impact des agrégations de données sur les évaluations de la fiabilité**. Le troisième axe concerne la **recherche de nouveaux indicateurs pour mesurer la fiabilité**. Je souligne ici l'originalité du nouvel indicateur de fiabilité fondé sur **l'indice de Gini et la courbe de Lorenz** permettant l'analyse de la régularité des lignes de transport en commun. Enfin, en perspective, je présente mes démarches dans les recherches que j'ai initiées sur la fiabilité physique et la résilience dans les réseaux de transport en commun.

3. Définition et mesure de la fiabilité du temps de parcours

La définition de la notion de fiabilité ne fait pas l'unanimité. Dans certaines études, un système fiable est un système qui remplit ses fonctions dans des conditions et pendant un laps de temps prédéterminés. J'ai adopté quant à moi la même définition que celle du rapport de l'OCDE dans laquelle la notion de fiabilité fait appel à la notion de prévisibilité.

Le rapport de l'OCDE/FIT définit la fiabilité comme la "*capacité du système de transport à offrir la qualité de service escomptée, en fonction de laquelle les usagers ont organisé leurs activités*".

Le réseau est donc fiable dans la mesure où les temps de parcours sont réguliers et, par conséquent, prévisibles, même s'il est sous performant en raison par exemple de vitesses régulièrement lentes, liées aux encombrements. Un réseau routier encombré sur lequel les vitesses ne varieraient pas au gré des heures de la journée et des jours de la semaine et seraient donc prévisibles pourrait être qualifié de « hautement fiable ».

Mesure de la fiabilité

De nombreux indicateurs pertinents ont été proposés pour mesurer la fiabilité du temps de parcours. Je présente ici les indicateurs les plus répandus que nous avons utilisés pour évaluer les stratégies de

gestion du trafic. Ces mesures (Tableau 2) peuvent être séparées en quatre catégories comme dans (Lomax, 2003):

1. Méthodes de la gamme statistique. Les mesures les plus utilisées dans cette gamme sont l'écart-type (STD) et le coefficient de variation (COV) qui montrent l'étendue de la variabilité du temps de parcours (2). Nous trouvons également dans cette gamme des métriques pour mesurer l'asymétrie λ^{skew} et la largeur λ^{var} de la distribution du temps de parcours dues à (Van Lint et al., 2005). Plus la répartition du temps de parcours est large et asymétrique, moins les temps de parcours sont fiables.

2. Méthodes de "temps de précaution". On trouve dans cette gamme plusieurs indicateurs fondés sur le calcul du temps supplémentaire nécessaire pour arriver ponctuellement à l'heure à sa destination. L'exigence est souvent d'une arrivée ponctuelle dans 95% des cas. Ce temps supplémentaire est soit à ajouter au temps de parcours fluide, l'indicateur est alors appelé « Temps de planification », soit au temps de parcours moyen (Temps de précaution ou temps tampon, *Buffer Time* en anglais). Ceux-ci peuvent être exprimés en pourcentage, on parle alors d'indice de planification (*Planning Time Index*) et d'indice de précaution (*Buffer Time Index*). Certains auteurs, tels que (Arezoumandi and Bham, 2011), proposent d'utiliser le temps de parcours médian à la place de la moyenne.

3. Mesures des voyages tardifs. Dans cette catégorie d'indicateur, on mesure les pires expériences des voyageurs. On y trouve également l'indicateur appelé « *Misery index* » qui mesure la distance entre la moyenne des 20% plus mauvais trajets par rapport à la moyenne des trajets.

4. Mesures probabilistes. Les indicateurs probabilistes (Pr) calculent la probabilité que les temps de déplacement se produisent dans un intervalle de temps spécifié. Ils sont paramétrés dans le sens où ils utilisent un temps de parcours seuil ou une fenêtre de temps prédéfinie pour différencier des temps de parcours fiables et non fiables. Des mesures probabilistes sont utiles pour présenter des objectifs politiques, tels que « au moins 95% de tous les temps des parcours ne doivent pas s'écarter de plus de 10 minutes du temps de parcours médian ».

Tableau 2: Les indicateurs de fiabilité du temps de parcours les plus courants

Moyenne (en secondes)	$M_{TT} = \sum_{i=1}^N TT_i / N$	(D.1)
Ecart-type (en secondes)	$STD_{TT} = \sqrt{\sum_{i=1}^N TT_i - M_{TT}^2 / N - 1}$	(D.2)
Coefficient de variation	$COV_{TT} = STD_{TT} / M_{TT}$	(D.3)
Temps de précaution ou tampon (<i>Buffer Time</i>) (en secondes)	$BT_{TT} = P_{TT}^{95\%} - M_{TT}$	(D.4)
Indice de précaution ou indice tampon (<i>Buffer Index</i> ou BITT)	$BI_{TT} = BT_{TT} / M_{TT}$	(D.5)
Temps de planification (<i>Planning Time</i> ou PT) (en secondes)	$PT_{TT} = P_{TT}^{95\%}$	(D.6)
Indice de planification (<i>Planning Time Index</i> ou PI)	$PI_{TT} = PT_{TT} / TT^{free-flow}$	(D.7)
Temps des voyages tardifs (<i>Misery Time</i> ou MT) (en secondes)	$MT_{TT} = M_{TT}^{80\%} - M_{TT}$	(D.8)
Indice des voyages tardifs (<i>Misery Index</i> ou MI ou "tardy trip" index)	$MI_{TT} = MT_{TT} / M_{TT}$	(D.9)
<i>Planning Time Index</i> (PITT)	$PI_{TT} = PT / TT_{free-flow}$	(D.10)

Indice probabiliste (<i>Probabilistic Indicator</i>) (souvent $\beta = 0.2$)	$Pr(TT_i \geq (1 + \beta) \cdot P_{TT}^{50\%})$	(D.11)
Indice d'asymétrie de la distribution (<i>Skewness</i>)	$\lambda^{skew} = \left(P_{TT}^{90\%} - P_{TT}^{50\%} \right) / \left(P_{TT}^{50\%} - P_{TT}^{10\%} \right)$	(D.12)
Largeur de la distribution (<i>Width</i>)	$\lambda^{var} = \left(P_{TT}^{90\%} - P_{TT}^{10\%} \right) / P_{TT}^{50\%}$	(D.13)

On trouve plusieurs autres indicateurs moins répandus : (Chen et al., 1999) ont défini la mesure de la fiabilité du temps de parcours comme l'inverse de l'écart-type de la distribution du temps de parcours, tandis que dans (Chen et al., 2007), le 90^{ème} percentile du temps de déplacement est préconisé. (Tu et al., 2012) ont proposé l'indicateur de temps de voyage (TTUR) qui traite de l'occurrence de panne due à la congestion. (Tilahun et al., 2010) ont proposé un indicateur de fiabilité basé sur le moment d'inertie mesuré à partir du temps de parcours. (Pu, 2011) a utilisé un indicateur de pourcentage qui prend en compte les véhicules qui ont un temps de parcours deux fois plus important que le temps de parcours fluide. (Wakabayashi & Matsumoto, 2012) ont proposé des indicateurs de variabilité acceptée (ATTV) et de variabilité désirée (DTTR). La variabilité acceptée correspond à la distribution du temps de parcours médian plus une constante C. Le DTTR est la symétrie parfaite de l'ATTV, etc.

4. Evaluations de stratégies de gestion de trafic

La congestion a deux conséquences : d'une part, elle augmente la moyenne du temps de parcours et, d'autre part, elle le rend plus variable et imprévisible. La fiabilité est liée à cette variabilité. Les systèmes conçus pour agir sur la congestion ont-ils de ce fait un impact comparable sur la fiabilité du temps de parcours ? Évalue-t-on la fiabilité de la même manière que l'on évalue la congestion ? Les indicateurs recommandés par les récentes études sont-ils pertinents ?

Disposant des données avant-après les implémentations du contrôle d'accès sur l'autoroute A6 et de la gestion dynamique des voies du tronçon A4-A86, il était opportun et utile d'évaluer l'impact de ces stratégies sur la fiabilité du temps de parcours. Ces évaluations avaient donc un objectif double. En premier lieu, de discuter la pertinence des indicateurs de mesure de la fiabilité sur lesquels on avait peu de recul, et qu'il était donc intéressant de confronter aux évaluations fondées sur des données réelles. En second lieu, d'évaluer le gain de fiabilité apportée par ces stratégies, non évalué jusque-là, alors même que, comme le montreront nos études, ce gain dépasse souvent largement le gain sur le temps de parcours moyen affiché lors des évaluations de la congestion.

4.1 Le contrôle d'accès autoroutier

Le contrôle d'accès a été implémenté sur 5 rampes d'accès d'une section de 20 kilomètres de l'autoroute A6W d'Ile-de-France (Figure 53). Deux stratégies ont été testées, le contrôle d'accès isolé ALINEA et la stratégie coordonnée CORDIN. Les données ont été collectées sur quatre mois et demi (septembre 2006 - janvier 2007). L'étude des impacts du contrôle d'accès sur la congestion a été menée au sein du projet européen EURAMP (Haj-Salem et al., 2009).

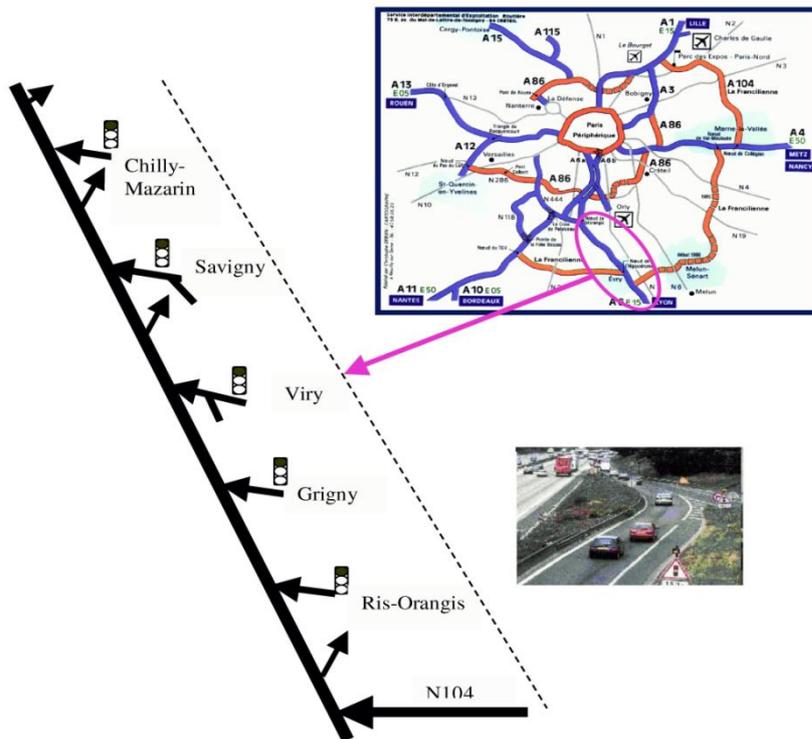


Figure 53 : A6W Test site

4.1.1 Fiabilité Vs Congestion

Le résultat le plus important qui ressort de cette recherche est la mise en lumière de la différence entre la congestion et la variabilité (ou la non fiabilité) du temps de parcours. En effet, comme nous pouvons le voir sur la Figure 54, le pic de la congestion et celui de la variabilité ne coïncident pas. La fiabilité, mesurée ici par l'indice de précaution atteint son pic : la congestion commence à se former vers 6 heures du matin, s'installe jusqu'à environ 9h et puis commence à diminuer lentement jusqu'après 10h. Le temps de précaution quant à lui, continue d'augmenter (bien que lentement) jusqu'à 10h. Ceci peut s'expliquer par le fait que pendant la pointe de la congestion, les déplacements sont constamment lents, alors que lorsque la congestion faiblit, les voyageurs sont confrontés à des vitesses plus variables affectant la répartition du temps de parcours.

Bien que l'explication semble évidente, cette mise en évidence du phénomène a des conséquences importantes sur le choix des intervalles d'analyse lors des évaluations. Des années de mesure de la congestion ont laissé comme habitude de distinguer entre période de pointe et période creuse. Avec ces résultats, il est évident qu'il faut accorder plus d'importance aux périodes transitoires pour l'évaluation de la fiabilité.

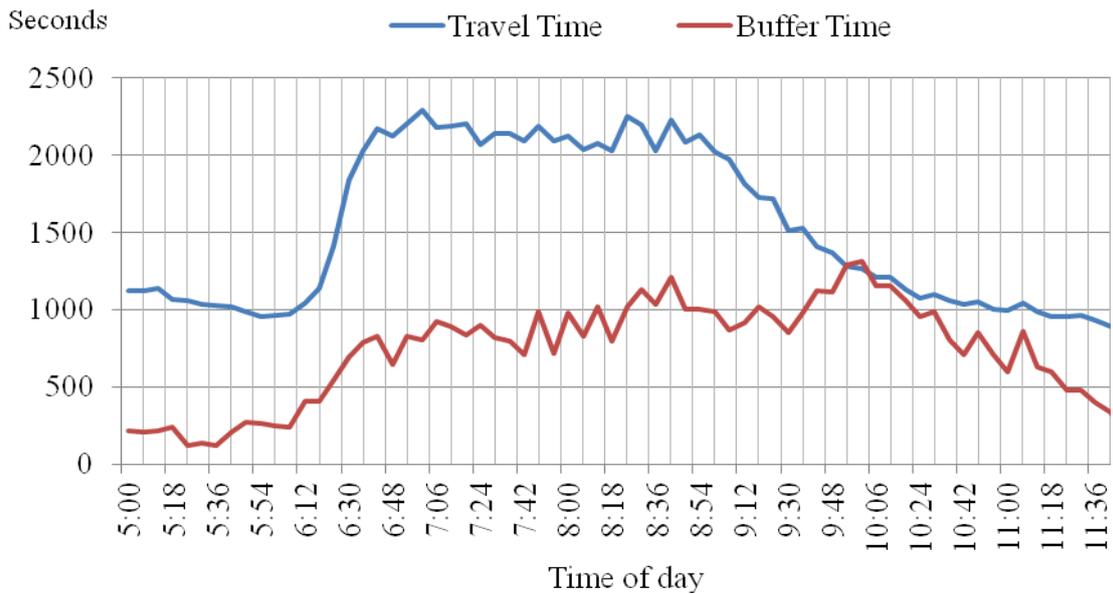


Figure 54 : Fiabilité et congestion

4.1.2 Analyse de la fiabilité

L'évaluation de la stratégie ALINEA a montré un gain important sur la réduction de la variabilité du temps de parcours [LB. 4]. Le gain est de 45% sur le temps de précaution et de 28% sur le temps de planification (voir Figure 55). Cette évaluation nous a également permis d'analyser les indicateurs de fiabilité donnés au Tableau 2. Il en ressort que la variation des résultats données avec des indicateurs donnant des pourcentages (BI, PI, λ^{skew} , λ^{var}) sont difficiles à communiquer aux décideurs et aux utilisateurs du réseau. Des mesures de ce type risquent de ne pas rapporter particulièrement bien la façon dont les voyageurs prennent leurs décisions. Un voyageur est plus habitué à prendre des décisions en fonction du temps (minutes) plutôt qu'en termes de pourcentages. C'est ainsi que les indicateurs donnant des temps, comme par exemple le temps de précaution (BT) ou de planification (PT), seront mieux compris par les utilisateurs.

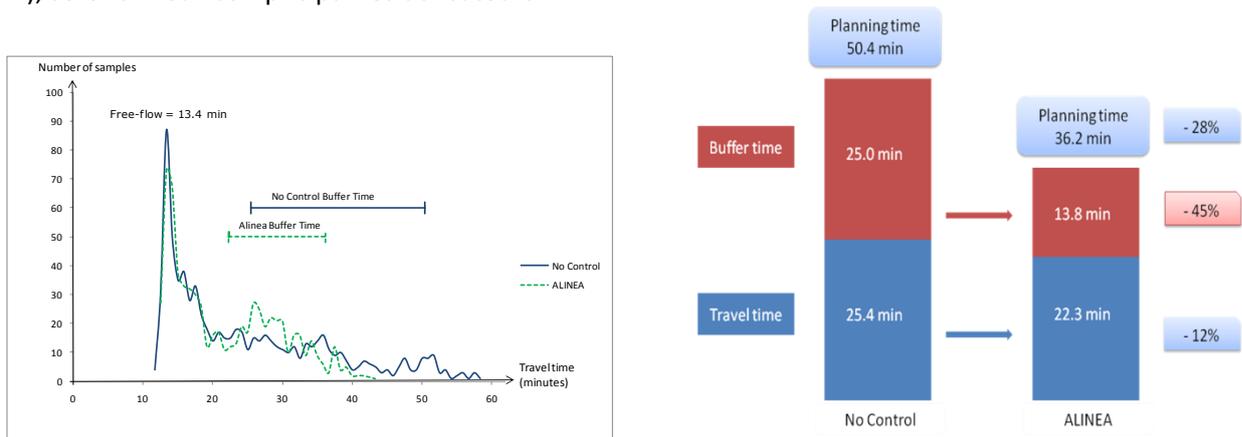


Figure 55: Value of reliability benefit is greater than travel time savings

4.1.3 Monétarisation de la fiabilité

Pour les décideurs, le défi est d'identifier les politiques qui offrent une amélioration de la fiabilité au plus bas coût. L'évaluation coûts-bénéfices offre un cadre cohérent pour évaluer les avantages monétisés des différents projets. Les évaluations coût-bénéfice de la fiabilité représentent un champ de recherche très important voir (Coulombel & De Palma, 2014), (Fosgereau & Karlstrom, 2010), (SETRA, 2012).

Pour donner une idée sur la part de la fiabilité dans le gain lié à l'installation du contrôle d'accès, nous avons fait une étude quantitative permettant une estimation globale sur la base d'un modèle très simple.

Nous avons utilisé le modèle "moyenne-variance" (Bates et al., 2001) et (SETRA, 2012). Traditionnellement, la valeur monétaire du bénéfice en économie de temps (TSB: *Time Savings Benefit*) découlant d'un projet peut être calculé de la façon suivante :

$$TSB = \Delta TT * VOT \quad (D.14)$$

Où le temps moyen économisé (ΔTT) est multiplié par la valeur du temps (VOT), généralement différente selon le groupe d'utilisateurs. La pratique pour incorporer la fiabilité dans l'analyse coût-bénéfice est de considérer que la valeur du temps économisé est composée de deux parties: 1- une pure amélioration du temps de parcours et 2- une amélioration de l'écart-type du temps de parcours (ΔSTD). L'équation (D.14) devient alors:

$$TSB = (\Delta TT * VOT) + (\Delta STD * RR * VOT) \quad (D.15)$$

où RR est le ratio de fiabilité (RR) défini comme le rapport entre la valeur d'une minute d'écart-type (c'est-à-dire la valeur de la fiabilité) et la valeur d'une minute de temps moyen de parcours. On trouve dans la littérature différentes valeurs de ce ratio (voir le rapport (SETRA, 2012) pour des exemples de valeur). Nous avons utilisé les valeurs venant d'un consensus d'experts internationaux réunis par le centre de recherche sur les transports du ministère néerlandais des Transports (Hamer et al., 2005):

$$\begin{cases} RR = 0,8 & \text{pour les voitures} \\ RR = 1,4 & \text{pour les transports publics} \end{cases} \quad (D.16)$$

L'équation (D.17) donne le bénéfice dû à l'application de la stratégie de contrôle d'accès ALINEA obtenu à partir de l'équation (D.15) où $RR=0,8$ telle que dans l'équation(D.16).

$$TSB = 3.1 * VOT + 3.3 * VOT \quad (D.17)$$

Des modèles plus complexes pourraient donner des résultats plus précis ; mais ce calcul, bien que simple, permet d'illustrer comment intégrer la fiabilité dans l'évaluation des projets peut modifier les résultats globaux des évaluations. Selon nos résultats, les avantages monétaires les plus importants lors de l'application de la stratégie de contrôle d'accès ALINEA à l'autoroute A6W ne proviennent pas de l'amélioration due à la réduction de la congestion: la valeur monétaire du temps de parcours pur est de 3,1 fois la valeur du temps alors qu'elle est de 3,3 fois celle-ci en termes d'amélioration de la fiabilité (voir Figure 56).

