

# Journée du laboratoire Heudiasyc 2021



**10 septembre 2021**

*Centre de Transfert de l'UTC, Compiègne*



Compte tenu de la crise sanitaire Covid-19, la journée du laboratoire se réalisera ce mois de septembre 2021 sous une forme similaire à celle de septembre 2020 sur le campus de l'UTC. Nous tenons encore à remercier l'UTC qui a accepté qu'elle se tienne en présentiel dans un amphithéâtre avec un protocole sanitaire adapté que nous respecterons rigoureusement malgré les contraintes.

Cette année encore la journée du laboratoire est centrée sur le travail des doctorants. Comme ils sont au cœur de nos divers projets scientifiques, le panorama offert par leurs travaux reflète l'essentiel de notre activité de recherche. Cependant, cette édition proposera plusieurs innovations comme des quiz, des ateliers sur des sujets généraux et d'actualité au laboratoire et des visites des plateformes.

Depuis la mise en place des comités de suivi individuel des doctorants, cette journée a principalement des objectifs de communication et d'échanges scientifiques, au travers des exposés et des interactions qui auront lieu lors des différentes sessions. Il s'agit de montrer à nos collègues, nos partenaires, ainsi qu'à nos tutelles, les voies sur lesquelles nous sommes engagés, et aussi d'avoir une vue synthétique des orientations prises par l'ensemble des équipes du laboratoire. Cette communication scientifique participe à l'esprit du laboratoire.

Ce document recense l'ensemble des thèses en cours au sein de l'unité avec des descriptions des travaux de tous les doctorants de l'unité.

La recherche technologique mobilise de nombreuses compétences. Nous souhaitons que cette journée soit riche d'échanges scientifiques et qu'elle participe à créer de nouvelles dynamiques de collaboration interne, que ce soit au sein des équipes ou entre celles-ci. Nous espérons également qu'elle participera au renforcement de l'esprit de laboratoire qui nous anime, et qu'elle continuera à être un rendez-vous annuel essentiel et apprécié de tous dans la vie du laboratoire.

Philippe Bonnifait  
Directeur

Yves Grandvalet  
Directeur adjoint

## Journée du laboratoire Heudiasyc 2021

10 Septembre 2021, Centre du transfert de l'UTC

### Programme de la journée :

#### Session1

- 8h30-8h50 Accueil des participants
- 8h50-9h00 Ouverture de la journée par Philippe Bonnifait, directeur du laboratoire
- 9h00-9h15 Mot d'accueil par Christophe Guy, directeur de l'UTC
- 9h15-9h45 Présentations courtes des doctorants 1<sup>ère</sup> année
- 9h45-10h15 **1<sup>ère</sup> Session Labo : Bilan carbone**
- 10h15-10h25 Quizz1 : Bilan carbone
- 10h25- 10h40 Pause

#### Session 2

##### Présentations de doctorants première partie

- 10h40-10h50 Génération modulaire de comportements variables, explicables et représentatifs d'une équipe virtuelle en situation de crise, Tristan DE BLAUWE, CID.
- 10h50-11h Algorithmique répartie des réseaux dynamiques de véhicules, Guillaume BEDUNEAU, SCOP.
- 11h-11h10 Human-machine cooperative control: transition management between manual/auto mode for the semi-autonomous vehicle, Ali HAMDAN, SYRI.
- 11h10-11h20 Evidential lymphoma segmentation for 3D PET/CT images, HUANG Ling, CID.
- 11h20-11h30 Learning Resources Recommender System for Teachers, Nader NASHED NACHAT, CID.
- 11h30-11h40 **2<sup>ème</sup> Session Labo : Parité homme-femme**
- 11h40-11h50 Quizz2 : Parité homme-femme
- 11h50-12h Remise du prix Halathon
- 12h-12h10 Prise photo du laboratoire
- 12h10-13h30 Déjeuner



## Session 3

### Présentations de doctorants deuxième partie

13h30-13h40 Integrity of Cooperative Perception for Autonomous Navigation, Antoine LIMA, SYRI.

13h40-13h50 Recommendation of Pedagogical Resources within a System of Information Systems, Tang QING, CID.

13h50-14h00 Contrôle de scénario en environnement virtuel interactif, Romain GOUTIERE, CID.

14h00-14h10 Selective vehicle routing problems in cooperative wildfire response operations, Quentin PENA, SCOP.

14h10-15h10 **3<sup>ème</sup> Session Labo : Horizon Europe**

15h10-15h25 Pause

## Session 4

### Présentations de doctorants troisième partie

15h25-15h35 State Observers Study and Development Based on Environmental Perception and Machine Learning Techniques, Bernardo MURTA, SYRI.

15h35-15h45 Contrôle adaptatif par optimisation distribuée dans le contexte des véhicules connectés, Mathieu RANDON, CID.

15h45-15h55 Génération de sillons optimisés dans un environnement ferroviaire complexe, Guillaume JOUBERT, SCOP.

15h55-16h05 Validation de retours multimodaux pour le cockpit multi-sensoriel en environnement virtuel immersif dans le cas de l'inattention du conducteur, Baptiste WOJTKOWSKI, SYRI.

16h05-16h15 Génération de scénario d'entraînement au stress en situation de crise en environnement virtuel, Luca PELISSERO WITOSLAWSKI, CID.