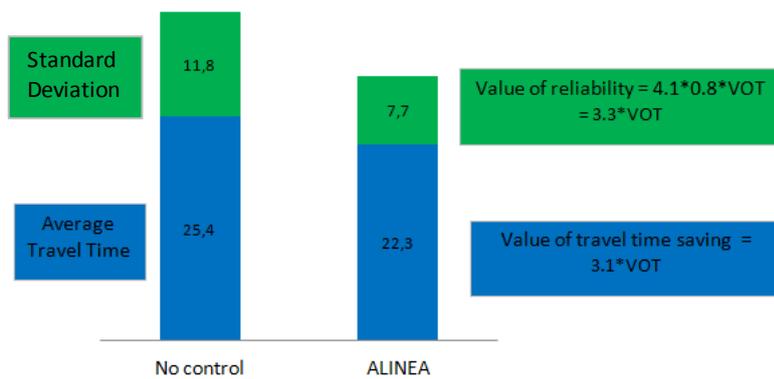


Figure 56: Valeurs monétaires des gains en fiabilité et en temps de parcours pur, dues à la stratégie ALINEA

4.1.4 Contrôle d'accès coordonné et gain sur le temps d'attente sur les accès

Les comparaisons des résultats d'évaluation de la fiabilité des temps de parcours des stratégies de contrôle d'accès, coordonné CORDIN et isolé ALINEA, n'ont pas montré de gains notables pour la coordination sur l'axe principal de l'autoroute (Figure 57). Cependant une amélioration de la fiabilité sur les rampes d'accès est à noter (Figure 58).



Figure 57 : Coordinated Vs local ramp metering strategies

Les cinq rampes contrôlées de l'autoroute A6W ne sont pas toutes équipées de capteurs de trafic bien placés pour donner le temps d'attente ou le temps de parcours sur chaque rampe. Nous avons donc estimé le temps de parcours sur les rampes à partir des valeurs du temps total passé (TTS) et de la distance totale parcourue (TTD). La vitesse est calculée $MS = \text{TTD_ramp} / \text{TTS_ramp}$. Connaissant la longueur de chaque rampe, les temps de parcours sont ainsi calculés facilement. Dans ce cas, l'analyse de la fiabilité est effectuée sur le temps de parcours de toutes les rampes.

La principale critique adressée à l'encontre du contrôle d'accès autoroutier est que l'amélioration du temps de parcours sur l'axe principal de l'autoroute se fait au détriment des temps d'attente sur les rampes. Cette critique n'est pas justifiée si l'on inclut la variabilité du temps de parcours, puisque comme le montre la Figure 58, les temps de précaution et de planification sont plus faibles quand les rampes sont contrôlées— En considérant que ces valeurs moyennées sur les cinq rampes sont valables pour chacune d'entre elle. Ces valeurs indiquent qu'un usager, qui veut s'assurer d'accéder à l'autoroute à temps et qui tient par conséquent compte de la variabilité du temps de parcours de la rampe, prévoira moins de temps quand la rampe est contrôlée. Ceci même sans considérer le gain de temps qu'il obtient sur l'axe principal. Nous remarquons également que la stratégie de coordination CORDIN améliore la fiabilité sur les rampes plus que la stratégie de contrôle isolé ALINEA.

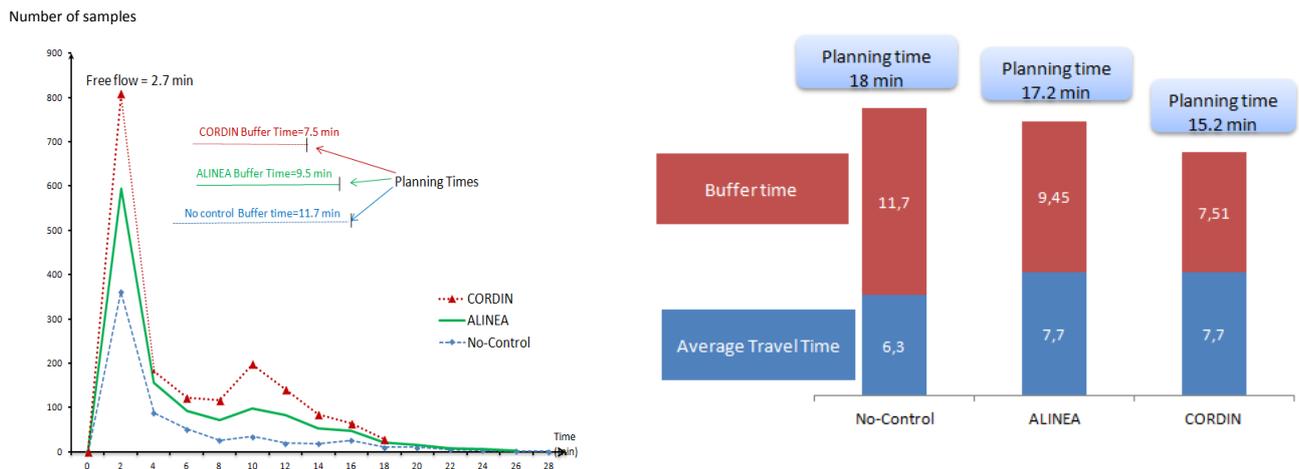


Figure 58 : Buffer times for the on-ramps

4.2 La gestion dynamique des voies (GDV)

Depuis plusieurs années se développe, tant en France qu'à l'étranger, le concept de Gestion Dynamique des Voies (GDV). Ce concept a pour objectif d'améliorer l'écoulement du trafic, et aussi de différer la mise en œuvre d'aménagements lourds tels que l'élargissement des infrastructures existantes, voire la réalisation de nouvelles infrastructures (Cohen et al., 2010).

Le tronçon commun A4/A86, long d'environ 2 200 mètres, était le siège des plus importantes congestions du réseau d'autoroutes urbaines d'Île-de-France. 280 000 véhicules empruntent cette portion d'autoroute. Il s'y formait chaque jour, matin et soir, un bouchon de 10 à 15 kilomètres créant ainsi le "plus grand bouchon d'Europe". En attendant une éventuelle opération lourde d'infrastructure permettant d'assurer la continuité d'A86 en créant de nouvelles voies de circulation, il a été décidé d'opérer une augmentation temporaire de la capacité grâce à la création d'une « voie auxiliaire » sur la bande d'arrêt d'urgence existante (BAU). Pour maintenir des conditions de sécurité satisfaisantes, cette « voie auxiliaire » ne devait être circulaire qu'en cas de fort trafic. Le tronçon commun vers Paris passe ainsi de 4 à 5 voies. La voie auxiliaire se poursuit sur la bretelle de liaison vers A86 intérieure qui passe alors de 2 à 3 voies. À l'heure de pointe du soir, c'est le tronçon commun vers la province qui bénéficie de cette mesure. La largeur de la BAU a été augmentée (à 3m) et la largeur des autres voies a été réduite de la norme de 3,5 m à 3,2 m.

Grâce à des capteurs réalisant de façon permanente des mesures sur la zone concernée, les conditions d'exploitation (passage de 4 à 5 voies) sont dynamiquement liées à l'état du trafic, et validées par l'opérateur après un contrôle visuel, à l'aide des caméras de surveillance. La fermeture physique de la

voie auxiliaire est réalisée par des glissières métalliques mobiles. Une signalisation verticale dynamique, constituée de la superposition de panneaux à messages variables (PMV) et de signaux d'affectation de voie (SAV), vient avertir les usagers de l'ouverture ou de la fermeture de la voie. Le nombre de flèches d'affectation figurant sur la signalisation de direction s'adapte à la géométrie.



Figure 59 : Site de la gestion dynamique de voie, section commune de l'autoroute A4-A86

Les statistiques sur la durée quotidienne de l'ouverture de la BAU au trafic les jours ouvrables en 2006 montrent une moyenne de 5 heures d'utilisation vers Paris et 4 heures d'utilisation vers la banlieue Est (c'est-à-dire vers la province). Le samedi, la BAU est ouverte en moyenne 4 heures vers Paris et 3 heures 45 minutes en sens inverse. Le dimanche elle est ouverte dans les deux directions pendant 3 heures 20 minutes.

4.2.1 Les données

Le site est équipé de capteurs de type boucle électromagnétique fournissant le débit, le taux d'occupation et la vitesse moyenne pour chaque voie. Pour l'évaluation de cette opération, en plus du trafic des 2,3 km de section commune, le trafic sur 0,7 km en aval dans chaque direction a été considéré. Les données ont été analysées pendant trois ans avant la mise en œuvre du dispositif (2000-2002) et un an après (2006). Nous avons étudié principalement les données de 2002 et 2006, et seulement sur la partie de l'autoroute en direction Est. À chaque période de six minutes de l'année 2006 où les données de trafic étaient disponibles, a été associée une période en 2002 (même mois, même jour de la semaine, même heure du jour et même période de 6 minutes dans l'heure). Si les données correspondantes en 2002 étaient manquantes, des données de 2001 voire 2000 ont été utilisées. Les données ont été écartées lorsque la vitesse moyenne enregistrée est extrême (supérieure à 150 km/h ou inférieure à 5 km/h). En nettoyant les 87 600 périodes de six minutes par année, 53 574 paires de données ont été conservées.

		Number of pairs of data
"Open"	Daylight (*)	7 377
	Night	868
Close	Daylight	24 864
	Night	20 465
Total		53 574

(*) from 7 AM to 8 PM

Table 1: Breakdown of matched periods in {2002, 2006} where correct data were available for the Eastbound direction

Comme on peut le voir sur la Table 1, le nombre de périodes de six minutes utilisées est suffisamment important pour permettre une certaine confiance dans l'analyse des résultats.

En 2002, étant donné que le dispositif d'ouverture de la BAU n'était pas encore installé, les périodes que nous considérons comme «ouvertes» correspondent de façon calendaire aux périodes de 2006 où la BAU a été effectivement ouverte à la circulation.

Cette concordance empêche un biais potentiel qui surviendrait si la répartition entre périodes ouvertes et fermées des données indisponibles en 2006 n'était pas la même que la répartition de 2002.

Dans notre analyse, nous appellerons "avant" les résultats issus des données de 2002 et "après" ceux issus des données récoltées en 2006.

4.2.2 Évaluation de l'impact de la stratégie de gestion dynamique de voie sur la fiabilité

Les impacts de l'ouverture de la BAU sont identifiés par une étude observationnelle avant/après sur les 3 kilomètres de section. Par ailleurs, en 2003, Jacques Chirac, alors président de la République, a lancé une campagne importante pour la sécurité routière qui a impliqué la réduction des vitesses limites et un contrôle accentué des excès de vitesse sur les points critiques du réseau routier français. Sur le tronçon étudié, la vitesse limite est restée inchangée entre 2002 et 2006 ; cependant, le renforcement du contrôle automatique des excès de vitesse a impliqué une réduction de la vitesse d'écoulement libre. La vitesse libre observée était de 104 km/h en 2002 alors qu'elle n'était que de 94 km/h en 2006 (Cohen et al., 2010).

Pour tenir compte de ces variations de la vitesse, nous avons effectué en premier une analyse de l'impact de l'ouverture de la BAU à la circulation en fonction du volume du trafic, mais également en fonction de l'impact du contrôle automatique de la vitesse.

Vu que le contrôle automatique des vitesses n'affecte que les vitesses élevées, nous avons supposé dans un premier temps, qu'il n'a d'impact qu'aux périodes creuses, justement quand l'ouverture automatique de la BAU n'est pas activée. Dans un deuxième temps, nous avons isolé ce facteur vitesse pour n'étudier que l'effet de la stratégie. Comme nous le verrons dans le paragraphe 5.3, cette hypothèse est justifiée: le contrôle sanction a peu d'influence quand le trafic est congestionné.

Les effets de l'ouverture de la BAU à la circulation aux heures de pointes peuvent être divisés en deux composantes:

- Un effet direct sur la réduction du temps de parcours et sur la réduction de sa variance,
- Un effet indirect sur la distribution quotidienne du trafic. En effet, en comparant les heures creuses et les heures de pointe avant et après la mise en service de la GDV, on a observé un déplacement d'une petite partie de la circulation des heures creuses (BAU fermée) aux heures de pointe (BAU ouverte). Le trafic quotidien a augmenté de 2% aux heures de pointe et a diminué de 5% aux heures creuses. Ce changement est très probablement lié à l'amélioration des conditions de la circulation lorsque la BAU a été ouverte. Ce changement implique une réduction du temps de parcours et de sa variance aux heures creuses. Sans cet effet indirect, la réduction du temps de parcours pendant les heures de pointe ainsi que son augmentation pendant les heures creuses auraient été plus importantes.

4.2.3 Discussion de l'adéquation des indicateurs à la lumière de l'évaluation de la GDV

L'évaluation de l'ouverture de la BAU par la méthode observationnelle avant/après nous a mené à discuter l'adaptabilité des indicateurs connus à ce type d'évaluation. Dans les articles ([LB. 2] [LB. 3] [LB. 12]), nous donnons des détails sur les différents indicateurs ; j'expose ici les résultats les plus marquants.

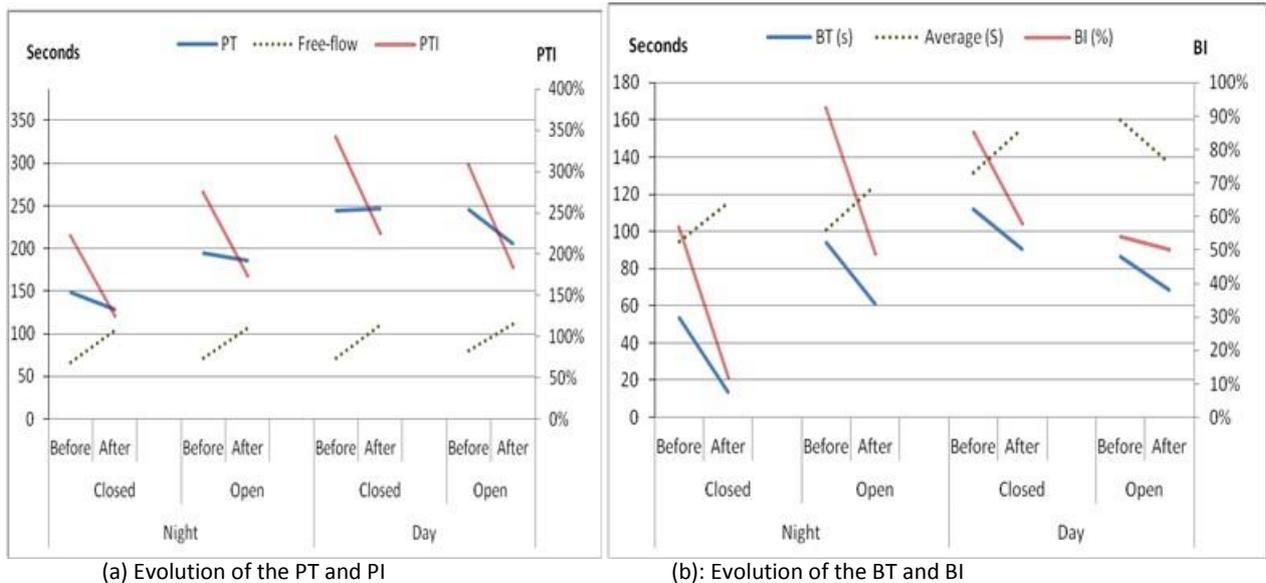


Figure 60 : Evolution of buffer times and buffer indexes

Nous avons analysé les résultats en distinguant le jour et la nuit et l'état ouvert ou fermé de la BAU.

Pour pouvoir analyser les indices de précaution, nous avons tracé en même temps les évolutions des moyennes de temps de parcours et le temps de parcours fluide. Comme nous pouvons le voir sur la a, le PI diminue exceptionnellement en 2006 pour les quatre situations (Jour-Ouverte, Jour-Fermée, Nuit-Ouverte, Nuit-Fermée). On remarque cependant que cette diminution n'est pas due à une plus faible variabilité, mais à une augmentation du temps de parcours fluide, puisque le PT ne suit pas la même évolution. La hausse du temps de parcours fluide est uniquement due au contrôle sanction de la vitesse et n'est pas influencée par les conditions de circulation (congestion ou fluide). Nous pouvons conclure que l'évolution du PI est trompeuse. Le PTI reste un bon indicateur de fiabilité, s'il est utilisé pour la même année. Il montre le ratio entre les conducteurs les plus « chanceux » (à débit fluide) et les utilisateurs qui veulent arriver à temps dans 95% des utilisations.

En comparant l'évolution du temps de précaution (BT) et de l'indice de précaution (BI) (Figure 8.b), on constate que les deux ont la même évolution entre 2002 et 2006. C'est parce que le temps de parcours moyen inclut les états congestionnés et évolue donc dans le même sens. L'indice de précaution ainsi que le temps tampon constituent donc de bons indicateurs de fiabilité pour ce cas d'évaluation.

L'évolution de l'indicateur des voyages tardifs (ou indice de misère, noté MI) est très proche de celle de l'indice tampon (BI) quand la BAU est fermée. Les comparaisons des périodes avant-après montrent une nette amélioration du MI (comparé au BI) lorsque la BAU est ouverte, en particulier pour la période de jour (la plus importante). Cela signifie que l'ouverture de la BAU améliore sensiblement la fiabilité du temps de parcours des voyageurs les plus « malchanceux ».

L'indicateur probabiliste donne un point de vue différent. Nous pouvons voir sur la Figure 61 11 que la probabilité que le TT observé ne s'écarte pas de plus de 20% que le TT médian. Il reste stable (en très légère en hausse) pour les périodes ouvertes pendant les journées et diminue pour les autres périodes. La légère hausse pour les périodes ouvertes pendant les journées est à l'inverse de la tendance de l'évolution des indices BI et MI. Elle provient d'une diminution de la médiane : donc la valeur (1,2 x médiane) correspond à un temps de parcours plus court, plus fréquemment dépassé. Les conducteurs « malheureux » ne sont pas moins nombreux en 2006 qu'en 2002 (20%, que ce soit dans la définition

du MI ou de l'indice probabiliste), mais ces 20% de conducteurs sont moins « malchanceux » en 2006 qu'en 2002 (MI passe de 54% à 41%).

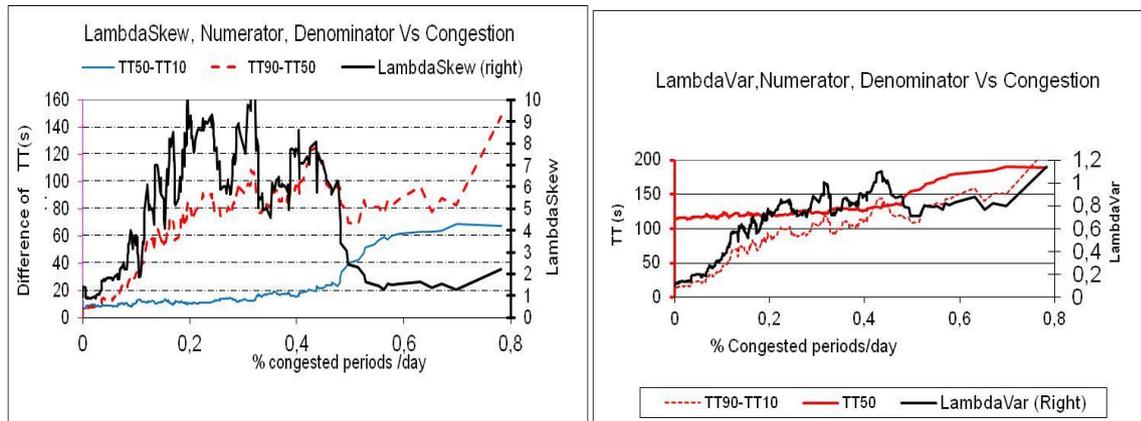


Figure 61: Evolution of the skewness indicators

Les indicateurs d'asymétrie, λ^{Var} et λ^{Skew} , ont été présentés comme des mesures robustes pour la largeur et le biais du temps de parcours. (Van Lint et al., 2008) ont soutenu que pendant la congestion, la non fiabilité du temps de parcours est principalement proportionnelle à λ^{Var} . Ceci n'est pas réfuté ici: la valeur $\lambda^{Var} = 0,77$ en 2002 peut être considérée comme grande, alors que la valeur $\lambda^{Var} = 0,54$ en 2006 l'est beaucoup moins, alors que la congestion a diminué de 2002 à 2006. Ils ont également soutenu que, dans les périodes transitoires (congestion et dissolution), le manque de fiabilité est principalement proportionnel à λ^{Skew} . Cependant, nous ne pouvons pas confirmer cette interprétation de λ^{Skew} ici, puisque nous avons calculé λ^{Skew} pour toutes les périodes où la BAU a été ouverte ; ce qui inclut évidemment des périodes congestionnées, des périodes non congestionnées et des périodes transitoires. Nous observons que, sur ce grand ensemble de périodes, l'interprétation de λ^{Skew} est diverse, puisque le numérateur λ^{Skew} et le dénominateur dépendent de l'emplacement du temps de parcours médian TT50 (voir Figure 61). Contrairement à 2006, la médiane en 2002 ne correspondait pas un état de trafic fluide (en 2002, TT50 = 155,9 secondes i.g., vitesse = 69,3 km/h, en 2006, TT50 = 124,9 secondes, i.g. vitesse = 86,5 km/h proche de la vitesse libre à 90km/h). En 2002, le niveau élevé du temps de parcours médian TT50 (dû à la congestion pour plus de la moitié des conducteurs) implique un dénominateur élevé de λ^{Skew} (TT50-TT10) = 67,7 sec, et un numérateur de λ^{Skew} plus modeste (TT90-TT50) = 52,4 sec, malgré une congestion. Les deux raisons conduisent à une valeur de λ^{Skew} qui n'est pas très élevée (0,77).