16h15-17h15 **Visites des plateformes du laboratoire**

## Masque obligatoire à l'intérieur du bâtiment

**COVID-19** Il existe des gestes simples pour vous protéger et protéger votre entourage



Se laver les  
mains très  
régulièrement



Tousser ou  
éternuer dans  
son coude  
ou dans un  
mouchoir



Utiliser des  
mouchoirs à  
usage unique



Saluer sans  
se serrer  
la main,  
éviter les  
embrassades



## TYPE DE FINANCEMENT

NOM ET PRENOM	FINANCEMENT
ABID Khaled	MESR/Labex MS2T
ADAM Loïc	ANR Preserv
AKTOUCHE Sadek Rayan	Railenium
ALATORRE Armando	MESR/Bourse gouvernement mexicain
BEDUNEAU Guillaume	Labex MS2T/DGA
BELLINGARD Kevin	CIFRE - SHERPA ENGINEERING
BENHAMAID Sana	Bourse d'excellence du gouvernement algérien
BIALLACH Hanane	Orange
BOUCAUD Fabien	ANR – projet Social Touch
BREBION Vincent	Région Hauts-de-France/ Laboratoire commun SIVALab
CAMARDA Federico	CIFRE - Renault
CHAVEROCHE Maxime	Labex MS2T / Région Hauts-de-France
DE BLAUWE Tristan	DGA
DUHAUTBOUT Thibaud	CIFRE - PSA
ESCOURROU Maxime	Labex MS2T / Région Hauts-de-France
FRISCH Gabriel	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR
GOUTIERE Romain	DGA
HAMDAN Ali	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR
HUANG Ling	Gouvernement chinois - China Scholarship Council (CSC)
JOUBERT Guillaume	CIFRE - SNCF
LIMA Antoine	Laboratoire commun SIVALab
LOUHICHI Rim	ANR - Projet MAPSYD
MAHAMAT Michaël	Sorbonne Université (MSTD)
MESSOUDI Soundouss	Fondation UTC
MEZOUARI Lahcene	Projet ANR OILH
MURATI Erisa	CIFRE - SUEZ
MURTA Bernardo	Bourse gouvernement brésilien
NASHED NASHAT Nader	Université française d'Egypte
OUBERKOUK Mohamed Amine	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR
PELISSERO-WITOSLAWSKI Luca	FEDER/Labex MS2T
PENA Quentin	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR

POUSSEUR Hugo	Université de Technologie de Compiègne
RANDON Mathieu	CIFRE - Renault
SAID Abdallah	Co-tutelle avec le Liban – Bourse gouvernement libanais / MESR
SAIDI Lyes	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR
SANCHEZ Corentin	Laboratoire commun SIVALab
TANG Qing	Gouvernement chinois - China Scholarship Council (CSC)
TONG Zheng	Gouvernement chinois - China Scholarship Council (CSC)
VIOT Augustin	CIFRE PSA
WANG Chenghao	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR
WILLOT Héoïk	Sorbonne Université (SCAI)
WOJTKOWSKI Baptiste	FEDER/Fondation UTC
ZHANG Haifei	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche - MESR

#### Doctorants co-encadrés par Heudiasyc, inscrits dans un autre laboratoire

NOM ET PRENOM	FINANCEMENT
BARROS GARCIA Isabel	Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche – MESR (laboratoire ROBERVAL )
BENCHEKROUN Mouna	Contrat doctoral «Détection en temps réel du stress et sa maîtrise à travers des jeux sérieux» (BMBI)
CARA Filippo	CIFRE - PLASTIC OMNIUM AUTO INERGY DIVISION ALPHATECH
REANEY Olivia	COSTECH financement Région/Labex MS2T

\*FEDER : Fonds européen de développement économique régional

## INDEX ALPHABETIQUE DES AUTEURS PAR EQUIPE

NOM ET PRENOM	PAGE	TITRE
<b>EQUIPE CID</b>		
ADAM Loïc	1	Apprentissage de préférences sous incertitude sévère
DE BLAUWE Tristan	3	Génération modulaire de comportements variables, explicables et représentatifs d'une équipe virtuelle en situation de crise
FRISCH Gabriel	5	Co-clustering for fair recommendation
GOUTIERE Romain	7	Contrôle de scénario en environnement virtuel interactif
HUANG Ling	9	Evidential lymphoma segmentation of 3D PET/CT images
MESSOUDI Soundouss	11	Improving real estate management with data science
NASHED NASHAT Nader	13	Learning Resources Recommender System for Teachers
PELLISERO WITOSLAWSKI Luca	15	Génération de scénario d'entraînement au stress en situation de crise en environnement virtuel
RANDON Mathieu	17	Contrôle adaptatif par optimisation distribuée dans le contexte des véhicules connectés
TONG Zheng	19	Fusion of evidential CNN classifiers for image classification
WILLOT Hénoïk	21	Éthique et sincérité des systèmes d'aide à la décision
ZHANG Haifei	23	A cautious and explainable classifier
<b>EQUIPE SCOP</b>		
ABID Khaled	26	Robust and Secure Communication Time Allocation Models for the Scalable Internet of Things: Application to Smart Cities and Mobility
AKTOUCHE Sadek Rayan	28	A joint approach combining Safety and Security in Railway teleoperation
BEDUNEAU Guillaume	30	Algorithmique répartie des réseaux dynamiques de véhicules
BENHAMAID Sana	32	Cloud-IoT For Smart Cities
BIALLACH Hanane	34	VNF reconfiguration and dynamic management of 5G network slices
JOUBERT Guillaume	36	Génération de sillons optimisés dans un environnement ferroviaire complexe
LOUHICHI Rim	38	Elaboration of an economic model for decision aid optimizing the maintenance strategy of transport systems
MAHAMAT Michaël	40	Energy-Efficient, Robust and Secure Models for Large-Scale Internet of Things
MEZOUARI Lahcene	42	Planification de ressources et ordonnancement de tâches dans la chaîne inter et intra logistique hospitalière
OUBERKOUK Mohamed Amine	44	Modélisation et conception d'algorithmes pour la planification d'emplois du temps, CRONOS
PENA Quentin	46	Selective vehicle routing problems in cooperative wildfire response operations
VIOT Auguste	48	Sûreté de fonctionnement pour les mécanismes déclaratifs, en particulier réseaux de neurones, dans la prise de décision des véhicules autonomes
WANG Chenghao	50	Contribution to robust network optimization



EQUIPE SyRI		
ALATORRE Armando	53	Landing of a fixed wing unmanned aerial vehicle in a limited area
BELLINGARD Kévin	55	Prise de décision sûre et robuste pour les véhicules autonomes en milieu urbain hautement dynamique et contraint
BOUCAUD Fabien	57	Quand et Comment Toucher un Humain ? Un Modèle de Décision pour un Agent Touchant
BREBION Vincent	59	Multimodal perception of vulnerable road users for autonomous driving in urban environments
CAMARDA Federico	61	Multi-Sensor Data Fusion for Lane Detection applied to autonomous vehicle
DUHAUTBOUT Thibaud	63	Planification de trajectoire pour véhicule autonome en milieu urbain
ESOURROU Maxime	65	Localisation coopérative de véhicules autonomes aidée par carte avec étude d'intégrité
HAMDAN Ali	67	Human-machine cooperative control: transition management between manual/auto mode for the semi-autonomous vehicle
LIMA Antoine	69	Integrity of Cooperative Perception for Autonomous Navigation
MURTA Bernardo	71	State Observers Study and Development Based on Environmental Perception and Machine Learning Techniques
POUSSEUR Hugo	73	Shared navigation in a cybernetic multi-agent autonomous system
SAID Abdallah	75	Trajectory planning and control in the context of autonomous multi-vehicle cooperative maneuvers
SAIDI Lyes	77	Robust and Safe Control Architecture for Distributed Multi-Vehicle Systems Under Dynamic Constraints
SANCHEZ Corentin	79	World Model for intelligent autonomous vehicles
WOJTKOWSKI Baptiste	81	Validation de retours multimodaux pour le cockpit multi-sensoriel en environnement virtuel immersive dans le cas de l'inattention du conducteur