4.3 Conclusion

Dans cette section, j'ai d'abord présenté les évaluations de deux stratégies de régulation du trafic autoroutier, le contrôle d'accès et la gestion dynamique des voies. Pour la première, les stratégies de contrôle d'accès isolé ALINEA et coordonné CORDIN ont été appliquées à l'autoroute A6W de la région parisienne. Pour chacune de ces deux stratégies et pour le cas sans contrôle, les données ont été collectées sur une période de deux semaines entre la mi-septembre 2005 et la fin janvier 2007. Sur cette période, les conditions de la circulation sur l'autoroute n'avaient pas subi de changement notable. L'application des indicateurs classiques de mesures de la fiabilité ont montré l'impact positif du contrôle d'accès sur le trafic autoroutier. Les résultats montrent le même niveau de gain des stratégies de contrôle d'accès isolé ALINEA et coordonné CORDIN, comparées au cas sans contrôle sur l'axe principal de l'autoroute. Comparé à ALINEA la stratégie coordonnée CORDIN améliore de manière significative la fiabilité des temps de parcours sur les rampes d'accès. En plus de l'évaluation de ces stratégies, nous avons fait ressortir trois faits marquants. Premièrement, relativement à l'usage des

indicateurs, nous soulignons que la présentation et la communication des résultats en termes de temps de précaution ou de planification semblent intuitivement compréhensibles. Présenter le concept de temps de planification est très utile, à la fois pour l'utilisateur et pour le gestionnaire de réseau. C'est, après tout, le temps total consacré à l'ensemble du voyage qui compte. Deuxièmement, nous avons mis en évidence la différence entre l'évolution de la congestion et celle de la fiabilité. Enfin, nous avons montré que les avantages monétaires de l'application de la stratégie ALINEA étaient plus importants en ce qui concerne le gain en fiabilité que ceux du gain en temps de parcours moyen. Par conséquent, l'ignorance de l'impact de l'amélioration de la fiabilité du temps de parcours dans les études peut conduire à une sous-estimation des avantages découlant de la politique de gestion appliquée.

La deuxième stratégie évaluée est la gestion dynamique des voies, consistant en l'ouverture à la circulation de la bande d'arrêt d'urgence dans les périodes de congestion. Cette évaluation a mis en relief un phénomène que nous n'avions pas observé dans le premier cas et qui est dû à l'écart de temps entre les périodes de collecte des données. En effet, avant l'implémentation de la stratégie la collecte des données couvrait les années 2000-2002 alors que la stratégie était fonctionnelle en 2006. Entre ces deux périodes, une campagne a été menée pour la sécurité routière renforcée par l'implémentation sur l'autoroute de radars de contrôle-sanction. Leur effet s'est donc ajouté à celui de la stratégie à étudier. Ceci nous a permis de discuter la capacité des indicateurs classiques, à révéler avec précision l'amélioration de la fiabilité du temps de parcours. Les résultats montrent que la comparaison entre les indicateurs utilisant des mesures relatives (l'indice de planification (PI), le temps et indice de précautions (BT et BI)) ne sont pas adaptés à l'évaluation a posteriori dans une telle situation. Leurs variations sont souvent liées à l'augmentation du temps de parcours fluide ou moyen et non à une diminution du temps de planification. L'augmentation du temps de parcours libre est due à un plus grand respect de la limite de vitesse imposée par la campagne de contrôle-sanction. Nous avons également constaté que l'indice d'asymétrie de la distribution (λ^{Skew}) ne révèle pas l'amélioration de la fiabilité entre les conditions avant et après l'ouverture de la bande d'arrêt d'urgence à la circulation. En effet, la limite de la vitesse affecte le trafic uniquement pour les périodes non congestionnées et donc lorsque la voie supplémentaire n'est pas ouverte. Elle affecte cependant le dénominateur de l'indicateur λ^{Skew} qui dépend de ce trafic non congestionné. Ceci nous a amené à développer une méthode pour isoler les facteurs exogènes dans une évaluation de la fiabilité par la méthode avant-après.

5. Méthode pour isoler les facteurs exogènes dans une évaluation de la fiabilité par la méthode avant-après.

L'évaluation de la gestion dynamique des voies sur la section commune des autoroutes franciliennes A4 et A86 par la méthode avant-après nous a éclairés sur une problématique de l'usage de cette méthode pour l'évaluation de la fiabilité. En effet, lors des évaluations par la méthode avant-après, un problème surgit si des phénomènes étrangers à la stratégie étudiée ont eux aussi un impact pendant la période d'après. Pour ne pas confondre l'effet de la stratégie avec l'effet de ces éventuels phénomènes exogènes, il faut analyser ce qui se passe, en l'absence de cette stratégie, sur un site de référence, ayant les mêmes caractéristiques que le site considéré et soumis aux mêmes phénomènes exogènes. L'apparition de phénomènes exogènes n'est pas rare, vu que d'une part les concessionnaires d'autoroutes profitent généralement des travaux nécessaires pour implémenter la stratégie pour faire d'autres aménagements et que, d'autre part, les travaux pour implémenter la stratégie durent parfois assez longtemps pour qu'une modification de la réglementation intervienne dans l'intervalle (Carnis & Blais, 2013 et Hauer, 1997).

Certains facteurs exogènes peuvent être estimés par un modèle de trafic classique et donc pris en compte dans l'évaluation par observation avant-après comme par exemple les variations du volume de trafic, les conditions météorologiques, etc. (Kim & Mahmassani, 2014, 2015). D'autres facteurs,

comme par exemple le comportement des conducteurs, la performance des voitures, etc. sont difficiles à modéliser, d'où la nécessité du site de référence. Quand il n'est pas possible de trouver un site de référence de configuration suffisamment proche de celui où la stratégie est appliquée (nombre de voies, courbure de la route, volume de trafic, conditions météorologiques, ...), le site lui-même peut être utilisé pour quantifier l'effet des facteurs exogènes à condition qu'il existe des périodes où la stratégie n'est pas appliquée (Aron et al., 2013) et (Princeton & Cohen, 2011).

Pour les phénomènes liés à la sécurité routière ou à la congestion, l'évaluation de ces effets sur les valeurs moyennes est suffisante (Aron et al., 2013) et (Cohen et al., 2009). Mais la fiabilité concerne la totalité de la distribution du temps de parcours. Nous avons donc développé une méthodologie pour isoler les facteurs exogènes à une stratégie sur la totalité d'une distribution.

Étant donné que les facteurs exogènes à la stratégie étudiée n'affectent pas le temps de parcours de la même manière sur toute sa distribution (par exemple, une modification de la vitesse limite autorisée affectera le trafic à vide mais pas le trafic congestionné), l'impact des facteurs exogènes sera identifié par niveau de temps de parcours sur le site de référence. De cette façon, les facteurs exogènes sont pris en compte par niveau de temps de parcours; quelles que soient les différences des distributions du temps de parcours entre le site de référence et le site traité, ces différences n'affecteront pas l'analyse de la fiabilité avant-après.

5.1 Identification des facteurs exogènes et des effets de la stratégie

L'effet des facteurs exogènes est modélisé par une variable fonction du temps de parcours. Pour ceci, au lieu d'utiliser la correspondance calendaire entre les périodes avant et les périodes après, la correspondance est faite sur les distributions des temps de parcours. Les temps de parcours du site de référence sont triés indépendamment pour les périodes avant et après en ordre croissant ; quel que soit i , le $i^{\text{ème}}$ plus bas temps de parcours « avant » correspond au $i^{\text{ème}}$ temps de parcours « après », même si ces deux temps de parcours ne se produisent pas au même moment de la journée ou le même jour dans l'année. Les variations aléatoires (en raison de conditions météorologiques, d'un incident ou d'un événement de tout type) ne sont pas supprimées, mais redistribuées.

δ est obtenu, à partir du site de référence, par la différence entre la série après et la série avant triées.

$$RA_i = RB_i + \delta_i \quad i=1 \dots N \quad (D.18)$$

Où N est le nombre de périodes, supposé par simplicité être le même pour toutes les séries (sinon la série peut être normalisée) ; RA et RB sont les séries après (*After*) et avant (*Before*) du site de référence.

Dans une représentation graphique des distributions cumulatives des temps de parcours avant et après, δ_i (en secondes) serait la différence entre les $[100.(i/N)]^{\text{ème}}$ percentiles des distributions cumulatives avant et après; c'est exactement le décalage horizontal entre les deux courbes.

Une fonction des temps de parcours $\bar{\delta}(tt)$ est obtenue en lissant le δ . Pour tout temps de parcours observé « tt », il existe un certain nombre de périodes i telles que $TT_i = tt$; $\bar{\delta}(tt)$ est la moyenne du δ_i correspondant. Après, $\bar{\delta}(tt)$ est interpolée par continuité entre deux valeurs de temps de parcours consécutives observées, de manière différentiable.

Quand cette fonction est appliquée à la série « avant » du site traité, que nous notons TB , elle donne une série modifiée TB' :

$$TB'_i = TB_i + \bar{\delta}(TB_i); \quad i=1, \dots, N \quad (D.19)$$

Il est important de vérifier que la série modifiée reste triée (un conducteur ou une période plus rapide qu'un autre dans la période précédente reste plus rapide en incluant les facteurs exogènes):

$$TB'_{i+1} - TB'_i \geq 0. \quad (D.20)$$

L'inéquation (D.20) est valide quand la dérivée de $\bar{\delta}(tt)$ est supérieure à -1.

L'effet de stratégie, noté $\Delta_i^{\text{Strategy}}$, est égal à la différence entre la série après, notée TA, et la série précédemment modifiée du site traité (TB').

$$\Delta_i^{\text{Strategy}} = TA_i - TB'_i; \quad i=1, \dots, N \quad (D.21)$$

5.1.1 Application numérique

Nous avons appliqué cette méthodologie à l'évaluation de la gestion dynamique des voies sur la section commune des autoroutes franciliennes A4 et A86 par la méthode avant-après A4-A86 (Figure 59). Comme nous disposons de données des capteurs par voie et comme la vitesse sur l'autoroute diffère d'une voie à une autre, nous avons procédé à un traitement indépendant pour chaque voie et chaque section étudiée (pour chacun des capteurs).

La Figure 62 donne la série δ , calculée pour la section 1. Pour ces résultats:

- le temps de parcours a été divisé par la longueur de la section et par conséquent δ également, ce qui facilite son interprétation et sa transférabilité sur d'autres sites.
- les courbes sont tracées pour des temps de parcours inférieurs à 50 secondes/km, ce qui équivaut à des vitesses supérieures à 72 km/h.

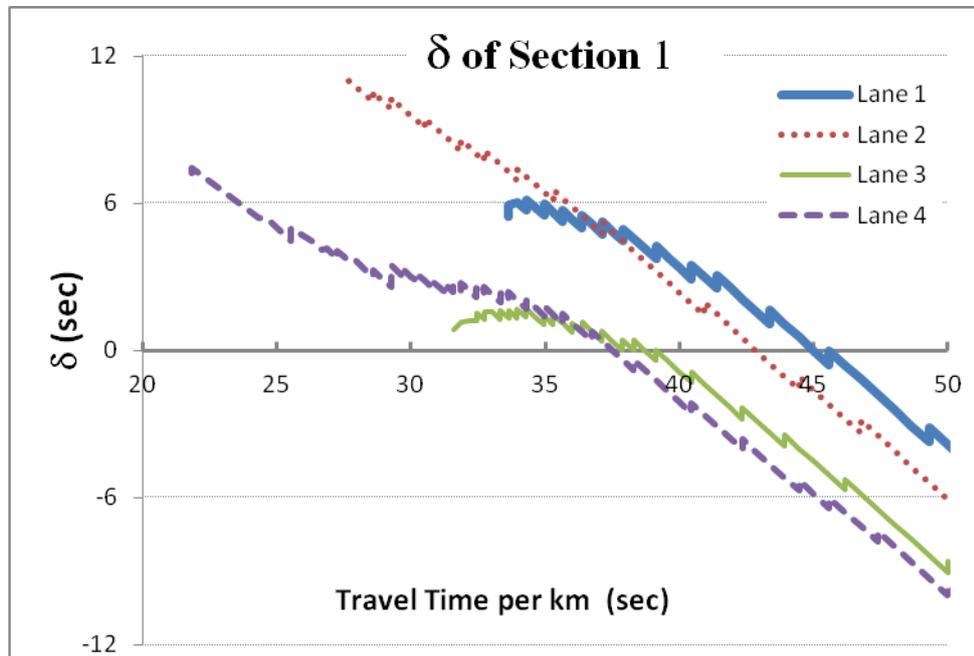


Figure 62: the δ values (divided by the length of section 1) for the four lanes of section 1

Comme le montre la Figure 62, la série δ est décroissante :

- Les valeurs positives de δ seront à attribuer à la campagne contrôle-sanction de la vitesse: pour des temps de parcours faibles (vitesses élevées), plus le temps de parcours est bas, plus le δ est élevé (pour respecter la limite de vitesse).

- Les valeurs négatives de δ peuvent être expliquées par la diminution du temps de parcours due à la diminution de la congestion qui est imputée ici à l'utilisation de la GDV et ne sont donc pas imputables à un effet des facteurs exogènes.

L'analyse des résultats obtenus (Figure 62) montre que, comme prévu, les temps de parcours minimums observés sont plus élevés dans la voie de droite, où il y a des camions et des mouvements d'insertion, et qu'ils sont plus bas sur la voie 4, la plus rapide. Des temps de parcours faibles sont également observés sur la voie 2, mais pas sur la voie 3; cela résulte de la fusion des deux autoroutes en amont, car la voie 3 est la continuation de la voie de droite de l'autoroute A4. Lorsqu'on ne prend en compte que les temps de parcours par kilomètre supérieurs à 33,6 s pour toutes les voies, on observe presque le même δ pour les voies 1 et 2 d'une part, et pour les voies 3 et 4 d'autre part avec des valeurs plus faibles pour ces derniers. Cela signifie que la campagne pour réduire la vitesse limite a permis de mieux respecter la limite de vitesse sur les voies 1 et 2 que sur les voies 3 et 4.

Nous ne reproduisons ici que les facteurs exogènes pour la première section, qui sont perceptibles, car la vitesse libre était élevée avant (104,5 km/h pour toute les voies) et a été réduite à 93,7 km/h après. Sur les autres sections, la vitesse libre était déjà plus faible, compte tenu des difficultés de conduite et des risques induits par la fusion des deux autoroutes, où de nombreux changements de voies sont nécessaires. Elle n'a donc pas été réduite après l'installation du dispositif de contrôle sanction, ce qui signifie que l'impact des facteurs exogènes est ici beaucoup plus faible.

5.2 Décomposition des indicateurs de fiabilité

Nous démontrons dans ce paragraphe que nombre d'indicateurs de fiabilité peuvent être décomposés en trois parties : une première exprimant l'indicateur pour la période avant, une deuxième exprimant l'impact des facteurs exogènes et enfin la partie de l'indicateur due à la stratégie étudiée.

Décomposition du temps de planification

Lorsque une série de N valeurs est triée (ici les temps de parcours empiriques), pour tout α ($0 \leq \alpha \leq 1$), le $(\alpha.N)^{\text{ème}}$ élément de la série correspond au $(100.\alpha)^{\text{ème}}$ quantile pour une série croissante et au $(100.(1-\alpha).N)^{\text{ème}}$ quantile pour une série décroissante. Dans notre cas, δ est décroissante et les séries RB, RA, TB, TB' et TA sont croissantes. Le $(100.\alpha)^{\text{ème}}$ quantile de la série finale TA est décomposé en trois composantes:

- le quantile correspondant de la série de la période avant (TB)
- le $100.(1-\alpha)^{\text{ème}}$ quantile de la série δ
- l'effet de la stratégie sur le quantile observé à la période i tel que $i = (\alpha.N)$

$$P_{TA}^{\alpha} = P_{TB}^{\alpha} + P_{\delta(TB)}^{1-\alpha} + \Delta_i^{\text{Strategy}} \quad (D.22)$$

Pour $\alpha = 95\%$, l'équation (D.22) exprime le temps de planification. Cette décomposition montre le temps de planification dû à la stratégie et celui dû aux facteurs exogènes dans l'indicateur global.

Décomposition des indices de précaution (BI) et de voyages tardifs (MI)

À la différence du temps de planification, ces indicateurs de fiabilité sont composés de rapports entre un numérateur et la durée moyenne de parcours.

Dans l'Indice de voyages tardifs (MI), la moyenne des temps de parcours supérieurs au 80^{ème} percentile est utilisée et, dans le temps de précaution, c'est la moyenne générale qui est utilisée: notons M^{α} ces moyennes ($\alpha=80\%$ pour le MI et à $\alpha=0$ pour le BI) :

$$M_{TB}^{\alpha} = \frac{1}{1 - \alpha \cdot N} \sum_{i=\alpha \cdot N+1}^N TB_i \quad (D.23)$$

En additionnant les lignes i de l'équation (D.19), où i est supérieur à $\alpha \cdot N$, puis en divisant par le nombre de lignes correspondant, et en utilisant l'équation (D.21), l'indicateur apparaît divisé en trois parties:

$$M_{TA}^{\alpha} = M_{TB}^{\alpha} + M_{\Delta}^{\alpha} Strategy = M_{TB}^{\alpha} + M_{\frac{\delta}{\delta(TB)}}^{\alpha} + M_{\Delta}^{\alpha} Strategy \quad (D.24)$$

α étant égal à 80% pour le MI et à 0 pour le BI. Pour $\alpha=0$, l'équation (D.25) s'écrit :

$$M_{TA} = M_{TB} + M_{\frac{\delta}{\delta(TB)}} + M_{\Delta} Strategy \quad (D.26)$$

Définissons les trois composantes relatives de cette moyenne :

$$S_{TB} = \frac{M_{TB}}{M_{TA}}; \quad S_{\frac{\delta}{\delta}} = \frac{M_{\frac{\delta}{\delta(TB)}}}{M_{TA}}; \quad S_{Strategy} = \frac{M_{\Delta} Strategy}{M_{TA}} \quad (D.27)$$

Comme la somme de S_{TB} , $S_{\frac{\delta}{\delta}}$ et $S_{Strategy}$ est égale à 1, et en utilisant l'équation (D.24), pour $\alpha = 80\%$, on écrit:

$$MI_{TA} = \frac{M_{TA}^{\alpha}}{M_{TA}} - 1 = \frac{M_{TB}^{\alpha}}{M_{TA}} + \frac{M_{\frac{\delta}{\delta(TB)}}^{\alpha}}{M_{TA}} + \frac{M_{\Delta}^{\alpha} Strategy}{M_{TA}} - 1 = \left(\frac{M_{TB}^{\alpha}}{M_{TB}} - 1 \right) S_{TB} + \left(\frac{M_{\frac{\delta}{\delta(TB)}}^{\alpha}}{M_{\frac{\delta}{\delta(TB)}}} - 1 \right) S_{\frac{\delta}{\delta}} + \left(\frac{M_{\Delta}^{\alpha} Strategy}{M_{\Delta} Strategy} - 1 \right) S_{Strategy} \quad (D.28)$$

Ainsi l'indice MI de la série TA est la moyenne pondérée par les parties S_{TB} , $S_{\frac{\delta}{\delta}}$, $S_{Strategy}$ des :

- MI de la série de la période avant implémentation de la stratégie,
- MI correspondants aux facteurs exogènes,
- et enfin d'une quantité qui peut être interprétée comme le MI de la stratégie, valable seulement lorsque cette série est monotone, ce qui est le cas ici.