EQUIPE CID

# Apprentissage de préférences sous incertitude sévère

Loïc ADAM

Directeurs de thèse : Sébastien DESTERCKE

Équipe : CID

**Résumé**—Identifier les préférences d’une agente à partir d’une élicitation est une part centrale de l’aide à la décision multicritère (MCDA) ou de l’apprentissage de préférences. Un premier objectif de cette thèse financée par l’ANR est de proposer une approche d’élicitation performante permettant de gérer l’incertitude. Nous introduisons une approche basée sur la théorie des possibilités qui permet de détecter les erreurs de la part de l’agente ou de modèle.

## I. INTRODUCTION

Un problème classique en décision multicritère est celui du choix : une agente veut choisir la meilleure alternative parmi une sélection et chaque alternative est caractérisée par plusieurs critères (saveur, prix...). L’élicitation de préférences permet d’identifier les préférences de l’agente, et donc de choisir la meilleure alternative. L’élicitation incrémentale est intéressante, car les informations déjà obtenues sont prises en compte [1]. Dans ce cadre, l’approche robuste, basée sur l’optimisation d’un regret (Minimax) [2], [3], apporte des garanties très fortes de performance. Néanmoins, elle suppose que l’agente ne commet jamais de faute, et que l’analyste a choisi la bonne famille de modèles d’agrégation de préférences, suppositions toutes deux très fortes.

Notre objectif est de garder les garanties fortes de l’approche robuste, tout en relaxant les deux conditions. Nous proposons d’étendre l’approche robuste en utilisant la théorie des possibilités. L’approche robuste devient alors un cas particulier de notre approche possibiliste. La théorie des possibilités permet de naturellement représenter l’inconsistance [4], rendant possible la détection de réponses contradictoires, ainsi que d’erreurs de modèle. De plus, notre approche est plus simple à comprendre et moins computationnellement complexe qu’une approche basée sur les fonctions de croyance [5].

## II. ÉLICITATION POSSIBILISTE DE PRÉFÉRENCES

### A. Principe

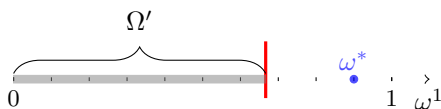


Fig. 1. Une mauvaise réponse emmène vers un mauvais modèle

L’objectif est d’identifier l’espace  $\Omega'$  des modèles possibles, où le modèle optimal  $\omega^*$  est supposé être, à partir des réponses de l’agente. À chaque étape, l’agente indique sa préférence entre deux alternatives et on obtient un nouvel espace  $\Omega'$  inclus dans le précédent. Néanmoins, si l’agente donne une mauvaise

réponse, l’élicitation continuera dans le mauvais sous-espace, s’éloignant de  $\omega^*$  comme indiqué sur la Figure 1.

Dans notre approche, nous autorisons à l’agente d’indiquer à chaque étape qu’elle n’est pas certaine de sa réponse avec un niveau de confiance  $\alpha \in [0, 1]$ , 1 exprimant la certitude et 0 l’incertitude totale. Par exemple sur la Figure 2, nous supposons que l’agente se trompe tout en indiquant un niveau de confiance  $\alpha = 0.7$ . Dès lors, la possibilité de  $\Omega'$  est de 1, car aucune information n’indique que le modèle optimal devrait être ailleurs. Par contre, la possibilité de l’autre espace n’est pas nulle, car l’agente a indiqué qu’elle n’était pas certaine que  $\omega^*$  soit dans  $\Omega'$ . Par conséquent, il demeure toujours possible de trouver  $\omega^*$ .

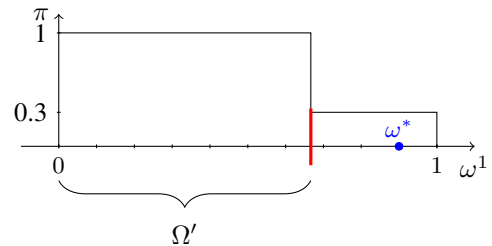


Fig. 2. Information possibiliste

Avec notre approche, il est facile de mesurer l’inconsistance. Nous reprenons le cas présenté sur la Figure 2, mais nous supposons que l’agente réponde à une nouvelle question en indiquant un niveau de confiance  $\alpha = 0.8$ , tout en contredisant sa précédente réponse. Avec les outils de fusion d’information proposés avec la théorie des possibilités, nous obtenons une nouvelle fonction de possibilité présentée sur la Figure 3. Nous voyons que le maximum de la fonction n’est plus 1, mais 0.3. L’inconsistance est la différence entre le maximum théorique de la fonction (normalisé à 1 en général) et le maximum observé. Nous obtenons alors un degré d’inconsistance  $K = 1 - 0.3 = 0.7$ .

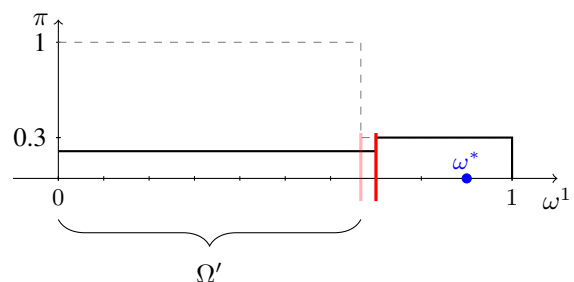


Fig. 3. Inconsistance



## B. Expériences

Nous avons testé notre approche possibiliste sur des données synthétiques pour étudier son comportement et pour démontrer qu'elle résout les problèmes apportés par l'approche robuste. Pour chaque expérience, nous avons conduit 200 simulations et les résultats sont alors moyennés. Pour chaque simulation, nous avons généré aléatoirement 30 alternatives avec 4 critères où chaque critère prend valeur dans  $[0, 1]$  selon une loi uniforme.

a) *Gestion de l'inconsistance*: l'agente répond correctement aux questions 70% du temps, et aléatoirement sinon. L'agente donne à chaque fois avec sa réponse un niveau de confiance fixé. Le modèle d'agrégation est une somme pondérée générée aléatoirement selon une loi de Dirichlet. L'élicitation s'arrête notamment quand de l'inconsistance est détectée. Nous pouvons voir sur la figure 4 que notre approche permet de stabiliser le regret réel en détectant l'inconsistance. Avec une approche robuste ( $\alpha = 1$ ), l'inconsistance n'est jamais détectée et le regret réel augmente (mauvais espace de recherche). Avec une approche possibiliste, l'élicitation s'arrête avant qu'on ne s'éloigne trop du modèle optimal, expliquant la stabilisation du regret réel.

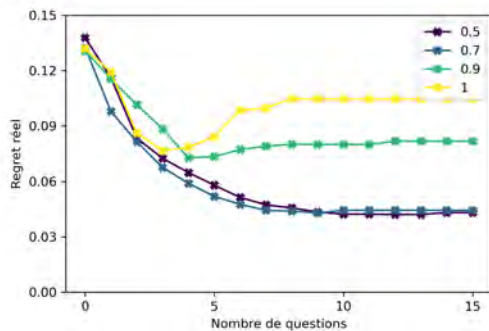


Fig. 4. Regret réel pour différents  $\alpha$

b) *Détection d'un mauvais modèle*: le modèle optimal est présumé être une somme pondérée, alors qu'en réalité l'agente suit un autre modèle. Dans un premier cas, elle répond toujours aléatoirement. Dans un deuxième et un troisième cas, elle suit une moyenne par poids ordonnés (OWA), un modèle différent de la somme pondérée où les critères sont ordonnés par valeur croissante. Les modèles OWA sont générés par des lois de Dirichlet. Nous pouvons voir sur la figure 5 que notre approche permet de détecter un mauvais modèle. Plus particulièrement, les modèles très éloignés du modèle supposé (comme le modèle aléatoire) sont très rapidement détectés. L'OWA équitable (pénalisant les alternatives qui ne sont pas équilibrées) est notamment plus éloignée que l'OWA aléatoire (proche d'une moyenne pondérée) du modèle initial.

## III. CONCLUSION ET FUTURS TRAVAUX

Nous avons proposé une extension possibiliste de l'approche robuste pour l'élicitation incrémentale de préférences, tout en montrant que cette nouvelle approche permet de résoudre

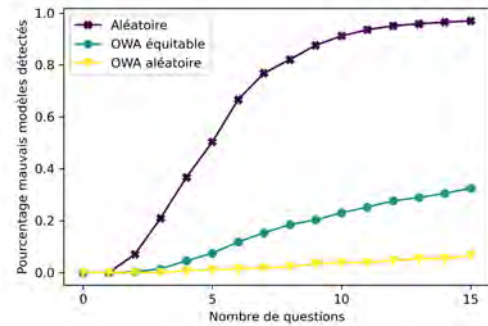


Fig. 5. Détection mauvais modèle,  $\alpha = 0.7$

les limitations de l'approche robuste tout en restant consistant avec celle-ci. Les expériences sur des données simulées montrent que notre approche rend possible la détection d'erreurs et d'obtenir de meilleures performances qu'avec l'approche robuste.

Nos futurs travaux portent sur les sujets suivants :

- Réparer l'inconsistance observée, soit en supprimant des informations, soit en choisissant une autre famille de modèles. C'est l'objectif principal de ma thèse et nécessite un long travail d'étude bibliographique.
- Utiliser un autre critère pour choisir une alternative. Nous avons déjà exploré cette piste, en choisissant de maximiser le gain dans le meilleur scénario (à la place du regret Minimax). Chaque critère permet de converger vers le modèle optimal, mais plus ou moins rapidement selon le type d'alternative ou de modèle.
- Étendre l'approche à d'autres modèles ayant des structures très différentes, comme les modèles lexicographiques. Ces modèles ne sont pas numériques et nécessitent d'adapter les notions de regret ou de choisir une notion différente.

## REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du support financier du projet PreServe ANR-18-CE23-0008 et de l'agence nationale de la recherche.

## RÉFÉRENCES

- [1] N. Benabbou, P. Perny, and P. Viappiani, "Incremental elicitation of choquet capacities for multicriteria choice, ranking and sorting problems," *Artificial Intelligence*, vol. 246, pp. 152–180, 2017.
- [2] C. Boutilier, "Computational decision support : Regret-based models for optimization and preference elicitation," *Comparative Decision Making : Analysis and Support Across Disciplines and Applications*, pp. 423–453, 2013.
- [3] N. Bourdache and P. Perny, "Anytime algorithms for adaptive robust optimization with owa and wowa," in *International Conference on Algorithmic Decision Theory*. Springer, 2017, pp. 93–107.
- [4] D. Dubois and H. Prade, "Possibility theory and data fusion in poorly informed environments," *Control Engineering Practice*, vol. 2, no. 5, pp. 811–823, 1994.
- [5] P.-L. Guillot and S. Destercke, "Preference elicitation with uncertainty : Extending regret based methods with belief functions," in *International Conference on Scalable Uncertainty Management*. Springer, 2019, pp. 289–309.

# Génération modulaire de comportements variables, explicables et représentatifs d'une équipe virtuelle en situation de crise

Tristan DE BLAUWE

Directeurs de thèse : Domitile LOURDEAUX (Heudiasyc), Nicolas SABOURET (LISN)

Équipe : CID

**Résumé**—Nous souhaitons générer des comportements humains explicables et représentatifs d'un métier. L'opérationnalisation de comportements dans des architectures existantes est une tâche complexe, à répéter selon les besoins. Nous proposons un modèle computationnel pour généraliser cette étape avec une indépendance entre les modèles cognitifs et le modèle d'agent. Nous l'appliquons à la sélection de tâches d'un modèle existant, grâce à un graphe d'influences et de préférences.