Remarque. Dans le cas où est $M_{\Delta} Strategy$ négatif (ce qui indique un bon impact de la stratégie sur le temps de parcours moyen), l'équation (D.27) implique que le poids de $S_{Strategy}$ est négatif et que, plus la valeur de $\left(\frac{M_{\Delta}^{\alpha} Strategy}{M_{\Delta} Strategy} - 1 \right)$ est grande, plus le MI est faible.

La décomposition de l'indice tampon (BI) est très similaire. En utilisant les équations (D.19)-(D.21) avec $i = \alpha \cdot N$, pour $\alpha = 95\%$:

$$BI_{TA} = \frac{P_{TA}^{\alpha}}{M_{TA}} - 1 = BI_{TB} \cdot S_{TB} + \left(\frac{P_{\frac{\delta}{\delta}}^{\alpha}}{M_{\frac{\delta}{\delta}}} - 1 \right) \cdot S_{\frac{\delta}{\delta}} + \left(\frac{\Delta_i^{Strategy}}{M_{\Delta} Strategy} - 1 \right) \cdot S_{Strategy} \quad (D.29)$$

Lorsque l'impact de la stratégie est monotone, l'indice de BI dû à la stratégie est égal à $\frac{\Delta_i^{Strategy}}{M_{\Delta} Strategy} - 1$

5.2.1 Application numérique

La décomposition des indicateurs de fiabilité en trois parties, telle qu'elle est expliquée dans la section précédente, est donnée dans le Tableau 3. La pondération des facteurs exogènes étant très faible, les baisses des indicateurs BT et PT entre les périodes avant et après sont principalement dues à la stratégie GDV. La diminution du PT (-114,7 s) est plus importante en valeur absolue que la diminution

moyenne du temps de parcours (-87,5 s) ce qui est logique car, plus la congestion est importante, plus le gain de la stratégie est important.

Tableau 3: Breaking down the Planning Time, the Buffer Time, the Buffer and the Misery Indexes (open period) on the treated Site.

	Before (TB)	After (TA)	Exogenous Factors	Strategy
Weightings	1,638	1	0,001	-0,639 (*)
PT (seconds)	319,40	204,75	0	-114,66
BT (seconds)	95,31	67,96	-0,17	-27,18
BI	0,42	0,50	-1,	0,31
Average	224,09	136,79	0,177	-87,48
Average of the 20% most congested periods	316,26	192,07	0,018	-124,21
MI	0,41	0,40	-0,897	0,42

(*) The gain in travel time due to the strategy corresponds to a negative travel time

5.2.2 Analyse des évolutions des indices en se basant sur leurs décompositions

La comparaison des effets relatifs de la stratégie sur la moyenne et sur le 95^{ème} percentile (en valeur absolue) permet de comprendre l'évolution de l'indicateur BI. Si l'effet relatif de la stratégie sur la moyenne est plus grand (respectivement plus petit) que son effet relatif sur le 95^{ème} percentile, le BI augmentera (respectivement diminuera).

$$\frac{\left| \frac{M_{\Delta Strategy}}{M_{TB}} \right|}{\left| \frac{P_{\Delta Strategy}^{95\%}}{P_{TB}^{95\%}} \right|} \geq \frac{\left| \frac{P_{\Delta Strategy}^{95\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|}{\left| \frac{P_{TB}^{95\%}}{M_{TB}} \right|} \text{ i.e. } \frac{\left| \frac{P_{TB}^{95\%}}{M_{TB}} \right|}{\left| \frac{P_{\Delta Strategy}^{95\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|} \geq \frac{\left| \frac{P_{\Delta Strategy}^{95\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|}{\left| \frac{P_{TB}^{95\%}}{M_{TB}} \right|} \Rightarrow BI_{TB} + 1 \geq BI_{Strategy} + 1 \quad (D.30)$$

$$\Rightarrow BI_{TB} \geq BI_{Strategy}$$

Dans la cas de la GDV, cet effet est plus grand. En effet, nous avons:

$$0.391 = \frac{87.5}{224} > \frac{114}{319} = 0.36$$

En négligeant les facteurs exogènes et en respectant l'équation (D.29), le BI_{TA} s'écrit comme la moyenne pondérée de BI_{TB} et de BI_{Strategy}. Comme le montre le Tableau 3, le poids S_{TB} de BI_{TB} est de 1,638 et le poids de BI_{Strategy} est négatif (S_{strategy} = -0,639). Selon l'équation (D.29) et l'inéq (D.30), le BI_{TA} est nécessairement plus élevé que BI_{TB}. Même si l'impact de la stratégie (en secondes) sur le 95^{ème} percentile est supérieur à la moyenne, l'impact relatif de la stratégie est plus élevé en moyenne que sur le 95^{ème} percentile, ce qui implique une augmentation de l'indice de précaution (BI). Notre fractionnement de l'indice de précaution permet une meilleure compréhension et évite une sous-estimation de la stratégie.

En prenant $M_{\Delta Strategy}^{80\%}$ et $M_{TB}^{80\%}$ à la place des 95^{ème} percentiles $\left| \frac{P_{\Delta Strategy}^{95\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|$ et $\left| \frac{P_{TB}^{95\%}}{M_{TB}} \right|$ dans la partie droite de l'inéq.(D.30), on peut faire l'analyse pour la compréhension de l'indicateur MI.

$$\frac{\left| \frac{M_{TB}^{80\%}}{M_{TB}} \right|}{\left| \frac{M_{\Delta Strategy}^{80\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|} \text{ with } \frac{\left| \frac{M_{\Delta Strategy}^{80\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|}{\left| \frac{M_{\Delta Strategy}^{80\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|} \text{ or } \frac{\left| \frac{M_{TB}^{80\%}}{M_{TB}} \right|}{\left| \frac{M_{TB}^{80\%}}{M_{TB}} \right|} - 1 = MI_{TB} \text{ with } \frac{\left| \frac{M_{\Delta Strategy}^{80\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|}{\left| \frac{M_{\Delta Strategy}^{80\%}}{M_{\Delta Strategy}} \right|} - 1 = MI_{\Delta Strategy} \quad (D.31)$$

En négligeant l'effet des facteurs exogènes, l'indicateur de misère pour la période après MI_{TA} sera inférieur à celui d'avant dès que MI_{TB} est lui-même inférieur à $MI_{\Delta Strategy}$. Comme indiqué à la fin de la section 3, plus $MI_{\Delta Strategy}$ est grand, plus MI_{TA} est petit. Cependant, dès que $MI_{\Delta Strategy}$ devient positif (même s'il est beaucoup plus faible que MI_{TB}), le "temps de misère" est réduit, ce qui est un gain de fiabilité.

Ici MI_{TB} (0,41%) est tout à fait égal à (0,42%), donc toute moyenne pondérée entre ces deux quantités ne peut pas être très différente, en particulier MI_{TA} (0,40%). À première vue, la stratégie ne réduit pas de façon significative l'indice de misère (MI); mais elle réduit significativement le temps de misère, et $MI_{\Delta Strategy}$ est beaucoup plus grand que 0, ce qui montre le bon effet de la stratégie sur la fiabilité. Notre décomposition de l'indicateur MI évite donc une mauvaise interprétation des résultats, ce qui pourrait nuire au déploiement de la stratégie.

5.3 Évaluation graphique de la stratégie de GDV sur la fiabilité.

Nous avons effectué divers évaluations de la fiabilité après la soustraction des effets exogènes. Une légère différence a été observée sur les résultats entre les évaluations avec et sans isolement des facteurs exogènes. Ceci s'explique par le fait que la section d'autoroute est assez courte (3 km) et située à un endroit où les changements de voies sont fréquents ; les facteurs exogènes dus principalement à la réduction de la vitesse libre n'ont pas eu beaucoup d'influence sur les résultats.

Dans ce paragraphe, je propose un diagramme qui synthétise les résultats. Les indicateurs de fiabilité sont tracés suivant les axes BAU ouverte / BAU fermée (Figure 63). Chaque indicateur est représenté par deux marqueurs, donnant deux informations. Pour le premier marqueur "B" (pour Avant), l'abscisse X correspond à la valeur de l'indicateur pour la série RB (*Reference Before*) et l'ordonnée Y correspond à sa valeur pour la série TB' (*Treated Before*). Les coordonnées X et Y du deuxième marqueur "A" (pour Après) sont les valeurs de l'indicateur pour la série RA (respectivement TA). Compte tenu des inconvénients des indicateurs relatifs où la moyenne figure au dénominateur, seuls les indicateurs non normalisés sont tracés: moyenne, temps de précaution, temps de planification et temps des voyages tardifs.

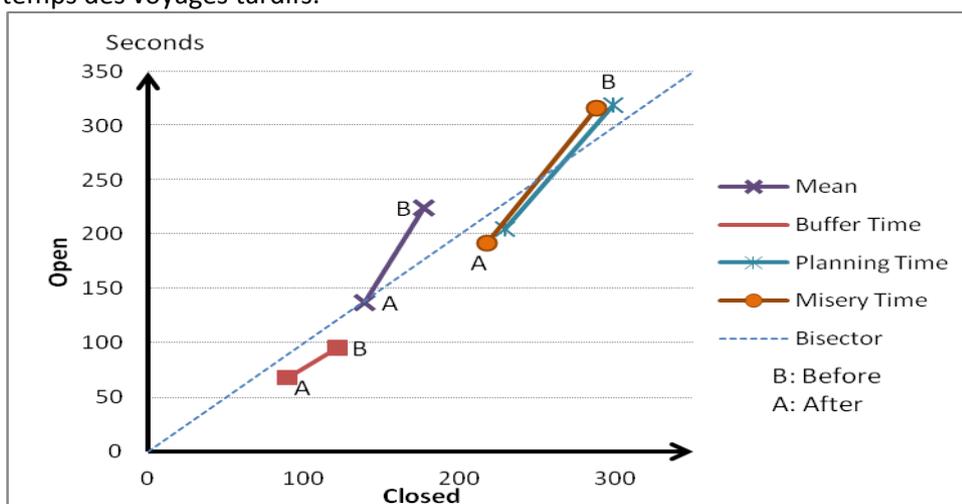


Figure 63 : Evolution of reliability indicators on an Open-Closed axis

La bissectrice indique l'égalité des indicateurs entre les périodes fermée et ouverte. Plus les indicateurs sont proches de la bissectrice, plus la différence entre les deux périodes est faible. Lorsque le vecteur

BA est parallèle à la bissectrice, la stratégie n'a aucune incidence sur l'indicateur, et lorsque les marqueurs sont au-dessous de la bissectrice, l'indicateur est meilleur pour les périodes ouvertes que pour les périodes fermées. Enfin, la stratégie a un impact positif (respectivement négatif) lorsque ce vecteur se rapproche ou s'éloigne de la première bissectrice.

Nous observons sur la Figure 63 que, pour la moyenne des temps de parcours, le marqueur "A" pour les périodes après est situé sur la première bissectrice : cela signifie qu'il y a équité entre les périodes ouverte et fermée. Il était situé au-dessus de la première bissectrice pour les périodes B : cela signifie une diminution du temps de parcours moyen due à la GDV, plus importante pour les périodes où la BAU est ouverte que pour celles où elle est fermée. Le temps de précaution s'est amélioré dans les périodes après puisque ses deux composants diminuent d'avant en après. En outre, comme les marques sont situées en dessous de la première bissectrice, le temps de précaution reste légèrement meilleur pour les périodes où la BAU est ouverte que pour celles où elle est fermée. Les deux composantes du temps de planification diminuent entre les périodes avant et après, ce qui signifie une grande amélioration des conditions de la circulation. Dans la période avant, le temps de planification était meilleur (inférieur) pendant les périodes fermées - point B au-dessus de la bissectrice. Comme le point A est au-dessous de la bissectrice, l'amélioration est plus grande pour les périodes ouvertes que pour les périodes où la BAU est fermée, ce qui montre l'avantage de la GDV.

5.4 Conclusion

Dans cette section, j'ai présenté la méthodologie que nous avons développée pour isoler les facteurs exogènes dans une évaluation de la fiabilité par la méthode avant-après. En effet, contrairement aux évaluations de la congestion ou des conditions météorologiques, la fiabilité du temps de parcours s'intéresse à la totalité de la distribution et non seulement à la moyenne. Il était donc important de développer une méthodologie qui isole les facteurs exogènes sur toute la distribution. Ceci a permis de distinguer les impacts des facteurs exogènes de ceux de la stratégie. Nous avons par la suite décomposé certains indicateurs de fiabilité calculés « après » en trois parties : l'indicateur « avant », l'impact de la stratégie, et l'impact des autres changements. La variation « brute » avant/après d'un indicateur de fiabilité, sans tenir compte de l'impact des autres changements, est potentiellement fallacieuse. Nous avons également proposé un diagramme qui permet de synthétiser les résultats de ces évaluations de manière simple.

6. Modélisation de la distribution du temps de parcours

L'évaluation d'un système se fait d'abord a priori pour estimer les avantages qu'apportera le système une fois implémenté ; ensuite, l'évaluation a posteriori s'attachera à vérifier que le système remplit bien son rôle et apporte les améliorations pour lesquels il a été conçu. Dans les évaluations a priori nous ne disposons pas de données empiriques pour l'évaluation, on a donc recours à des modèles de simulation. Comme la majorité des indicateurs proposés pour quantifier la fiabilité du temps de parcours sont fondés sur les quantiles de sa distribution, une bonne connaissance de cette distribution est nécessaire. Une modélisation probabiliste permet de bénéficier de la théorie et des connaissances sur les variables aléatoires (indépendance, agrégation, somme des variables aléatoires, etc.). La connaissance de l'ensemble de la distribution du temps de parcours se résume en quelques paramètres, ce qui facilite le calcul des indicateurs de fiabilité et permet de comparer leurs valeurs avec celles obtenues sur des sites différents ou avec des conditions différentes.

S'il n'y avait pas de congestion, la loi normale pourrait modéliser correctement les temps de parcours. Cependant le phénomène de congestion entraîne une distorsion et une autre distribution est nécessaire. Différentes lois sont présentées dans la littérature comme aptes à modéliser la distribution du temps de parcours. La distribution log-normale est la plus couramment proposée dans la littérature

(Clark & Watling, 2005; Sumalee et al., 2006; El Faouzi & Maurin, 2007; Hollander & Liu, 2008, Rakha et al., 2006) et beaucoup d'autres concluent sont prononcés pour la distribution log-normale. (El Faouzi & Maurin, 2007) montrent que la distribution log-normale est bien adaptée pour représenter la distribution du temps de parcours empirique sur un tronçon ; en supposant l'indépendance des temps de parcours des différents tronçons d'un itinéraire, la loi du temps de parcours global est la somme des lois par tronçons ; les auteurs montrent qu'une somme de lois log-normales, sans être exactement une loi log-normale, peut être approximée par une telle loi. Ceci facilite le calcul de la fiabilité du temps de parcours pour un itinéraire. (Al-Deek & Emam, 2006) ont proposé une loi Weibull ; (Polus, 1979) a conclu à une loi Gamma. (Kim & Mahmassani, 2014 et 2015) combinent deux lois gamma, dont les paramètres de forme caractérisent les variabilités du temps de parcours (variabilité de véhicule à véhicule pour la première loi, variabilité d'un jour à l'autre pour la seconde loi). Ce modèle « Gamma-Gamma », tout en restant simple, permet de comprendre deux dimensions de la variabilité du temps de parcours – par exemple les auteurs montrent que la variabilité de jour à jour est liée aux conditions météorologiques. Ce modèle est utilisé dans l'évaluation a priori de l'impact, sur la fiabilité du temps de parcours, des projets d'ingénierie routière.

Dans (Taylor & Susilawati, 2012) et (Susilawati et al., 2012), la distribution de Burr est adoptée : l'avantage de celle-ci est d'avoir une queue de distribution qui pourrait correspondre à celle des données empiriques. Postérieurement à notre recherche, Delhome et al.(2015) mettent en évidence la plasticité des lois de Halphen pour représenter les variabilités des distributions de temps de parcours selon l'heure de la journée ou selon le jour dans le mois. (Delhome 2016) compare différentes modélisations du temps de parcours et conclut à la supériorité de la loi de Halphen – *ex aequo* parfois avec la loi de Burr.

Jugeant qu'aucune de ces distributions n'est complètement adaptée à celle des temps de parcours empiriques, caractérisée par un coefficient d'asymétrie élevé et une longue queue, nous avons entrepris une recherche, mon collègue Maurice Aron et moi, avec l'aide d'un stagiaire de première année de l'ENPC, Younes Guessous. Nous nous sommes fixés comme objectif de modéliser la distribution du temps de parcours en fonction des conditions du trafic. Nous avons opté dans un premier temps pour une modélisation suivant l'heure de la journée, et par la suite pour une modélisation suivant le niveau de service.

6.1 Modélisation de la distribution suivant l'heure de la journée

Six lois statistiques (Log-normale, Gamma, Burr, Weibull, mélange de deux lois normales et mélange de deux lois Gamma) ont été comparées pour modéliser les données du temps de parcours de la section commune des autoroutes A4 et A86 de l'année 2002. La validation des résultats a été faite sur les données de la même section d'autoroute, mais pour l'année 2006.

Dans nos précédentes recherches, nous avons mis en évidence le fait que la variabilité du temps de parcours est plus élevée en fin de congestion que pendant les autres périodes (voir Figure 54). Il est donc nécessaire d'accorder une attention particulière à cette période. Nous avons alors partagé les données de trafic suivant les périodes de la journée: période creuse, période de pointe et période de fin de pointe. Ces périodes ont été identifiées par observation des congestions sur les données récoltées sur la section commune des autoroutes urbaines A4 et A86 à l'est de l'Ile-de-France (Figure 59). Il en ressort que:

- Les périodes de pointe sont considérées de 7h à 10h59 et de 16h à 20h59 (soit 22 521 données);
- Les périodes transitoires ou de «fin de congestion», de 11h00 à 11h59 et de 21h00 à 21h59. Cette période compte 4 913 données dans notre base. 0,25% de ces données ont été

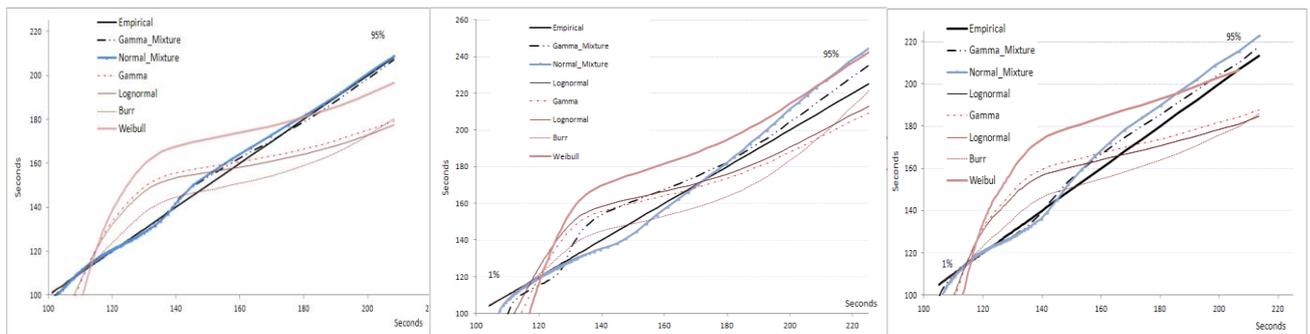
supprimées lorsque les temps de parcours étaient supérieurs à 400 secondes (ce qui correspond à une vitesse inférieure à 27 km/h) ;

- Les heures restantes constituent la période fluide (30 846 données). À l'origine, il y avait 31 053 temps de parcours, mais nous avons éliminé 207 valeurs supérieures à 300 secondes (i.e. une vitesse inférieure à 36 km/h). Ces valeurs concernent 0,66% des données et ont donc peu d'influence sur les percentiles.