## I. INTRODUCTION

Cette thèse a débutée le 6 janvier 2020 au laboratoire Heudiasyc de l'Université de technologie de Compiègne, en co-direction avec LISN de l'université Paris Saclay. Le projet est financé par le projet ORCHESTRAA DGA RAPID.

Les Personnages Virtuels Autonomes, ou PVAS, sont des agents informatiques évoluant au sein d'un environnement virtuel (EV). Ils interagissent avec les éléments de cet environnement, qu'il s'agisse d'artefacts, de PVAS, ou bien d'un utilisateur humain comme l'apprenant. Ils sont notamment utilisés dans un contexte de formation professionnelle [1]. Le fonctionnement d'un PVA est défini par un modèle d'agent. Classiquement, le cycle d'un agent consiste à percevoir son environnement, puis, selon son modèle de raisonnement, d'agir en conséquence [2].

On appelle *processus* l'ensemble des mécanismes de traitements de l'information, de la perception à la prise de décision d'action. Notre objectif dans cette thèse est de modéliser différents *comportements* qui impactent ces processus. Par exemple, un comportement de stress pourrait impacter le processus de perception en filtrant les informations visuelles sans rapport avec la tâche en cours (on parle de tunnelisation). La difficulté de notre travail est de proposer un modèle suffisamment général, reliant les comportements et les processus de l'agent pour pouvoir être appliqué dans différents contextes et avec différents modèles cognitifs d'agent (i.e. différents processus de perception et de prise de décision).

Remarque : dans cette thèse, nous n'abordons pas l'expression des comportements à travers des gestes ou le visage des agents virtuels [3], mais uniquement leurs impacts sur les processus cognitifs.

Nous considérons des simulations mettant en scène des situations de crises. Les PVAS jouent des opérateurs-métier et forment une équipe avec un apprenant avec lequel ils interagissent. Les comportements des PVAS doivent être représentatifs de ceux observés sur le terrain. Nous nous intéressons

notamment à opérationnaliser des comportements flexibles et adaptatifs.

Un premier besoin est de décrire l'activité du métier, en y incorporant la variabilité comportementale. Plusieurs approches sont envisageables, mais nous retenons ACTIVITY-DL [1], un modèle d'activité conçu dans ce but. Son expressivité permet à la fois de représenter la variabilité de la procédure, mais aussi d'y intégrer des éléments pour assister la génération de comportements humains.

Un deuxième besoin est de générer, à partir ce modèle, des comportements variables humains explicables. En effet, pour un même contexte, le comportement varie d'un agent à un autre, selon son profil, mais aussi selon son évaluation de la situation [4]. Nous nous sommes orientés vers les travaux des modèles issus des Sciences Humaines et Sociales (SHS), comme les modèles de travail collectif en situation de crise [5]. Un modèle cognitif regroupe un ensemble de processus. L'opérationnaliser consiste à ce que l'agent exhibe les comportements induits par le modèle, en les implémentant au sein du modèle d'agent.

Enfin, il est question d'incorporer ces éléments pour les mettre en oeuvre informatiquement. La variété des comportements humains à rendre compte et le dynamisme des interactions nous éloignent des approches scriptées. Une approche envisageable consisterait à partir d'architectures cognitives, comme SOAR [6] ou d'architectures BDI, comme BEN [7]. Quelque soit l'approche envisagée, opérationnaliser de nouveaux comportements nécessite d'adapter l'architecture et les divers processus impactés. C'est une tâche complexe que nous aimerions rendre modulaire. Pour la sélection d'action par exemple, au lieu de réviser le calcul de priorité à chaque ajout/suppression de comportements, il serait préférable que les comportements soient automatiquement pris en compte sans modification de notre part.

Dès lors, comment généraliser l'opérationnalisation de comportements et que leurs impacts restent intelligibles ? En effet, si pour une même situation, deux PVAS agissent différemment, nous souhaitons pouvoir identifier explicitement quels comportements leurs sont attribués.

Notre contribution est divisible en trois sous-parties :

- 1) Un modèle computationnel pour généraliser l'opérationnalisation de comportements au sein d'un processus grâce à des stratégies.

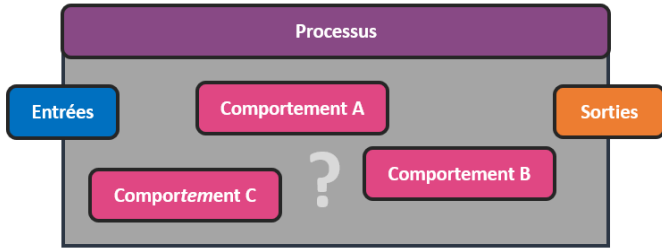


Fig. 1. Schématisation d'un processus. La stratégie pour prendre en compte plusieurs comportements dépend du processus.

- 2) Une stratégie de choix par graphe d'influences et de préférences.
- 3) L'application de ce modèle pour générer des comportements représentatifs, explicables, flexibles et adaptatifs d'une équipe virtuelle en situation de crise.

## II. CONTRIBUTIONS

Le modèle computationnel définit le fonctionnement d'un agent par un ensemble de processus qui s'enchaînent. L'enchaînement et les processus sont à définir selon les besoins et l'application. Une première contribution est de normaliser la définition d'un processus, schématisé par la figure 1, pour combiner différents processus quels que soient les modèles dont ils sont issus. Un processus est une fonction avec des entrées et des sorties quelconques. Le processus est caractérisé par un ensemble de comportements  $C$  et une stratégie qui définit comment prendre en compte  $C$ . La définition d'un comportement est donc dépendante de la stratégie. Nous pouvons identifier qu'un comportement possède, à minima, les entrées du processus qu'il affecte. Le fonctionnement et la sortie du comportement dépendent de la stratégie adoptée par le processus.

Une application de ce modèle est d'adapter une architecture existante [1] pour généraliser l'opérationnalisation de comportements au sein du processus de sélection de tâches, grâce à une stratégie dite de "choix par graphe d'influences", illustrée par la figure 2. Le processus prend en entrée un ensemble de tâches candidates  $T$  et retourne une tâche sélectionnée  $t \in T$ . Le graphe d'influence est un graphe biparti avec, dans ce contexte, des comportements qui indiquent quelles tâches leurs conviennent ou pas, symbolisées par des influences positives ou négatives. Le score d'une tâche correspond à la somme des influences positives (+1) et négatives (-1). La tâche avec le score le plus élevé indique celle qui satisfait le plus les comportements. Elle est donc sélectionnée (en vert sur le graphe 2) et correspond à la sortie du processus.