Dans une première étape, les données de ces différents intervalles ont été visualisées par des histogrammes ; par la suite, elles ont été comparées avec les six modèles de distribution (Log-normale, Weibull, Gamma, Burr, Normal Mixture (un mélange de deux distributions Normales) et Gamma Mixture (mélange de deux distributions Gamma)).

Nous donnons les analyses de l'adéquation de chacune des six lois statistiques avec la distribution empirique, pour les trois périodes (fluide, congestion et fin de congestion). Ces analyses sont faites sur:

1. des diagrammes quantile-quantile (Figure 64) (en abscisse se trouvent les quantiles théoriques, et en ordonnée les quantiles observés): s'il y avait une distribution théorique égale à la distribution empirique, le couple de lois apparaîtrait par définition comme la première bissectrice sur le graphique. Plus le percentile théorique est proche du percentile empirique (donc le couple proche de la bissectrice), plus le modèle est précis.
2. des tableaux donnant les principaux percentiles, sur lesquels sont basés les indices de fiabilité, la moyenne et l'écart-type.
3. les paramètres des distributions. L'analyse des variations des paramètres selon les conditions (de trafic, de météorologie...) permet de caractériser et de comprendre l'impact de ces conditions. Ils pourraient également servir pour des comparaisons futures avec les paramètres calibrés sur d'autres sites.



(a): Période de trafic fluide

(b): Période de pointe

(c): Fin de congestion

Figure 64: Diagrammes quantile-quantile des différentes lois et mélange de lois modélisant les distributions du temps de parcours

Table 2 : Percentiles, mean (E(x)) and standard deviation (σ) for the empirical and 6 theoretical distributions (Fluid)

%observations	Empirical	Log-					
		normale	Γ	Burr	Weibull	Γ Mixture	Normal Mixture
5%	104,9	89,3	85,9	104,9	61,9	103,7	103,5
10%	106,9	96,3	94,0	106,8	75,7	106,6	106,7

50%	117,1	125,9	126,9	119,5	128,0	117,7	118,3
80%	133,3	150,0	152,2	140,7	162,0	132,1	131,8
90%	180,7	164,4	166,7	159,3	179,0	179,5	182,2
95%	208,2	177,3	179,3	180,3	192,7	207,1	208,8
E(x)	129,0	128,6	129,0	128,2	127,8	129,0	129,3
σ	32,9	27,1	28,6	28,8	39,6	19,3	19,5

Table 3 : Percentiles, mean (E(x)) and standard deviation (σ) for the empirical and 6 theoretical distributions (Congestion)

%observations	Empirical	Log- normale	Γ	Burr	Weibull	Γ Mixture	Normal Mixture
5%	109,4	91,3	81,8	109,3	50,6	97,1	106,5
10%	112,3	100,9	92,8	112,1	69,1	107,3	111,2
50%	127,2	143,4	139,9	132,4	143,7	124,5	126,4
80%	187,2	180,7	178,3	169,7	196,5	189,8	192,7
90%	215,1	203,9	200,8	204,7	223,6	223,0	232,0
95%	239,9	225,2	220,8	247,0	244,8	251,3	259,8
E(x)	149,6	148,9	144,1	149,8	148,0	148,7	149,7
σ	51,0	41,6	42,7	56,1	59,4	44,2	37,8

Table 4 : Percentiles, mean and standard deviation for the empirical and 6 theoretical distributions (End of congestion)

%observations	Empirical	Log- normale	Γ	Burr	Weibull	Γ Mixture	Normal Mixture
5%	107,8	90,3	86,0	107,9	58,0	105,8	104,5
10%	109,8	97,7	94,8	109,5	72,6	108,9	108,1
50%	119,4	129,1	130,3	122,3	130,7	120,4	120,3
80%	137,6	155,1	158,0	144,5	170,0	135,9	134,2
90%	180,3	170,6	173,9	163,9	190,1	185,5	190,0
95%	213,5	184,7	187,8	185,8	206,4	217,8	222,8
E(x)	132,8	132,2	132,8	131,6	131,3	132,7	132,5
σ	37,1	29,1	31,1	30,0	45,0	24,1	24,9

L'ajustement de la distribution empirique avec les différentes distributions montre de meilleurs résultats pour le mélange Γ , comme nous pouvons le voir sur les courbes de la (Figure 64) : le cas fluide est graphiquement très satisfaisant (Figure 64.a), il l'est moins pour le trafic de fin de congestion (Figure 64.c). Le cas congestionné n'est satisfaisant pour aucune des lois testées, mais le mélange Γ reste quand même la meilleure loi, suivi de la loi mélange normale.

Sur les tableaux (Table 2, Table 3, Table 4), nous pouvons observer les différences entre les valeurs des percentiles empiriques d'une part et ceux des différentes lois statistiques d'autre part. Comme nous pouvons le voir, le mélange Γ donne la meilleure distribution pour le cas fluide et pour celui de fin de congestion. La différence entre les percentiles empiriques et ceux de mélange Γ est d'au plus 1,2 seconde pour le cas fluide et de 4,2 secondes pour le cas congestionné. La loi de Burr modélise mieux le cas congestionné : elle représente mieux la queue de la distribution et donne de meilleurs résultats pour les percentiles 5%, 10% et 95% comme le montre le tableau 2.

Pour la période de pointe (Figure 64.b, Table 3), l'ajustement de la distribution empirique avec les diverses distributions théoriques n'est pas satisfaisant. Le mélange de lois Γ et le mélange de lois normales sont les meilleures distributions. Cependant, les queues des deux mélanges ne correspondent pas correctement aux temps de parcours empiriques. La distribution de Burr est meilleure pour les percentiles 5%, 10% et 95% comme le montre la Table 3.

Sur la Figure 64.c nous pouvons voir que, pour le cas de fin de congestion, le mélange normal et le mélange Γ correspondent le mieux aux observations empiriques. Toutefois, les ajustements sont moins satisfaisants que dans le cas du trafic fluide (voir Figure 64.a). Comme le montre la (Table 3), pour les six observations sélectionnées, la différence en percentiles est d'au plus 4,2 secondes pour la distribution de mélange Γ . Il est de 9,7 secondes pour le mélange normal. L'ajout d'un troisième composant dans le mélange améliorerait l'adéquation de la distribution ; mais il augmenterait le nombre de paramètres, ce qui diminuerait la robustesse du modèle.

Parmi les distributions probabilistes testées, le mélange Γ à deux composantes ou le mélange normal sont les meilleurs. Pour les trois périodes, les temps de parcours moyens des premières composantes sont très proches du temps de parcours correspondant à la vitesse limite (90 km/h), avec des coefficients de variation raisonnables (près de 7%). Les temps de parcours moyens et les coefficients de variation sont plus élevés pour les deuxièmes composantes et augmentent avec le niveau de congestion. Les paramètres de ces distributions résument la distribution du temps de parcours et permettent le calcul des indicateurs de la fiabilité.

Table 5: Parameters of three theoretical distributions

	Burr			Components of Normal Mixture					Components of Γ Mixture				
	A	b	q	Λ	E(x1)	σ_1	E(x2)	σ_2	λ	α_1	β_1	α_2	β_2
Fluide	57,3	105,5	0,10	0,795	116	7,8	181	40,1	0,795	222,8	0,52	20,7	8,76
Congestion	44,8	109,7	0,08	0,596	121	8,0	192	58,6	0,363	612,3	0,19	9,2	18,21
Fin de congestion	76,0	107,8	0,07	0,783	118	8,1	185	51,2	0,773	229,4	0,51	14,2	12,88

avec

$$f_{Burr} = \frac{aqx^{a-1}}{b^a \left(1 + \left(\frac{x}{b}\right)^a\right)^{1+q}} \quad (D.32) \quad ; \quad f_{\Gamma} = x^{\alpha-1} \frac{\beta^\alpha e^{-\beta x}}{\Gamma(\alpha)} \quad (D.33)$$

Pour les trois périodes (fluide, congestionnée et « fin de congestion »), le premier paramètre α de la première composante des mélanges Γ est très élevé (respectivement 222, 612, 229). A ce niveau, une distribution Γ est équivalente à une distribution normale avec mêmes moyenne et écart-type.

Les premiers composants des mélanges Γ et normal ont plus ou moins le même temps de parcours moyen (voir Table 6). Ceci n'est pas surprenant, ces valeurs sont proches de 120 secondes qui correspondent à la vitesse limite de 90 km/h pour les 3 kilomètres. Lorsque, par ailleurs, l'écart-type de la première composante des mélanges Γ et Normal est le même, cela signifie que la première composante du mélange normal est l'approximation normale de la première composante du mélange Γ ; c'est le cas pour la période fluide et pour les périodes de « fin de congestion », avec un écart-type proche de 7,8. Notons également que le paramètre de mélange λ est tout à fait le même pour les mélanges Γ et Normal (0,795) et 0,773 pour Γ , et 0,795 et 0,783 pour Normal - voir tableau 5).

La deuxième composante du mélange Γ correspond à un temps de parcours moyen plus élevé (près de

180 secondes dans les périodes fluides et de fin de congestion ce qui correspond à une vitesse moyenne de 60 km/h). Les écarts-types sont beaucoup plus élevés (40 à 55 secondes), permettant des vitesses bien inférieures à 60 km/h. Nous faisons pratiquement le même constat pour la seconde composante du mélange normal.

Table 6: Mixture parameter, mean ($E(x)$) and Standard deviation (σ) of the components of the Mixture distributions.

		Λ	$E(x_1)$	σ_1	$E(x_2)$	σ_2	$E(x)$	Σ
Normal Mixture	Fluide	0.80	116.0	7.8	181.0	40.1	129.3	19.5
	Congestion	0.60	121.0	8.0	192.0	58.6	149.7	37.8
	Fin de congestion	0.78	118.0	8.1	185.0	51.2	132.5	24.9
Γ Mixture	Fluide	0.80	115.5	7.7	181.2	39.9	129.0	19.3
	Congestion	0.36	114.6	4.6	168.2	55.3	148.7	44.2
	Fin de congestion	0.77	118.1	7.8	182.6	48.5	132.7	24.1

En comparant les paramètres de distribution de Burr (Table 5) à ceux donnés dans (Taylor & Susilawati, 2012) pour une section de 3 kilomètres, on retrouve presque la même valeur pour le paramètre de forme "a" dans le cas fluide (57,3 dans notre cas et 58,25 pour l'autoroute Southern Express II-Penney Hill Road); mais nous ne trouvons pas la même valeur pour les paramètres q car ils n'utilisent pas le paramètre d'échelle b. De plus amples comparaisons sont nécessaires pour vérifier la transférabilité du modèle.

6.2 Modélisation par niveau de service

Dans la section précédente nous avons modélisé la distribution du temps de parcours suivant les conditions de trafic définies suivant l'heure de la journée. Nous avons exclu des données (les vitesses extrêmes (vitesse faible (resp. élevée) pour le cas fluide (resp. congestionné) mais ce mode de sélection présente des limites. Ceci pourrait expliquer le fait que nos meilleurs résultats des modèles probabilistes ajustant le temps de parcours sont des mélanges à deux composantes (Γ et normal) plutôt que des lois de probabilité non composées. D'où l'idée de séparer le trafic suivant le niveau de service et non l'heure de la journée.

Un modèle de régression est utilisé par niveau de service pour établir la relation entre le temps de parcours et la densité du trafic. Le point central de chaque niveau de service est caractérisé par la densité moyenne et le temps moyen de parcours.

6.2.1 Définition des niveaux de services

Calculer les niveaux de service nécessite d'abord de calibrer le diagramme fondamental, puisqu'on ne peut pas travailler sur les données brutes (prendre, par exemple, la valeur maximale des données du débit comme la capacité de l'autoroute peut être faux si cette valeur est due à une erreur de mesure). Parmi les différents modèles du diagramme fondamental, le choix a été adopté de faire le calibrage pour les modèles de "puissance généralisée" et "exponentiel généralisé". Le calibrage a été effectué par une régression non linéaire par la méthode des moindres carrés sur les données de la section d'autoroute A4-A86.

La Figure 65 montre les différentes modélisations du diagramme fondamental à l'aide des modèles de puissance généralisée et le modèle exponentiel sur les données collectées en 2002. On constate que le modèle exponentiel généralisé donne une meilleure représentation de la queue du nuage de points. Cela lui donne un avantage relatif par rapport au modèle de puissance généralisée, même s'il ne

disqualifie pas ce dernier. La Figure 66 donne la mise en œuvre des mêmes modèles pour les données de 2006, afin de valider la comparaison entre les deux modèles.

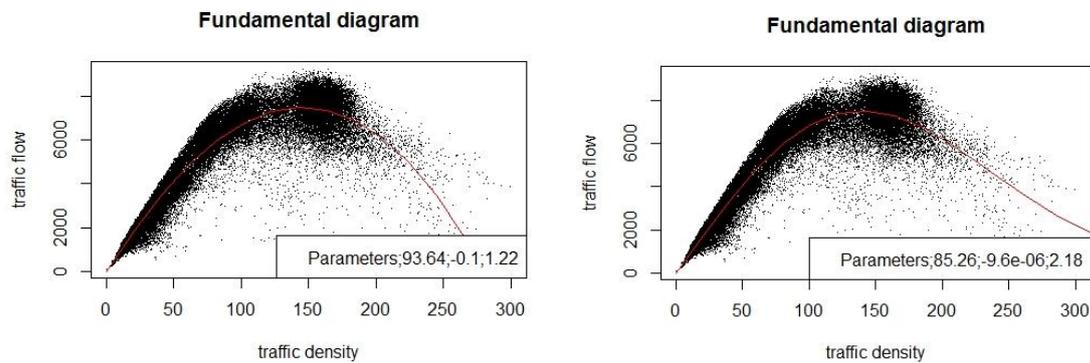


Figure 65 : Global fundamental diagram in 2002 fitted with (a) a generalized power model (b) a generalized exponential model

Number of data: 53 677; Residual standard error for (a) : 707,4 ; for (b) : 696,5

Le modèle exponentiel généralisé semble mieux représenter ces données, que ce soit pour l'année 2002 ou pour l'année 2006 ; c'est donc ce modèle qui sera utilisé pour fixer les seuils des niveaux de service.

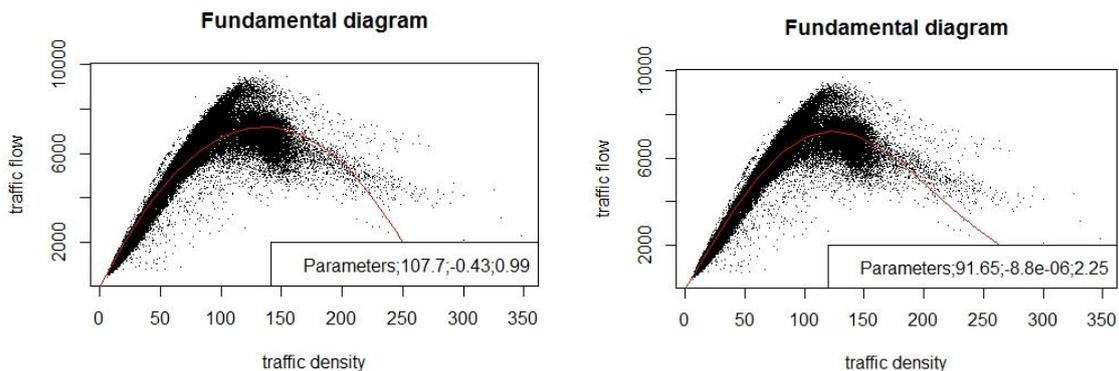


Figure 66 : Global fundamental diagram in 2006 fitted with (a) a generalized power model (b) a generalized exponential model

Number of data: 53 677; Residual standard error for (a) : 655 ; for (b) : 588,2

Les seuils des niveaux de service (LOS) sont obtenus en fixant simplement des seuils en termes de pourcentages de la capacité et de la densité critique.

Le "*Highway Capacity Manual*" définit six niveaux de services, alors qu'en France on se limite souvent à quatre niveaux de service (voir Cohen et al., 2009). Dans ce travail, nous avons considéré 5 niveaux de service qui sont définis de la façon suivante:

- LOS 1: densité inférieure à la densité critique et débit inférieur à 75% de la capacité
- LOS 2: densité inférieure à la densité critique et débit entre 75% et 90% de la capacité
- LOS 3: densité inférieure à la densité et débit supérieur à 90% de la capacité
- LOS 4: densité supérieure à la densité critique et débit supérieur à 90% de la capacité
- LOS 5: densité supérieure à la densité critique et débit inférieur à 90% de la capacité

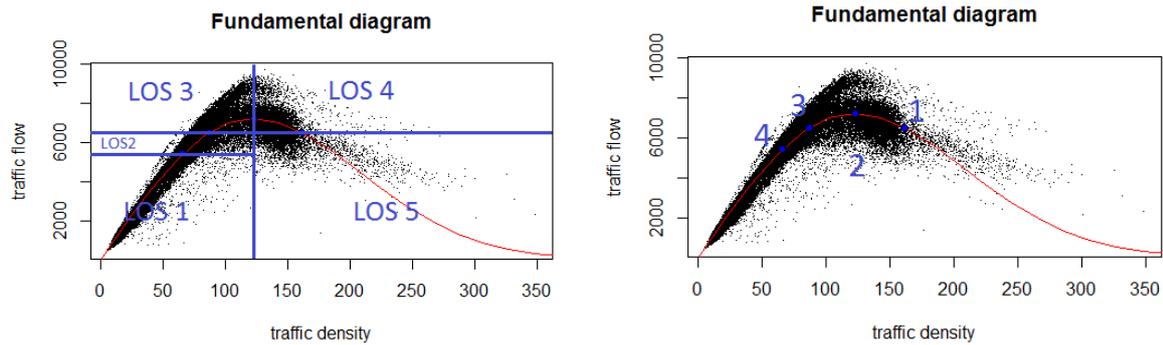


Figure 67 : (a) Levels-of-service selection (b) Computed points

Les quatre points séparant les cinq niveaux de services (LOS) sont définis de la manière suivante : Point 1 (entre LOS 5 et 4); Point 2 (entre LOS 4 et 3); Point 3 (entre LOS 3 et 2); et finalement le point 4 (entre LOS 2 et 1). Leur débit, densité et vitesse sont donnés dans le Tableau 2.

Table 7 : Extracted figures for 2002 and 2006

Points	2002			2006		
	Flow	Density	Speed	Flow	Density	Speed
1	6 753,8	184,0	36,7	6 497,2	161,6	40,2
2	7 504,2	139,2	53,9	7 219,1	122,8	58,8
3	6 753,8	98,0	68,9	6 497,2	86,9	74,7
4	5 628,2	74,1	75,9	5 414,3	65,9	82,1

Après avoir séparé les données du temps de parcours suivant les 5 niveaux de service, nous les avons modélisées par des distributions probabilistes. Afin d'avoir une idée des distributions qui seront utilisées, nous avons d'abord tracé les histogrammes du temps de parcours par niveau de service.

Nous avons confronté les données aux lois log-normale et Singh-Maddala (Burr) et pour les trois premiers niveaux de service (LOS) ; nous avons essayé également un modèle de mélange normal. La qualité de la modélisation est évaluée en utilisant le critère d'information Akaike. Le modèle qui minimise ce critère est considéré comme le meilleur (voir [LB. 9]).

Dans la Figure 68, nous présentons les graphiques des meilleurs résultats pour les LOS 3, 4 et 5. Ce sont les LOS les plus intéressants, car ils se situent près de la capacité maximale ou dans la partie congestionnée du diagramme fondamental et concernent donc les périodes du trafic le plus variable. Les LOS 4 et 5 présentent un mode unique alors que, sur l'histogramme LOS 3, on peut observer trois modes. On remarque également que pour ce LOS 3, le mélange normal est meilleur que Singh-Maddala. Pour le LOS 4, nous ne remarquons pas de différence significative graphiquement entre les lois log-normale et Singh-Maddala. L'indice AIC montre une petite supériorité pour la première. Enfin, on peut remarquer la supériorité du modèle Singh-Maddala par rapport à la loi log-normale pour le LOS 5. Ceci est également confirmé par les valeurs de l'indice AIC.

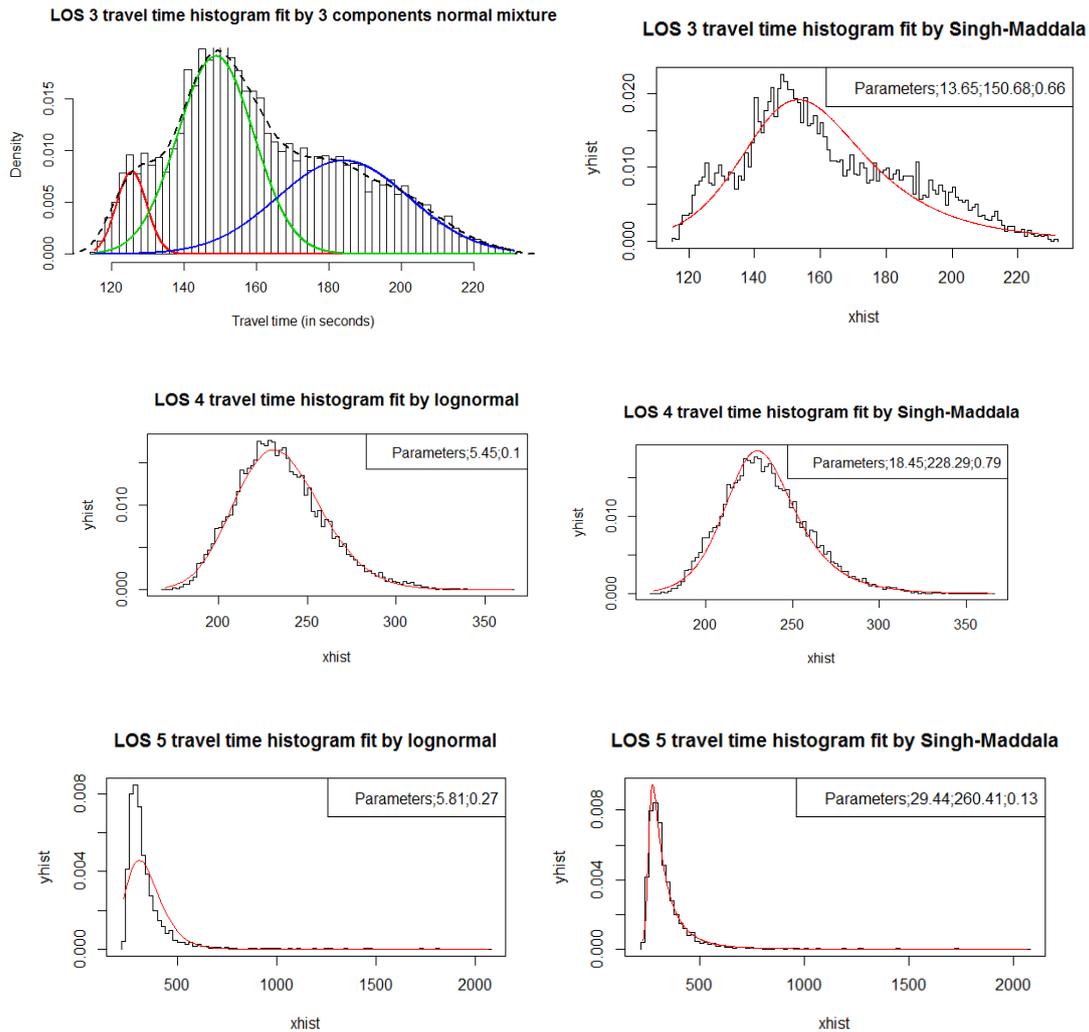


Figure 68 : Histogram of LOS 3, 4 and 5 travel times fit by different distributions in 2002

Pour valider les résultats des modèles obtenus sur les données de 2002, nous avons utilisé les données de 2006. Nous avons utilisé ici également le critère AIC pour tirer les conclusions sur la meilleure loi pour modéliser la distribution des temps de parcours. Nous remarquons que la distribution log-normale est loin derrière Singh-Maddala et le mélange normal, à l'exception du LOS 4 où il est proche de Singh-Maddala. Nous remarquons également que la distribution de Singh-Maddala modélise le mieux les LOS 1, 4 et 5, alors que mélange normal est légèrement meilleur pour les LOS 2 et 3. Nous rappelons que la distribution de Singh-Maddala a 3 paramètres, tandis que le mélange normal avec 2 composantes a $2 \times 2 = 4$ paramètres.

En conclusion, nous pouvons recommander l'utilisation de la distribution de Singh-Maddala, car elle est la distribution la plus stable et qu'elle peut s'adapter aux différents niveaux de service allant du plus fluide au plus congestionné. Cette loi représente un bon compromis entre la précision et la simplicité pour modéliser la distribution des temps de parcours pour les différents niveaux de service.

Nous fournissons et discutons dans le papier [LB. 9] des estimations des paramètres et les intervalles de confiance correspondant pour les paramètres de Singh-Maddala pour les 5 niveaux de service.

Amélioration des modèles du temps de parcours

Une façon d'améliorer la prévision du temps de parcours est d'utiliser une régression linéaire entre le temps de parcours et le débit. Afin de pouvoir comparer les données obtenues avec d'autres sites, nous normalisons le temps de parcours et le flux de trafic. La formule de régression utilisée est la suivante:

$$T_l - \bar{T}_l = \alpha \cdot (q_l - \bar{q}_l) + \beta \quad (D.34)$$

Où ($l = 1..5$) représente le nombre de niveaux de service (LOS), α et β les paramètres du modèle. Nous avons effectué alors les régressions, calculé les paramètres et analysé la qualité du modèle (voir [LB. 9]).

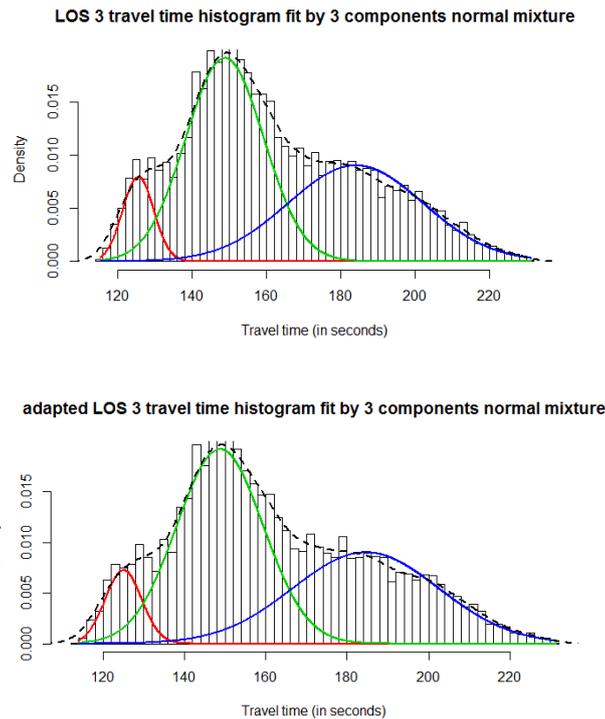


Figure 69 : Histogram of original and adapted LOS 3 travel times fit by 3 components normal mixture in 2002

Les comparaisons graphiques (Figure 69) et celles des paramètres des deux distributions pour le LOS 3 modélisé par des mélanges normaux, ne montrent pas de différences significatives entre le temps de parcours originel et celui amélioré par l'équation (D.34). Même les paramètres de mélange, les moyennes et les écarts-types ne sont pas significativement différents (voir [LB. 9]). On peut donc conclure que cette approche ne donne pas de meilleurs résultats.

6.3 Conclusion

L'objectif de cette recherche était de modéliser la distribution du temps de parcours par une loi probabiliste qui permettrait de bénéficier de la connaissance théorique de cette loi. Ceci permettrait d'analyser la fiabilité du temps de parcours de manière rigoureuse minimisant les effets des erreurs de mesures et incohérences qui caractérisent souvent les données mesurées. Vu que le trafic n'est pas homogène et que nous observons plus de dépendances des données en cas de congestion que quand le trafic est fluide, nous avons testé différents modèles pour différentes conditions du trafic. En différenciant dans un premier temps les états du trafic suivant la période horaire de la journée (heures de pointe, heures creuses et périodes transitoires). Dans un second temps, nous avons séparé les états du trafic suivant le niveau de service (LOS). Dans ce dernier cas, nous avons calibré le diagramme

fondamental : le modèle exponentiel a été adopté. Une partie de l'approche est validée, basée sur les données de temps de parcours du même site mais sur une autre période. Dans notre première analyse, le mélange Γ à deux composantes ou le mélange normal étaient les meilleurs. Ils donnaient quasiment les mêmes résultats pour les cas fluides et transitoires. Quand le trafic est séparé par niveau de service, c'est la distribution de Burr (ou Singh-Maddalah) qui donne les meilleurs résultats. Ceci est probablement dû à une plus grande hétérogénéité des conditions de la circulation quand une séparation horaire est utilisée, même si nous avons exclu les données extrêmes. Avec la séparation par niveau de service, les données sont plus homogènes et c'est donc la loi de Burr qui est recommandée ; ses paramètres varient cependant en fonction des conditions de la circulation. Dans la mesure où les paramètres des distributions varient en fonction de l'infrastructure, la transférabilité de l'approche reste encore à vérifier.

7. Étude de l'effet de l'agrégation sur la distribution du temps de parcours

Le temps de parcours dépend d'un certain nombre de facteurs - le conducteur, les conditions de circulation (elles-mêmes en fonction de l'heure du jour), la voie utilisée. Un autre facteur important est la manière de le mesurer. Les données brutes des conducteurs sont très disparates et ne représentent pas nécessairement l'état du trafic si elles sont observées individuellement. L'agrégation du temps de parcours est une opération importante, non seulement pour traiter moins de données, mais également pour l'usage de ces données. Des données désagrégées sont utiles pour des applications où la variabilité des conducteurs ne doit pas être ignorée, par exemple pour la régulation de la vitesse, les études économiques ou le choix du mode de transport, etc. Mais pour d'autres études, les données doivent être agrégées et lissées pendant un certain intervalle de temps et / ou espace pour obtenir des informations de trafic fiables. Prenons l'exemple de l'information voyageur : le voyageur qui tient compte des indices de planification ou de précaution pour planifier son voyage sait que cet indice concerne la vitesse moyenne, et que s'il roule effectivement à cette vitesse moyenne, il arrivera à sa destination suivant ce qui est planifié. Il n'a pas besoin de connaître les indicateurs des conducteurs individuels. Également, un gestionnaire de trafic veut généralement connaître, optimiser ou prévoir le niveau de service et les indices de fiabilité sur une période de temps ; il ne s'intéresse donc pas aux informations désagrégées.

L'utilisation d'un cadre probabiliste donne une nouvelle perspective et nous force à poser des questions, telles que : qu'elle est l'unité statistique? Les hypothèses sous-jacentes (indépendance) sont-elles vérifiées ?

L'utilisation de distributions des temps de parcours moyens agrégées sur une période plus ou moins longue a un avantage : elle masque la variabilité de véhicule à véhicule. Mais cette diminution de la variabilité a une conséquence sur la distribution. Les choix de l'unité d'agrégation (espace ou temps) et du pas d'agrégation influent sur la distribution du temps de parcours et par conséquent sur l'étude de la fiabilité.

C'est ainsi que, une fois encore avec mon collègue Maurice Aron, nous nous sommes fixés comme objectif d'étudier l'influence de l'unité de mesure et du pas d'agrégation sur les indicateurs de fiabilité. Nous nous sommes fait aider dans ce travail par un nouvel élève de première année de l'ENPC, Mouad Ramil.

7.1 Construction de la distribution : unité temporelle ou spatiale ?

Selon (Kim & Mahmassani, 2014, 2015), la variabilité du temps de parcours peut être étudiée de différents points de vue : les auteurs privilégient deux dimensions, la variabilité de véhicule à véhicule,

ou la variabilité dans le temps. La première se réfère à la variation due aux conducteurs et prend le véhicule comme unité de mesure. La seconde se réfère aux fluctuations du temps de parcours selon le jour ou selon l'heure de départ : un même conducteur faisant le même trajet n'aura pas le même temps de parcours suivant l'heure de la journée ou bien le jour de la semaine, etc. Les sources de variabilité de véhicule à véhicule sont considérées comme provenant de facteurs endogènes tels que des comportements hétérogènes des conducteurs et des interactions entre eux. Les fluctuations temporelles surviennent, elles, quand la demande de trafic excède l'offre. Elles sont causées par des facteurs externes tels que la congestion, les incidents, les conditions météorologiques, les mesures de régulation, etc.

Il est intéressant de voir la conséquence de l'utilisation de l'une ou l'autre des unités sur la fiabilité. Pour faire cette analyse, nous avons utilisé les données de la section commune de l'autoroute A4-A86 que j'ai présentées dans le paragraphe (4.2.1). Dans notre cas, les temps de parcours utilisés pour l'analyse de fiabilité ont été calculés à partir des données de vitesse des années 2002 pour la période précédente, et de 2006 pour la période après. Les temps de parcours ont été calculés à partir de quatre stations de trafic consécutives pour chaque voie (équation(D.35))

$$TT = \sum_{j=1}^m TT_j \quad TT_j = \frac{\sum_{k=1}^n \left(\frac{1}{v_{kj}} \right) \cdot q_{kj}}{\sum_{k=1}^n q_{kj}} \cdot L_j \quad (D.35)$$

TT étant le temps de parcours de la section de 3 km, TTj est le temps de parcours de la section j; Lj est la longueur de la section j et finalement v_{kj} et q_{kj} sont respectivement la vitesse et le débit mesurés sur la voie k de la section j.

Les données à notre disposition ne sont pas fondées sur le temps de parcours individuel, mais sur la vitesse moyenne (harmonique) 6 minutes au capteur, dont l'inverse est le temps de parcours moyen (par kilomètre) par période de six minutes. Ces données ne conviennent pas pour construire une distribution par véhicule. L'unité statistique sera-t-elle donc seulement la période de temps?

La « distribution temporelle » est la répartition des temps de parcours moyens par période de 6 minutes - voir l'équation (D.35). Ce type de distribution est utile pour les opérateurs et les conducteurs - par exemple, son 95^{ème} percentile est le temps de parcours moyen maximum offert aux conducteurs sur 95% des créneaux horaires.

Or, les différentes périodes de temps de la journée ne sont pas toutes d'un intérêt égal ; l'intérêt est en fait proportionnel au nombre de véhicules qui circulent durant une période donnée. Aussi, même si nous n'avons pas de distribution des temps de parcours véhicule par véhicule, nous construisons ce que nous appelons « distribution pondérée » : chaque période de 6 minutes est pondérée par le débit de la période. Cette distribution est utile pour les calculs économiques ou de fiabilité - son 95^{ème} percentile, par exemple, est le temps de parcours (moyennés sur 6 minutes) de 95% des conducteurs.

Nous avons comparé les deux distributions. Comme le montre la Figure 70, tous les percentiles sont plus élevés pour la distribution pondérée. Cela est logique car, dans cette distribution, les périodes à fort trafic (donc avec un temps de parcours élevé) sont plus pondérées. Toutefois, pour les percentiles supérieurs à 80% (utilisés dans l'analyse de fiabilité), la différence entre les deux courbes, pour une année donnée, est très faible. Les analyses de fiabilité provenant des deux distributions sont donc presque identiques.

Nous avons alors utilisé la distribution temporelle du temps de parcours dans nos évaluations.

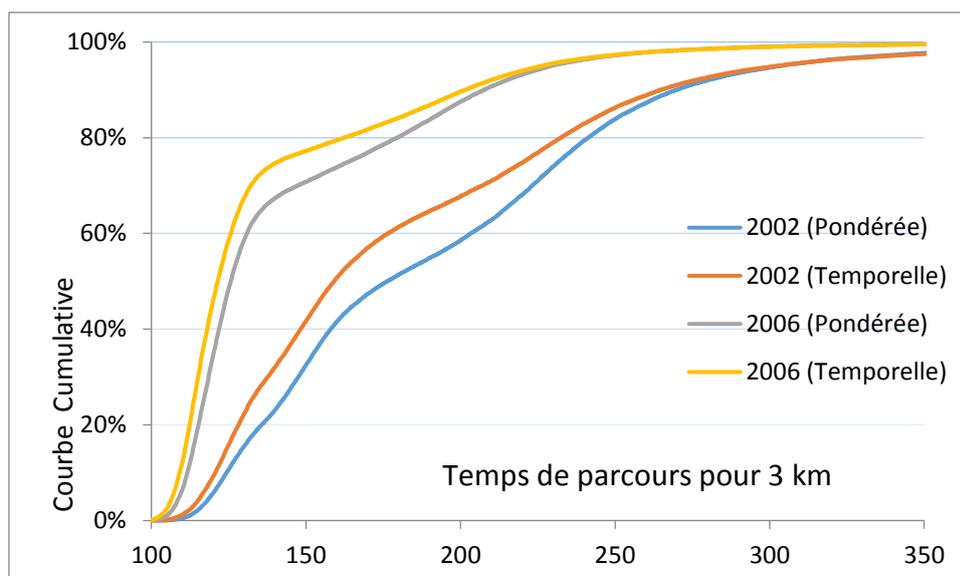


Figure 70 : Courbes cumulatives des distributions temporelle et temporelle pondérée du temps de parcours pour le site pour toutes les périodes (références et traitées) pour 2002 et 2006

7.2 Étude de l'effet de l'agrégation sur la distribution du temps de parcours

Afin d'analyser l'impact de l'agrégation de données sur la distribution du temps de parcours, nous avons agrégé des données individuelles en premier suivant différents pas de temps et puis suivant les pelotons de véhicules. Les données étaient collectées sur le tronçon commun A7-A51 dans le sud de la France, pour une journée (le 28 août 2009). Les distributions des temps de parcours ont été calibrées pour différents pas d'agrégation (30 secondes, 1 minute, 2 minutes, 3 minutes, 6 minutes, 30 minutes et 1 heure). Les analyses ont été menées pour chacune des trois voies de circulation du tronçon : voie de gauche, voie centrale et voie de droite.

7.2.1 Agrégation à partir des vitesses individuelles

Tout d'abord, les données de temps de parcours ont été agrégées selon l'un des pas de temps à tester ; puis une approximation de l'histogramme a été réalisée pour chacune des trois lois de probabilité : normale, Burr et log-normale (voir [LB. 15]).

Afin d'évaluer l'adéquation de loi statistique à la distribution des temps de parcours, l'analyse a été réalisée, d'une part, sur la base d'une analyse graphique de l'adéquation de l'histogramme de la loi avec celle des données, et complétée, d'autre part, par les évaluations des critères de Kolmogorov-Smirnov et celui d'information d'Akaike. Les tests ont été effectués, d'une part, sur des données agrégées sur des vitesses temporelles et, d'autre part, sur des vitesses harmoniques. Les résultats de ces tests montrent une meilleure adéquation dans le cas d'une agrégation sur la vitesse harmonique : les p-valeurs sont sensiblement plus élevées pour le test de Kolmogorov-Smirnov et les résultats d'Akaike sont plus faibles. C'est la raison pour laquelle l'étude a été poursuivie en utilisant les vitesses harmoniques.

Les tests de Kolmogorov-Smirnov et les résultats du critère d'information d'Akaike des distributions des temps de parcours ont été calculés par la suite pour les deux voies, centrale et de droite, pour les pas de temps respectifs de 30 secondes, 1 minute, 2 minutes, 3 minutes et 6 minutes. Comme utilisé dans la littérature, le seuil de rejet est fixé à 0,05.

Les résultats [LB. 15] poussent à rejeter la modélisation des données individuelles pour les trois lois testées. Pour les agrégations avec des pas de 30 secondes et 1 minute, seule la loi de Burr n'est pas rejetée ; et au-delà des 3 minutes, aucune des trois lois n'est rejetée.

Nous avons remarqué également que la loi de Burr est meilleure quel que soit le pas de temps pour la voie de droite. Elle l'est également pour la voie centrale, excepté pour les pas de temps de 3 minutes et de 6 minutes où les résultats favorisent la loi log-normale.