L'utilisation d'un graphe d'influences est justifiée par son intelligibilité et sa modularité. En effet, nous pouvons retracer quels comportements sont responsables de la sélection. De plus, nous pouvons ajouter d'autres comportements, sans avoir à modifier les comportements existants et le processus impacté.

Toutefois, à lui seul, il n'est pas suffisant pour décrire certains comportements. C'est pourquoi nous proposons en plus de le coupler avec un graphe de préférences. Ce graphe nous permet d'affiner le choix du comportement à adopter

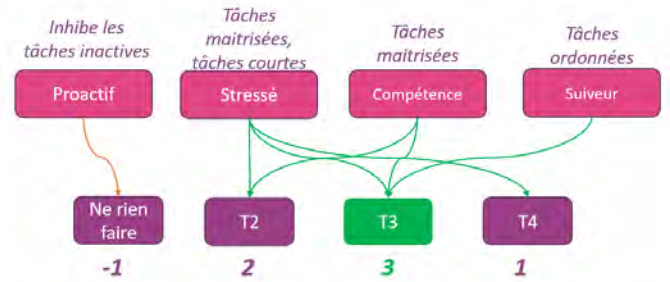


Fig. 2. Schéma de la stratégie "choix par graphe d'influences". Dans cet exemple, la tâche T3 a le score maximal. Elle est donc celle sélectionnée.

si il y a une indécision. Le principe du graphe de préférences est d'ordonner les comportements, soit selon une justification issue d'un modèle cognitif : "en situation de stress intense, une réduction de la communication est observée.", soit selon ce que le scénario pédagogique préfère. La combinaison de ces deux graphes améliore l'expressivité de la stratégie, ce qui nous permet au final d'opérationnaliser plus finement des comportements.

## III. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Nous proposons un modèle computationnel pour généraliser l'opérationnalisation de comportements au sein d'un modèle d'agent. Selon le processus impacté, plusieurs stratégies sont envisageables. Dans le cas de la sélection de tâches, nous proposons d'utiliser des graphes d'influences et de préférences. Les tâches suivantes sont de coupler cette approche avec un modèle d'activité, afin de générer des comportements flexibles et adaptatifs, qui soient explicables et représentatifs d'une équipe virtuelle en situation de crise.

## RÉFÉRENCES

- [1] L. Huguet, D. Lourdeaux, and N. Sabouret, "Moteur de sélection de tâches pour des personnages virtuels autonomes non omniscients," in *Workshop affects, compagnons artificiels et interaction (WACAI 2018)*, Porquerolles, France, Jun. 2018, tex.hal\_id : hal-01833462 tex.hal\_local\_reference : 8 tex.hal\_version : v1. [Online]. Available : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01833462>
- [2] B. Parasumanna Gokulan and D. Srinivasan, "An Introduction to Multi-Agent Systems," in *Studies in Computational Intelligence*, Jul. 2010, vol. 310, pp. 1–27, journal Abbreviation : Studies in Computational Intelligence.
- [3] E. de Sevin, R. Niewiadomski, E. Bevacqua, A.-M. Pez, M. Mancini, and C. Pelachaud, "Greta, une plateforme d'agent conversationnel expressif et interactif," *Techniques et sciences informatiques*, vol. 29, no. 7, pp. 751–776, Sep. 2010. [Online]. Available : <http://tsi.revuesonline.com/article.jsp?articleId=15132>
- [4] C. Faur, "Approche computationnelle du regulatory focus pour des agents interactifs : un pas vers une personnalité artificielle," These de doctorat, Université Paris-Saclay (ComUE), Oct. 2016. [Online]. Available : <https://www.theses.fr/2016SACLS352>
- [5] T. Driskell, E. Salas, and J. E. Driskell, "Teams in extreme environments : Alterations in team development and teamwork," *Human Resource Management Review*, vol. 28, no. 4, pp. 434–449, Dec. 2018. [Online]. Available : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1053482217300025>
- [6] J. E. Laird, A. Newell, and P. S. Rosenbloom, "SOAR : An architecture for general intelligence." STANFORD UNIV CA DEPT OF COMPUTER SCIENCE, Tech. Rep., 1986.
- [7] M. Bourgeois, "Vers des agents cognitifs, affectifs et sociaux dans la simulation," phdthesis, Normandie Université, Nov. 2018. [Online]. Available : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01959903>



# Co-clustering for fair recommendation

Gabriel FRISCH

Directeurs de thèse : Jean-Benoist LEGER, Yves GRANDVALET

Équipe : CID

**Résumé**—Le but de cette thèse, financée par le ministère, est de concevoir des systèmes de recommandation basés sur des méthodes d'apprentissage statistique. Nous proposons un modèle statistique utilisant le Latent Block Model pour réaliser une recommandation dite équitable. Le modèle intègre un ou plusieurs attributs protégés liés à l'utilisateur afin d'obtenir une parité au sein des groupes d'utilisateurs.

## I. INTRODUCTION

In simple terms, fairness is often loosely defined as the quality of treating people equally, with impartiality and rightfulness. Although imprecise, this definition stipulates that equal treatment refers to certain sensitive attributes shared by groups of people, such as gender, age, ethnicity, socio-economic group, etc.

We target recommender systems relying on collaborative filtering, which aims at building recommendations from the history of user ratings. These observed ratings are the basis for making automatic predictions about non-rated items, under the assumption that users can be clustered according to their past opinion behavior. Sensitive attributes are not used to fit the models, but some disparate treatments may nevertheless exist, possibly due to some societal or cultural effects that bias the sampling of data. In situations where the sensitive attribute can be collected, it therefore seems preferable to design algorithms that process sensitive attributes to remove their influence, rather than simply ignore them.

We aim at producing fair recommendations using a co-clustering of users and items that respects statistical parity of users with respect to some sensitive attributes. For this purpose, we introduce a co-clustering model based on the Latent Block Model (LBM) that relies on an ordinal regression model that takes as inputs the sensitive attributes. We demonstrate that our model ensures approximately fair recommendations provided that the clustering of users approximately respects statistical parity.

## II. MODEL

The method we propose to model ratings is based on the Latent Block Model [1], a statistical co-clustering model and uses ordered probit regression to model ordinal responses  $R_{ij}$ . The Latent block model assumes that users and items belong to clusters and uses latent variables  $\mathbf{U}$  and  $\mathbf{V}$  to model these memberships. The ordered probit model assumes the existence of a continuous, Gaussian distributed latent random variable, denoted  $\mathbf{R}^*$  and the discrete observed ratings  $\mathbf{R}$  are the result of the partition of the continuous space of  $\mathbf{R}^*$  by a set of thresholds. Covariates

$s_i$  encoding a sensitive user attribute can easily be included in the probit regression framework to model an interaction with any object  $j$ . Provided the effects of the sensitive attribute are well captured by the terms  $s_i C_j$ , we expect the co-clustering to be independent of the sensitive attribute, which ensures fair recommendations. To accommodate with missing observations, we introduce a simple Bernoulli missingness model generating  $\mathbf{M} \in \{0, 1\}^{n_1 \times n_2}$ , a mask matrix where each entry  $M_{ij}$  is one with probability  $p$  and indicates whether the rating is observed. A summary of the model we propose is presented in Figure 1.

## III. FAIR RECOMMENDATIONS

We infer the parameters of the model via variational inference, and we define the relevance score of item  $j$  for user  $i$  as :

$$\hat{R}_{ij} = \mu_{qi} + A_i + B_j \quad (1)$$

This relevance score is computed from the trend related to the co-cluster to which  $(i, j)$  belongs, and the global effects related to user  $i$  and item  $j$ . It does not use the user's sensitive attribute  $s_i$ .

The modelling of the observed data  $\mathbf{R}$  incorporates the term  $\nu_j^{(C)} s_i$ , interpreted here as a spurious opinion bias related to the sensitive attribute. While it is important to ignore this term for a fair comparison of items, its inclusion into the model is important to allow the construction of clusters that are not affected by this spurious effect. These clusters can then be expected to be representative of all subpopulations defined by their sensitive attribute value, and thus to respect the statistical parity of users we give :

*Definition 1: (Clustering  $\varepsilon$ -parity, binary)* The clustering of users is said to respect  $\varepsilon$ -parity with respect to attribute  $s$  iff :

$$\forall q, \left| \frac{\#\{i | s_i = 1 \wedge U_{iq} = 1\}}{\#\{i | s_i = 1\}} - \frac{\#\{i | s_i = -1 \wedge U_{iq} = 1\}}{\#\{i | s_i = -1\}} \right| \leq \varepsilon \quad (2)$$

where  $\varepsilon \in \mathbb{R}_+$  measures the gap to exact parity,  $U_{iq} = 1$  is for the membership of user  $i$  to cluster  $q$ , and  $\#\{i | \Omega\}$  is the number of users defined by the cardinality of the set  $\Omega$ .

In essence, clustering  $\varepsilon$ -parity requires that subpopulations of users defined by identical sensitive attributes be represented approximately equally in each user group. Our theoretical guarantee ensures that this approximate statistical parity in clusters is sufficient to get approximately fair recommendations from our model :

*Definition 2: ( $\varepsilon$ -fair recommendation, binary)* A recommender system is said to be  $\varepsilon$ -fair with respect to

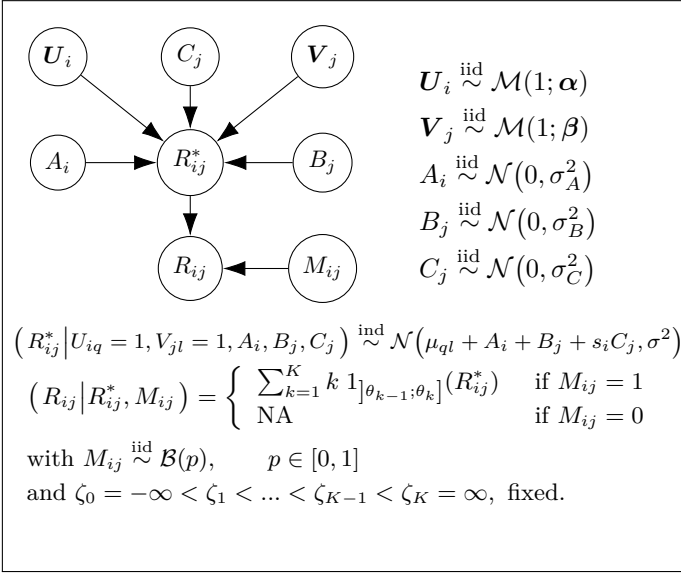


Fig. 1: Graphical view and summary of the ordered probit Latent Block Model with protected attribute  $s$ . The discrete observed data  $R_{ij}$  is generated by the underlying continuous data  $R_{ij}^*$  and the mask entry  $M_{ij}$ .

attribute  $s$  if for any two items  $j$  and  $j'$  :

$$\left| \frac{\#\{i|s_i=1 \wedge (\hat{R}_{ij} > \hat{R}_{ij'})\}}{\#\{i|s_i=1\}} - \frac{\#\{i|s_i=-1 \wedge (\hat{R}_{ij} > \hat{R}_{ij'})\}}{\#\{i|s_i=-1\}} \right| \leq \varepsilon, \quad (3)$$

where  $\varepsilon \in \mathbb{R}_+$  measures the gap to exact fairness

In essence, an  $\varepsilon$ -fair recommender system ensures that, for any two items, the proportion of users with the same preference is approximately identical in all the subpopulations of users defined by identical sensitive attributes.

#### IV. EXPERIMENT ON MOVIELENS DATASET

We use the MovieLens 1M dataset that contains one million ratings to movies scaling from 1 to 5. The dataset also contains additional information about the gender of users that we use as the sensitive attribute in our experiments. We compare our model (referred to as Parity LBM) with the baseline LBM that does not use the sensitive variable in the modelling (referred to as Standard LBM).

In the dataset, 27% of users self-identified as females, this proportion must be met in each group to respect clustering parity. To measure the dependence between gender and user group memberships, we compute the  $\chi^2$  statistic constructed from the contingency table of males and females counts in each group. Table I reports the p-value for testing the independence between groups and genders, with an asymptotic test. The results show that the methods that do not consider the sensitive variable in the modelling create groups that are dependent on gender. In contrast, our Parity-LBM model is consistent with the clustering parity hypothesis.