Après les tests d'adéquation, une représentation graphique a été effectuée pour une appréciation visuelle des résultats. L'histogramme de la distribution des temps de parcours est tracé pour chaque niveau d'agrégation et il est superposé avec le graphe de la loi avec les paramètres qui approximaient le mieux les temps de parcours. La Figure 71 donne un exemple de ces histogrammes pour la voie de droite associés aux différents pas de temps et approximés par la loi de Burr - le temps de parcours, sur l'axe des x, est exprimé en heures (pour parcourir 1 km).

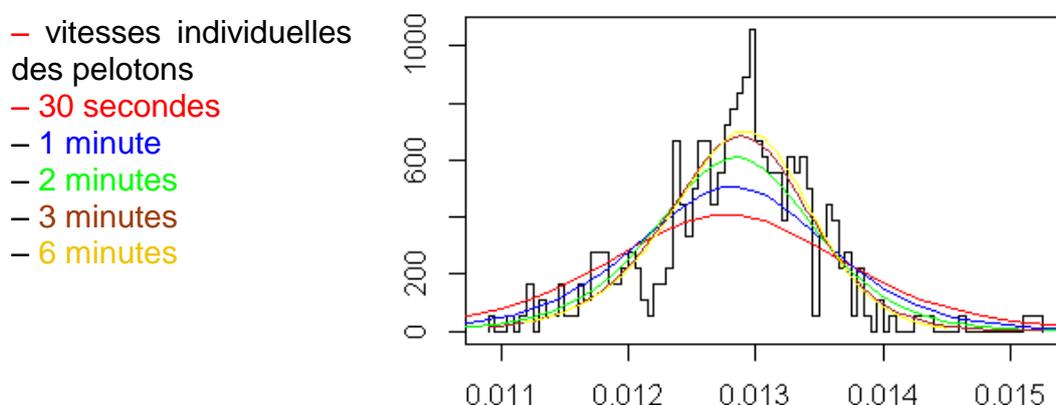


Figure 71 : Approximation des distributions des temps de parcours avec la Loi de Burr pour différents pas d'agrégation

Nous voyons que, plus le pas de temps augmente, plus la courbe a tendance à se resserrer. Cela rejoint l'analyse théorique de l'effet de l'agrégation des données dans (Aron et al. 2014). L'agrégation fait diminuer l'écart-type et donc la variabilité. Ce constat est confirmé par l'analyse des quantiles. Comme on peut le voir sur la (Table 8), les quantiles supérieurs à la médiane tendent à diminuer et ceux qui sont inférieurs tendent à croître. Ainsi, l'agrégation tend à rapprocher les différents quantiles de la médiane. Une attention particulière doit être accordée à l'agrégation des données si l'on veut faire des comparaisons de la fiabilité des temps de parcours entre deux sites. Cependant, les valeurs des percentiles ne sont pas très différents quand les intervalles d'agrégation sont proches. Par exemple TT95=49,94 secondes pour un intervalle d'agrégation de 2 minutes ; et il est égal à 49,45 secondes quand l'intervalle est de 3 minutes. Ceci n'interdit donc pas toute comparaison.

Table 8 : Quantiles pour la voie de droite sous différents pas de temps

Quantile	5%	10%	50%	70%	95%
Individuelles	38,298	40,000	46,753	49,315	57,143
30 secondes	38,298	40,909	45,570	47,368	57,143
1 minute	40,624	42,212	46,225	47,541	51,074
2 minutes	41,585	42,717	46,225	47,403	49,945
3 minutes	42,038	42,765	46,380	47,285	49,452
6 minutes	42,101	42,755	46,404	47,368	49,374

Par rapport aux paramètres de la densité de probabilité, la Table 9 donne les paramètres de la loi de Burr (équation (D.32)). Nous remarquons que le paramètre d'échelle b ne varie pas significativement, mais que globalement les paramètres croissent avec le pas d'agrégation.

Table 9: Paramètres de la loi de Burr sous différents pas de temps

Paramètres	a	B	q
30 secondes	19,55	0,012997	1,30
1 minute	24,07	0,013020	1,34
2 minutes	28,85	0,013003	1,35
3 minutes	31,09	0,013110	1,62
6 minutes	30,50	0,013251	2,05

Afin de minimiser l'auto-corrélation des données, qui rend le test de Kolmogorov-Smirnov peu fiable, nous avons testé également une agrégation à partir des pelotons de véhicules.

7.2.2 Agrégation à partir des pelotons de véhicules

Dans le cas où les variables sont corrélées, la validité des tests de Kolmogorov-Smirnov et d'Akaike est à considérer avec réserve. Une analyse de la corrélation des données dans le temps a été effectuée grâce au test de Durbin-Watson. Les résultats ont montré que, plus les données sont agrégées (de 30 secondes à 6 minutes), plus les données sont corrélées.

Pour tenter de se libérer de ce problème de corrélation, les agrégations ont été faites par la suite en considérant comme unité statistique le peloton de véhicules. Tous les véhicules successifs espacés d'une durée inférieure à 4 secondes constituent un peloton dont la vitesse est leur vitesse moyenne. La nouvelle distribution des temps de parcours, est calculée sur la base des vitesses harmoniques de ces pelotons. La statistique de Durbin-Watson croît, montrant une meilleure indépendance des données, mais elle n'est toujours pas très proche de 2 pour conclure à une non-corrélation.

	Sans peloton	Avec peloton
Voie centrale :	0,862	1,307
Voie de droite :	1,195	1,509

7.3 Conclusion

L'utilisation de distributions des temps de parcours moyens (agrégées sur une période de temps plus ou moins longue) présente un avantage : elle masque la variabilité de véhicule à véhicule, qui pollue le calcul de la fiabilité du temps de parcours. Elle a aussi un inconvénient : elle est sensible à la période d'agrégation.

Nous avons étudié en premier l'influence de l'unité de temps utilisée pour la construction de la distribution du temps de parcours. Partant de données déjà agrégées, nous avons comparé la distribution temporelle et la distribution temporelle pondérée par le nombre de véhicules. Une légère différence a été observée, qui à notre avis n'influencera pas significativement l'analyse de la fiabilité. Les paramètres ont tendance à croître avec le pas d'agrégation.

Ces résultats sont à consolider pour prendre en compte l'impact de la corrélation des données. Nous avons exploré la prise en compte du peloton comme unité d'agrégation pour minimiser la corrélation. Bien que meilleure qu'une prise en compte de l'unité temps uniquement, cette méthode n'aboutit pas à une complète dé-corrélation des données.

Ce phénomène est à étudier plus profondément, d'autant plus que nous avons constaté qu'à cause de la corrélation temporelle, on ne peut pas déduire, à partir de la variance du temps de parcours moyen pour une période d'agrégation donnée, les variances correspondant à d'autres périodes d'agrégation. Le choix de la période d'agrégation influe non seulement sur les paramètres, mais aussi sur la qualité de l'ajustement de la distribution du temps de parcours. Par ailleurs (Nicholson, 2015) a donné une conclusion similaire par rapport à l'agrégation spatiale. Il a montré que l'hypothèse d'indépendance des temps de parcours sur deux tronçons consécutifs n'est pas vérifiée – en période de congestion par exemple les deux temps de parcours seront tous deux plus élevés que leurs moyennes. Aussi, si la moyenne du temps de parcours global reste bien égale à la somme des moyennes, ce n'est le cas ni sur les variances - la variance de la somme n'est pas égale à la somme des variances - ni sur les percentiles. Les distributions des temps de parcours doivent donc être calibrées par itinéraire - les paramètres de la distribution du temps de parcours d'un itinéraire ne peuvent se déduire des paramètres des lois restreintes à chacun des tronçons, même si ces lois de base sont « additives » comme c'est le cas des lois normales, Gamma et Halphen. Il en est de même de la fiabilité du temps de parcours global, non réductible à celles de chaque tronçon. Ceci complique l'analyse de l'impact d'un projet routier sur la fiabilité du temps de parcours, parce que les itinéraires des différents utilisateurs sont différents et ne se réduisent pas aux tronçons traités par le projet.

8. Mes contributions à la recherche sur cette thématique

Mes principales contributions pour la thématique de la fiabilité du temps de parcours seront utilisées pour la compréhension, la mesure et la modélisation de la fiabilité. Ils servent principalement les évaluations a priori et a posteriori de la fiabilité et consistent en :

1. Apport pour la compréhension du phénomène de la fiabilité du temps de parcours. Ceci par la mise en évidence de la différence entre fiabilité et congestion effectuée à travers les évaluations de stratégies de régulation accompagnées d'un exemple simple de monétarisation des coûts de la congestion et de la fiabilité.
2. Apport pour la compréhension du fonctionnement des indicateurs de fiabilité à travers les discussions à partir des exemples d'évaluations a posteriori des stratégies de « contrôle d'accès autoroutier » et de « Gestion dynamique des voies ».
3. Apport méthodologique pour séparer les facteurs exogènes de ceux de la stratégie étudiée, sur la totalité de la distribution, dans une évaluation a posteriori par la méthode observationnelle avant/après. Puis pour décomposer certains indicateurs de fiabilité calculés « après » en trois parties : l'indicateur « avant », l'impact de la stratégie, l'impact des autres changements.
4. Apport pour la comparaison graphique des indicateurs de fiabilité avant /après : ce type de comparaison est à privilégier pour « faire passer » nos calculs et analyses auprès des opérateurs et des utilisateurs finaux.
5. Apport pour le traitement des données par la mise en évidence de l'impact, sur les indicateurs de fiabilité, de l'agrégation et de l'autocorrélation des données.
6. Apports pour la modélisation : confirmation de la pertinence de la loi de Burr pour représenter la distribution du temps de parcours et montrer sa robustesse par rapport aux pas d'agrégation.
7. Apport pour de nouveaux indicateurs, notamment par le développement de l'indice de Gini comme indicateur de régularité pour les transports en commun.

8. Mise en évidence de la puissance de la courbe de Lorenz pour analyser la régularité des lignes des bus. Quand elle est tracée pour les horaires théoriques d'une ligne de bus, la courbe de Lorenz est un bon indicateur de régularité du temps d'attente des usagers. Quand elle est tracée pour le ratio {intervalle réel/intervalle théorique}, elle permet l'analyse de la régularité, que ce soit aux niveaux des arrêts ou de la totalité de la ligne de transport en commun.

9. Perspectives

Chacune des recherches que j'ai menées peut conduire à d'autres questionnements que je ne peux tous explorer ici. Je donne néanmoins ici les perspectives les plus immédiates.

- Pour l'évaluation a posteriori de la fiabilité, depuis mes travaux pionniers dans le domaine, l'évaluation de la fiabilité fait partie aujourd'hui, dans de nombreux cas, des évaluations des projets au même titre que la congestion du trafic ou que la sécurité. La méthodologie que nous avons développée pour évaluer les facteurs exogènes s'applique dans certaines conditions. Nous pouvons imaginer de nouveaux indicateurs plus adaptés à ces évaluations. Aussi, la recherche sur la valeur de la fiabilité et sur les moyens de la monétariser est-elle en plein essor aujourd'hui et le problème continuera à passionner les chercheurs.

- Mes recherches ont montré que le problème d'agrégation des données est important, mais qu'à des pas proches, les résultats ne sont pas très différents. En revanche, pour l'autocorrélation des données, le problème est loin d'être résolu. Comme l'a présenté (Nicholson, 2015) l'hypothèse d'indépendance des temps de parcours sur deux tronçons consécutifs n'est pas vérifiée. Les paramètres de la distribution du temps de parcours d'un itinéraire ne peuvent se déduire des paramètres des lois restreintes à chacun des tronçons, même si ces lois de base sont « additives » comme c'est le cas des lois normales, Gamma et Halphen. Il en est de même de la fiabilité du temps de parcours global, non réductible à celles de chaque tronçon. Ceci complique l'analyse de l'impact d'un projet routier sur la fiabilité du temps de parcours, parce que les itinéraires des différents utilisateurs sont différents et ne se réduisent pas aux tronçons traités par le projet.

J'ai initié récemment une recherche sur la *résilience* des réseaux de transports en commun. Comme le résume très bien la Figure 72, l'étude de la résilience comporte plusieurs étapes. La résilience physique du réseau avec ses différentes composantes: connectivité, accessibilité, assertivité, etc. La recherche dans ces domaines est encore en plein essor : chacune de ces composantes peut à elle seule couvrir un sujet de recherche. Pour l'étude de la résilience, on a aussi besoin de connaître l'état du réseau avant, pendant et après l'incident. Ceci incite à s'intéresser à d'autres sujets comme l'affectation du trafic multimodal, les estimations des origines-destinations et la connaissance de la demande à partir des données billettiques.

La recherche dans le domaine de la résilience, bien que s'intéressant à un incident affectant le réseau, considère souvent un réseau statique. Elle considère trois états du réseau: avant, pendant et après l'incident. Ma problématique de recherche sera d'étudier la résilience pour un réseau complètement dynamique, dans lequel chaque nœud du réseau possède une composante temporelle.

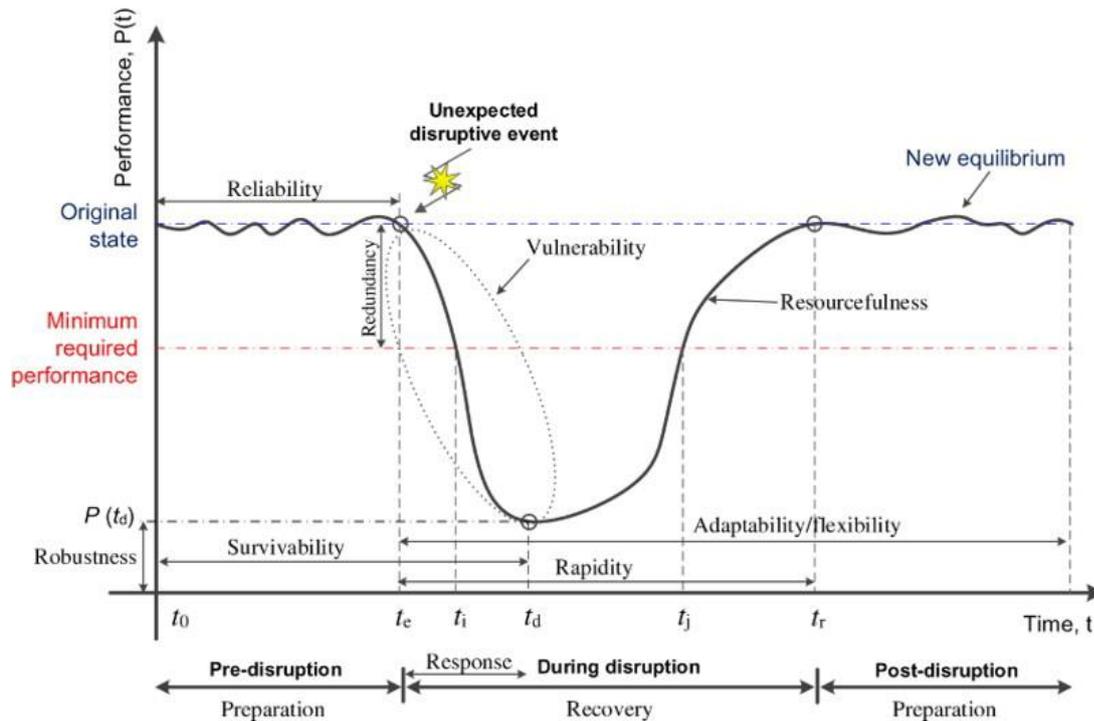


Figure 72 : Différentes étapes pour un système résilient

Enfin, tout un ensemble de facteurs – pollution globale et locale, problèmes sanitaires, insécurité, embouteillages récurrents – convergent vers la nécessité d’un transport collectif toujours plus efficace, en ville en particulier. Je continuerai donc à appliquer mon expertise à l’amélioration du fonctionnement des réseaux de transport en commun. C’est dans cette perspective que je commence la préparation de la phase 2 du projet INDIRA_B.

10. Bibliographie

- [1] Al-Deek, H.& E.B. Emam (2006). New methodology for estimating reliability in transportation networks with degraded link capacities. *Journal of Intelligent Transportation Systems*. 10, 117–129.
- [2] Arezoumandi M. and GH Bham (2011). Travel time reliability estimation: Use of median travel time as measure of central tendency. *Transportation and Development Institute Congress 2011*. pp 59-68.
- [3] Aron, M., Seidowsky, R. and Cohen, S. (2013). Safety impact of using the hard shoulder during congested traffic. The case of a managed lane operation on a French urban motorway. *Transportation Research Part C*, 28, 168-180.
- [4] Bates, J., Polak, J., Jones, P. and Cook, A. (2001). The Valuation of Reliability for Personal Travel. *Transportation Research Part E*, 37, 191–229.
- [5] Carnis L. and Blais, E. (2013). An assessment of the safety effects of the French speed camera program. *Accident Analysis & Prevention*. 51, 301–309.
- [6] Chen, A., Yang, H., Lo, H.K. and Tang, W. (1999). A capacity related reliability for transportation networks. *Journal of Advanced Transportation*, 33 (2), 183–200.
- [7] Chen, C., Skabardonis, A. and Varaiya, P. (2007). Travel-Time Reliability as a Measure of Service. *Transportation Research Record 1855*. Paper No. 03-3456.
- [8] Clark, S. and Watling, D. (2005). Modelling network travel time reliability under stochastic demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 39 (2), 119–140.
- [9] Cohen, S. Princeton, J., Aron, M., Seidowsky, R. and Hounsell, N. (2009). Case Studies Identification and Assessment. Task 2.4: Local Main Road Networks. WP2. In “Review of available case studies and related scientific knowledge” edited by “M. Papageorgiou and I. Papamichail” Nearctis, Deliverable 7, pp134-149. <http://www.nearctis.org/home/resources-desk/deliverables/>.

- [10] Cohen, S., Aron, M. and Seidowsky, R. (2010, July). A cost benefit assessment of a dynamic managed lanes operation. 12th WCTR,– Lisbon, Portugal.
- [11] Coulombel, N. and De Palma, A. (2014). The marginal social cost of travel time variability. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 47 47-60. D'Este, G. and Taylor, M.A.P. (2003 July). Network vulnerability: an approach to reliability analysis at the level of national strategic transport networks. 1st INSTR conference. Japan 23-44.
- [12] R. Delhome, R. Billot, A. Duret, Nour-Eddin El-Faouzi (2015) : Halphen Distribution System, Toolbox for Modeling Travel Time Variability. Article in *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board* September 2015 DOI: 10.3141/2490-04
- [13] Delhome (2016) Modélisation de la variabilité des temps de parcours et son intégration dans des algorithmes de recherche du plus court chemin stochastique. *Infrastructures de transport*. Université de Lyon, 2016. thèse soutenue le 1er décembre 2016 ; version HAL <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01576746> 253 pages soumise le 23 Août 2017
- [14] El Faouzi, N.-E. and M. Maurin (2007). Reliability metrics for Path Travel Time under Lognormal distribution. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Transportation Network Reliability*, Delft, Netherlands.
- [15] FHA, DoT. (2010). Travel time reliability: Making it there on time, all the time. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration. http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm.
- [16] FHWA (2006), Travel time reliability: Making it there on time, all the time. http://www.ops.fhwa.dot.gov/publications/tt_reliability/TTR_Report.htm
- [17] Fosgerea, M. & Karlstrom, A. (2010) The value of reliability. *Transportation Research B*, 44 (1), 38-49.
- [18] Hamer, R., De Jong, G., Kroes, E. (2005). The value of reliability in Transport – Provisional values for the Netherlands based on expert opinion, RAND Technical Report Series, TR-240-AVV, The Netherlands.
- [19] Hauer, E. (1997). *Observational Before-After Studies in Road Safety*. Pergamon/Elsevier Science Inc., Tarrytown, New York.
- [20] Hollander, Y. and Liu, R. (2008) Estimation of the Distribution of Travel Times by Repeated Simulation. *Transportation Research C*, Vol. 16, No. 2, pp. 212-231.
- [21] Kim J. & H. S. Mahmassani (2014). A finite mixture model of vehicle-to-vehicle and day-to-day variability of traffic network travel times *Transportation Research Part C*. Vol. 46, Pages 83-97.
- [22] Kim J. & H. S. Mahmassani (2015). Compound Gamma representation for modeling travel time variability in a traffic network, *Transportation Research Part B : Methodological*, Vol. 80, Pages 40-63.
- [23] Lomax, T., Schrank, D., Turner, S. and Margiotta, R. (2003). *Selecting travel reliability measures*. Texas Transportation Institute, Cambridge systematics, Inc.
- [24] Mahmassani, H.S., T. Hou, J. Dong (2012), Characterizing travel time variability in vehicular traffic networks: deriving a robust relation for reliability analysis. *Transp. Res. Rec.: J. Transp. Res. Board*, 2315 (2012), pp. 141-152, 10.3141/2315-15.
- [25] Mahmassani, H.S. (2011) Incorporating reliability performance measures in planning and operations modelling tools, SHRP2 L04 report, Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington DC.
- [26] Nicholson, A. (2015). Travel time reliability benefits: Allowing for correlation *Research in Transportation Economics* 49. pp14-21
- [27] OECD/ITF (2010), *Improving Reliability on Surface Transport Networks*, OECD Paris.
- [28] Polus, A. (1979). A study of travel time and reliability on arterial routes. *Journal of Transportation*, 8 (2), 141-151. -
- [29] Pu W. (2011). Analytic Relationships Between Travel Time Reliability Measures. *Transportation Research Record*. Volume 2254, pp. 122–130.
- [30] Princeton, J. and Cohen, S. (2011). A priori Assessment of Safety Impacts of Traffic management Operations. Level of Service-Based Approach. *Transportation Research Record*, 2213, 13-19 TRB, National Research Council, Washington DC.
- [31] Rakha H., El-Shawarby, I. Arafah, M. (2010). Trip travel-time reliability: Issues and Proposed solutions. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 14(4) 232-250.
- [32] Richardson et Taylor (1978)
- [33] SETRA (2012). Fiabilité des temps de parcours. Éléments de valorisation économique. Collection « Les rapports » – Sétra. Juin 2012. 30 pages.

- [34] SHRP 2.(2013). Establishing Monitoring Programs for Travel Time Reliability. National Academy of Sciences. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/shrp2/SHRP2prepubL02Report.pdf>
- [35] Sumalee A., Watling D. And Nakayama, S. (2006). Reliable Network Design Problem: Case with Uncertain Demand and Total Travel Time Reliability. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1964, 81-90.
- [36] Susilawati, S., Taylor, M.A.P. & Somenahalli, S.V.C. (2012). Distributions of travel time variability on urban roads. Journal of Advanced Transportation. doi:<http://dx.doi.org/10.1002/atr.192>
- [37] Taylor, M.A.P., Susilawati, 2012. Modelling travel time reliability with the burr distribution. Procedia – Social and Behavioral Sciences 54, 75–83.
- [38] Taylor, M.A.P. (2013). Travel through Time: The Story of Research on Travel Time Reliability. Transportmetrica B: Transport Dynamics, 1 (3), 174-194.
- [39] Tilahun, N.Y., Levinson, D.M. (2010). A Moment of Time: Reliability in Route Choice Using Stated Preference Journal of Intelligent Transportation Systems, 14(3),179-187.
- [40] Tu, H., Li, H., van Lint, J.W.C. and van Zuylen, H.J. (2012). Modeling Travel Time Reliability of Freeways Using Risk Assessment Techniques. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 46 (10), 1528-1540.
- [41] Van Lint, J.W.C., Tu, H. and Van Zuylen, H. J. (2004, July). Travel time reliability on freeways. 10th World Conference on Transport Research. Istanbul,Turkey.
- [42] Van Lint, J.W.C., van Zuylen, H. J. and Tu, H. (2008). Travel Time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story. Transportation Research Part A, 42, 258-277.
- [43] Wakabayashi H. and Y. Matsumoto (2012) Comparative study on travel time reliability indexes for highway users and operators. Volume46, Issue4. Special Issue: Advances in Transportation Analysis. October 2012. Pages 318-339

11. Mes publications pour ce chapitre

- [LB. 1]. **Bhouri, N.**, M. Aron, H. Haj-Salem, A Data Driven Approach For Estimating The Fundamental Diagram. PROMET - Traffic&Transportation (Scopus HI.10), Submitted
- [LB. 2]. **Bhouri, N.**, M. Aron, JP. Lebacque and H. Haj-Salem. Effectiveness of Travel Time Reliability Indicators In the Light of the Assessment of Dynamic Managed Lanes Strategy. Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations. Taylor & Francis. 2017/05/09. Vol, 0 N15 Pages 1-15 <http://dx.doi.org/10.1080/15472450.2017.1327815>. (Impact Factor: 1.565, 2015)
- [LB. 3]. **Bhouri, N.**, M. Aron, G. Scemama, Travel Time Reliability With and Without the Dynamic Use of the Hard Shoulder: Field Test From a French Motorway. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 3, Issue 6, December 2016, Pages 520-530, ISSN 2095-7564. (SCOPUS, HI.17, Impact Factor: 0.33 RG)
- [LB. 4]. **Bhouri N.**, H. Haj-Salem and J. Kauppila, Isolated versus Coordinated Ramp metering: Field Evaluation Results of Travel Time Reliability and Traffic Impact, Transportation Research Part C. Novembre 2011. (JCR IF, 3,075),
- [LB. 5]. **Bhouri N.** and Kauppila, J. "Managing Highways for Better Reliability – Assessing Reliability Benefits of Ramp Metering". Transportation Research Record, Journal of the Transp. Research Board N°2229. Pp1-7. DOI : 10.3141 /2229-01. 2011. (JCR IF, 0.778),
- [LB. 6]. **Bhouri, N.**, Aron, M., Scemama G.; "Gini Index for Evaluating Bus Reliability Performances for Operators and Riders". Transportation Research Board, 95th TRB annual meeting. 10–14, 2016, Washington D.C.
- [LB. 7]. **Bhouri, N.**, Aron, M. Isolating Different Factors Affecting Travel Time Reliability in an Observational Before/After Study, EWGT2014, 2-4 juillet 2014, Sevilla, Spain.
- [LB. 8]. Aron M., **Bhouri N.** and Guessous Y.. "Estimating Travel Time Distribution for Reliability Analysis". Transport Research Arena,14-17 Apr 2014 Paris La Défense (France).
- [LB. 9]. Guessous, Y., Aron, M., **Bhouri, N.**, Cohen, S. (2014). Estimating Travel Time Distribution Under Different Traffic Conditions, EWGT2014, Sevilla, Spain.
- [LB. 10]. **Bhouri, N.**, Aron, M. (2013). Reliability Benefits of Active Traffic Management: A Managed Lanes Case in a French Urban Motorway. Transportation Research Board, 92ndTRB annual meeting paper #13-2531, Washington DC, USA.

- [LB. 11]. **Bhouri, N.**, Aron, M., Chagnaud, V., Papon, F. (2013). Reliability assessment of dynamic use of the hard shoulder field test from a French motorway. 13ème WCTR, Rio de Janeiro, Brésil. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00852724>
- [LB. 12]. **Bhouri N.**, Aron M., Kauppila J. (2012). Relevance of Travel Time Reliability Indicators A Managed Lanes Casez Study. EWGT 2012, 15th meeting of the Euro Working Group on Transportation, Marne-la-Vallée. In Procedia Social and Behavioral Science. Vol 54, 450-459 doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.763 http://www.lvmt.fr/ewgt2012/compendium_97.pdf

Stages encadrés

- [LB. 13]. Amine MELAKHSOU, " Gini Index for headways and travel times regularity measuring", Master 2 Gestion de production et logistique. Université de Lorraine, Metz. 6 mois, 2018.
- [LB. 14]. Wael SAKER, "Regularity indicators for public transport". Master 2 MMMEF (Mathématiques Appliquées à l'Économie et à la Finance) . Université Paris 1 - U.F.R. de Mathématiques et Informatique. 2016
- [LB. 15]. Mouad RAMIL, Analyse de données agrégées de temps de parcours. Stage scientifique, 3 mois, Elève-ingénieur, Ecole des Ponts Paris Tech. 2013.
- [LB. 16]. Younes Guessous, Analyse de données agrégées de temps de parcours. Stage scientifique, 3 mois, Elève-ingénieur, Ecole des Ponts Paris Tech. 2013.

Perspectives

Le changement le plus important touchant aujourd'hui la recherche dans le domaine du trafic concerne, à mon sens, les moyens de mesure et de communication. Pour ce qui est de la mesure, on passe de l'usage des capteurs classiques (boucle électromagnétique, vidéo, ...) permettant l'acquisition des données eulériennes (débit, vitesse, taux d'occupation, ...) à l'utilisation de la détection des véhicules individuels par GPS qui fournit des données lagrangiennes (position, vitesse, ...). Ces données sont massives (Big Data) et donc sources de beaucoup d'informations, qui certes enrichissent la recherche, mais posent la difficulté supplémentaire de devoir en faire un tri pour ne retenir que les plus pertinentes. En ce qui concerne la communication, les véhicules sont aujourd'hui connectés avec des possibilités d'échanges entre véhicules et entre véhicules et infrastructures. Les véhicules autonomes en sont la meilleure illustration. Ceci influe sur toute la chaîne de la collecte des données, à la manière de modéliser et de réguler le trafic et enfin l'évaluation.

Je brosse brièvement ici les impacts de ces changements sur mes thématiques de recherches et donne mes perspectives pour le futur proche

- En ce qui concerne l'estimation de l'état du trafic, la connaissance des vitesses individuelles influe sur la qualité de l'estimation. C'est un facteur enrichissant que nous commençons déjà à inclure dans nos recherches, en premier lieu comme complément d'information pour les données capteurs de type boucles électromagnétiques. Nous envisageons de réaliser par la suite l'estimation de l'état à partir de données exclusivement lagrangiennes.

Pour les transports collectifs, la littérature est riche en méthodes de reconstitution des données manquantes. Nous reprendrons certainement l'une d'entre elles en l'enrichissant grâce à notre expertise dans ce domaine pour filtrer les erreurs et reconstruire les données manquantes nécessaires au bon fonctionnement du cockpit actuellement en développement dans le projet INDIRA_B.

La disponibilité des données Big Data nous permettra d'enrichir nos travaux en matière de prédiction. Ceci servira d'une part pour la prédiction des trajectoires des bus afin d'appréhender les écarts entre trajectoire planifiée et trajectoire réalisée, d'autre part pour prévoir la demande des usagers et la reconstitution des matrices origine-destination.

- Pour la régulation du trafic, systèmes coopératifs et véhicules autonomes modifient la manière de réguler le trafic. Les véhicules autonomes sont déjà une réalité. Dans mes perspectives, il est prévue une expertise pour le compte de Renault, sur l'introduction des Robotaxis en ville (projet en cours de montage).

D'autre part, la part du vélo en ville est devenue importante et l'on peut prévoir également une croissance des engins de mobilité personnelle (catégorie de véhicules destinés à transporter un individu à des vitesses n'excédant normalement pas 25 km/h, qui comprend des skateboards électriques, monocycles auto-équilibrants, des Segways, etc.). Grâce aux nouveaux moyens de mesure et de communication, ces mobiles seront inclus dans les systèmes de régulation multimodale.

- Enfin pour la thématique de la fiabilité et la qualité de service. Comme présenté dans le chapitre du mémoire dédié à cette thématique, l'étude de la fiabilité des systèmes de transport est un phénomène récent. La recherche dans le domaine est en plein essor aujourd'hui, la grande majorité des publications datant du XXI^e siècle et la première conférence dédiée à la question ayant eu lieu en 2001. La fiabilité peut être étudiée de différents points de vue et de différentes manières. On peut

différencier le point de vue de l'utilisateur de celui des opérateurs, la fiabilité physique (du réseau) de la fiabilité temporelle.

J'ai consacré une large partie de mes recherches à l'analyse d'indicateurs existants, au développement de nouveaux indicateurs, à l'évaluation de l'impact des stratégies sur la *fiabilité du temps de parcours*. J'ai initié récemment une recherche sur la *fiabilité physique des réseaux* : connectivité, accessibilité, assertivité, résilience. Résilience statique vs résilience dynamique, etc. L'étude des déterminants de la fiabilité, sa régulation, son coût et son inclusion dans les évaluations des projets, tous ces sujets passionnants occuperont la recherche internationale pour quelques décennies encore. J'apporterai ma contribution à ces recherches.

Enfin, tout un ensemble de facteurs – pollution globale et locale, problèmes sanitaires, insécurité, embouteillages récurrents – converge vers la nécessité d'un transport collectif toujours plus efficace, en ville en particulier. Je continuerai donc à appliquer mon expertise à l'amélioration du fonctionnement des réseaux de transport en commun. C'est dans cette perspective que je commence la préparation de la phase 2 du projet INDIRA_B.

Conclusion

Résumer un parcours professionnel d'une trentaine d'année dans un rapport de recherche est un exercice à la fois difficile et enrichissant :

Lorsque l'on rédige une thèse de doctorat on traite profondément un sujet de recherche qui peut rester référence dans le domaine. Quand on a trente ans de métier derrière soit, même si tous les travaux ont la même finalité, l'amélioration de la circulation dans mon cas, la variété des problématiques étudiées ne peut permettre de traiter chacune dans sa complétude. Synthétiser les résultats dans un rapport, sans pouvoir s'étendre sur les détails qui permettent à d'autres chercheurs de s'y référer est un travail qui m'a semblé à première vue improductif. Je pense en effet, qu'un travail de recherche doit être bien expliqué pour permettre à ses pairs de l'assimiler afin de le compléter et enrichir, de s'en inspirer pour d'autres applications, ou de se différencier en proposant d'autres méthodologies. Je me suis donc souvent posé la question pendant la rédaction de ce rapport, qui va en tirer profit ? Sera-t-il cité dans la littérature ? Je craignais souvent de travailler inutilement ! N'aurait-il pas été suffisant de renvoyer les lecteurs à mes publications ? Je me suis rendu compte au fur et à mesure de la rédaction que je suis la première bénéficiaire de ce rapport. En effet, cette rédaction m'a contrainte de me poser des questions de fond: quelles sont mes contributions à la recherche sur cette thématique ? Consistent-elles en des avancées significatives ? Ai-je suffisamment communiqué mes recherches ? D'autant plus que depuis mes débuts à l'INRETS, les conditions de la recherche et les modes d'évaluation des chercheurs ont changé régulièrement. Mon dossier répond-il alors aux critères d'aujourd'hui ?

En essayant de répondre à ces questions, j'ai pu vérifier que j'ai utilisé des techniques les plus récentes des disciplines de la recherche opérationnelle de l'automatique et du traitement du signal. Pour l'estimation des variables du trafic, nous appliquons des recherches du traitement de signal publiées en 2000. Pour la régulation du trafic urbain multimodal, après la programmation dynamique, j'ai appliqué l'optimisation à base de modèle, la méta-heuristique d'optimisation par essaim particulière, développée en premier en 1995 et nous avons notamment utilisé l'algorithme amélioré publié en 2002. Bien qu'automaticienne de formation, je n'ai pas hésité à investir le domaine des systèmes multi-agents quand je pensais qu'ils étaient mieux adaptés pour résoudre ma problématique. A chaque fois, je suis allée chercher les compétences avec des collaborations au niveau national ou international.

Sur le plan de mon domaine, la régulation du trafic, j'ai traité quatre axes de recherche qui représentent un ensemble cohérent et complet. Se situant à tous les niveaux de la chaîne, dès la collecte des données, passant par le développement de stratégies de régulation aussi bien pour le trafic autoroutier que pour le trafic urbain multimodal et jusqu'à l'évaluation. J'ai des apports méthodologiques, et opérationnels allant jusqu'à l'intégration dans les systèmes de régulation.

J'ai su innover en développant des thématiques de recherche originale, comme par exemple le fait de travailler sur la régulation du trafic urbain multimodal au niveau d'un réseau et non de continuer dans la lignée de la recherche qui introduisait une composante de priorité pour les transports en commun dans les systèmes de gestion du trafic routier. J'ai également su inclure les nouvelles avancées technologiques pour les collectes des données et la communication, en incluant les données individuelles, collectées par GPS, pour l'estimation des variables du trafic ; et les véhicules connectés et leurs héritiers les véhicules autonomes pour la gestion du trafic.

Ces recherches ont été développées soit à l'occasion de projets et de contrats importants (INDIRA_B, LASDIM, DIRIF, TRACKSS, SITP-VP, ARNAR) ; soit de collaborations nationales ou internationales. Je suis partie chercher certaines de ces collaborations, d'autres se sont construites suite à mes participations à des réseaux internationaux (réseau d'excellence NEARCTIS, action COST ARTS TU100 (2012-2015), vice-présidence du Technical committee TC7.4 de l'IFAC pour l'industrie et membre de l'IFAC Industry Committee (CC7).

J'ai un goût particulier pour l'enseignement que j'ai pratiqué à maintes reprises dès mes années d'études à l'ENSET. Et je trouve la formation des jeunes par la recherche plus enrichissante, encore plus quand on a la joie de collaborer avec le jeune que l'on a encadré, devenu collègue par la suite.

Par ailleurs, j'ai une importante activité d'expertise à l'occasion de groupes de travail, comme pour le compte de l'OCDE/ITF ou ITS France, et surtout comme référent d'articles. J'ai à mon actif plus d'une centaine d'articles référés pour plus d'une dizaine de revues internationales et comme membre de comités scientifiques de conférences. C'est un travail ingrat mais nécessaire à la communauté scientifique.

Les manifestations scientifiques sont l'occasion d'allier qualité scientifique et convivialité. J'ai assumé les lourdes tâches d'organiser des événements scientifiques d'ampleur variable. Coordinant les tâches logistiques les plus obscures et les tâches scientifiques de sélection des articles, d'établissement des sessions et de nomination des chairmans ... les discours d'ouverture et de clôture ... jusqu'à la publication des papiers.

Synthétiser tant d'expériences dans ce rapport est un exercice qui n'est certes pas aisé mais qui est vraiment enrichissant notamment pour mieux asseoir les perspectives de ces recherches.

Résumé

Les travaux de recherche, d'enseignement et d'expertise présentés dans ce mémoire de HDR relèvent du domaine de la régulation du trafic. Sur le plan disciplinaire, les techniques développées et mises en œuvre appartiennent aux domaines de l'automatique, de la recherche opérationnelle, de l'informatique et des statistiques.

Dans ce mémoire, je décline mes recherches suivant quatre axes : l'estimation de l'état du trafic, la régulation du trafic autoroutier, la régulation du trafic urbain multimodal, la fiabilité et la qualité de service des réseaux multimodaux.

Estimation de l'état du trafic. Après le filtre de Kalman simple, je travaille aujourd'hui à la mise en œuvre d'un filtre de Kalman "unscented", qui permet une meilleure prise en compte des non-linéarités et des contraintes sur l'état du trafic.

Régulation du trafic autoroutier. Mon apport méthodologique a consisté à développer une commande optimale pour une régulation coordonnée pour des autoroutes de grandes dimensions. J'accompagne aujourd'hui l'implémentation de ce type de commande en temps réel en Île-de-France.

Régulation du trafic urbain multimodal. J'ai contribué au développement de diverses stratégies de régulation sur la base des méthodes Linéaire-Quadratique : commande Prédictive à base de Modèle, commande multi-objectifs et système multi-agents. Je me suis d'abord intéressée à la circulation dans un environnement classique avant de traiter le trafic dans un environnement coopératif, puis en présence de véhicules autonomes.

Thématique de la fiabilité et qualité de service des réseaux multimodaux. Ma contribution, en premier lieu, concerne la définition et la connaissance de la fiabilité du temps de parcours, notion relativement nouvelle dans les évaluations des projets. J'ai analysé et discuté la pertinence des différents indicateurs développés pour sa mesure.

J'ai développé, en second lieu, des recherches méthodologiques avec trois contributions majeures. La première concerne la méthodologie mise au point pour l'évaluation ex-post de la fiabilité par la méthode de comparaison avant-après, généralisée pour tenir compte des distributions qui interviennent dans la fiabilité. La deuxième concerne la modélisation de la distribution du temps de parcours et l'impact des agrégations sur celle-ci. Enfin, la troisième contribution concerne le développement de l'indice de Gini et une méthodologie permettant l'usage de la courbe de Lorenz pour analyser la régularité des lignes de transports en commun.

Les perspectives que je donne dès à présent à mes recherches portent, d'une part, sur l'intégration de nouveaux types de données au sein de ces méthodes (données GPS et Big Data) et d'autre part, sur la résilience dynamique dans les réseaux de transports.