The fairness of recommendations resulting from this clustering parity is ascertained by computing the gap  $\varepsilon$  from

TABLE I: Measures of statistical gender parity among user clusters. The number of user groups is  $k_1 = 15$ . The  $\chi^2$  statistic (with 14 degrees of freedom) is averaged over the five replicates of the experiment. A high value of the  $\chi^2$  statistic (or a low p-value) leads to the rejection of the clustering parity hypothesis.

Model	Parity LBM	Standard LBM	Bregman co-clust
$\chi^2$ statistic	18.0	44.4	187
p-value	0.20	$5.1 \cdot 10^{-5}$	$< 10^{-15}$ .

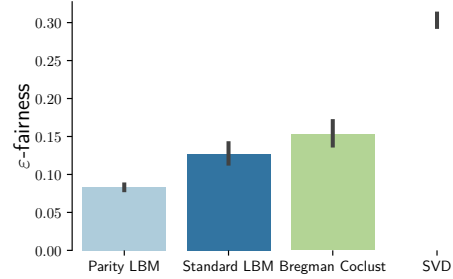


Fig. 2: Gaps  $\varepsilon$  for the  $\varepsilon$ -fair recommendations (see Definition 2) provided by each model : a smaller  $\varepsilon$ -fairness indicates fairer recommendations.

exactly fair recommendations, as defined in Definition 2. Figure 2 displays these gaps, with lower values indicating a fairer recommendation ; our model provides a significantly fairer recommendation compared to the standard Latent Block Model, which is itself much fairer than the two other baselines.

#### V. CONCLUSION

We proposed a new co-clustering method for fair recommendation. Our model combines the Gaussian Latent Block Model with an ordinal regression model. The sensitive attribute is adequately accounted for in the model, allowing the clustering of users to be unaffected by the effects of this attribute on ratings. This results in user clusters that approximately respect statistical parity. We base recommendation on a relevance score that ignores the sensitive attribute in order to compare items fairly. We provide theoretical guarantees ensuring approximately fair recommendations, for any known discrete sensitive attribute, provided that the clustering of users respects an approximate statistical parity that can be assessed in practice. Our analysis focuses on the fairness of preferences, as defined by the ranking of ratings, rather than on the predicted values themselves, which are less relevant for recommendation. Through experiments on real-world data, we show that our method significantly mitigates the unfairness of recommendations.

#### RÉFÉRENCES

- [1] Gérard Govaert and Mohamed Nadif. Block clustering with Bernoulli mixture models : Comparison of different approaches. *Computational Statistics & Data Analysis*.

# Contrôle de scénario en environnement virtuel interactif

GOUTIERE Romain

Directeurs de thèse : LOURDEAUX Domitile, LAGRUE Sylvain

Équipe : CID

**Résumé**—La génération automatique, en temps interactif, de scénarios pertinents, variés et résilients pour l’entraînement à la gestion de crise en environnement virtuel est un problème difficile. Nous proposons de le traiter via une approche combinant l’utilisation de Personnages Virtuels Autonomes (PVA), d’un *Experience Manager* et d’un système de réparation de scénario s’appuyant sur la planification pour garantir le respect de l’intention de l’auteur.

## I. INTRODUCTION

Les environnements virtuels sont aujourd’hui largement employés à des fins d’entraînement ou de formation [1]. Malgré le développement massif de ce genre de solutions au cours des dernières années, beaucoup de questions se posent toujours et la recherche dans les domaines de la narration interactive et de la scénarisation d’environnements virtuels pour la formation reste très active.

De grandes approches ont ainsi émergées, apportant chacune des fonctionnalités intéressantes par certains aspects mais possédant toujours des limitations. Ainsi, le scénario peut-être scripté afin de correspondre au mieux à l’intention de l’auteur et offrir une expérience assez pertinente mais n’offrant pas ou peu de variabilité et une difficulté d’écriture (*Authoring bottleneck*). Le scénario peut également être généré automatiquement afin d’offrir plus de variabilité et d’adaptabilité au détriment de l’explicabilité et d’une certaine forme de cohérence. L’accent peut aussi être mis sur le contrôle de la simulation pour proposer une plus grande résilience [5] ou alors proposer une expérience laissant une grande place à la liberté pour offrir de la variabilité et laisser le scénario émerger des différentes interactions avec comme conséquences une potentielle perte de qualité du scénario et du respect de l’intention de l’auteur [3].

Ces différentes approches répondent chacune à des besoins précis et peuvent sembler très différentes de prime abord, mais l’un des plus grands enjeux dans ce domaine est de trouver le meilleur équilibre afin de maximiser les fonctionnalités qui nous intéressent sans laisser tomber les autres et proposer ainsi l’expérience la plus complète possible [2] [6]. Ainsi, dans notre contexte, à savoir l’entraînement à la gestion de crise, de nombreuses fonctionnalités doivent être mises en avant comme la pertinence de l’expérience proposée et la résilience du scénario par rapport à ses objectifs pédagogiques. Mais également, la variabilité des situations rencontrées, l’adaptabilité, ou encore la cohérence du scénario.

## II. FONCTIONNEMENT GENERAL

Pour traiter ce problème, nous proposons une solution s’appuyant sur l’utilisation de Personnages Virtuels Autonomes (PVA) et d’un *Experience Manager* dont la collaboration doit

permettre, à partir d’un scénario fourni en entrée, de tester et détecter les comportements mettant en danger la résolution des objectifs du scénario pour pouvoir, le cas échéant, planifier des branches alternatives répondant aux mêmes objectifs. Notre système fonctionne donc en deux phases : La première, *offline*, lors de laquelle les PVA sont les seuls à tester le scénario. Lors de cette phase l’*Experience Manager* est utilisé pour détecter les situations mettant en danger la résolution des objectifs pédagogiques. Si une telle situation est détectée, une requête est envoyée au planificateur pour générer automatiquement une branche alternative de scénario. La qualité de cette branche alternative est déterminée par sa proximité sémantique avec le scénario initial, l’objectif est donc de contourner le problème rencontré mais de conserver le plus possible le scénario initial et ses objectifs. La deuxième phase, intervient dès lors que le scénario est parcouru par un joueur humain. Lors de cette phase, l’*Experience Manager* doit surveiller le déroulement du scénario pour comparer les situations rencontrées avec celles observées lors de la première phase pour pouvoir, en cas de similitudes, appliquer directement le bon correctif, sans avoir à générer de nouveau plan.

## III. FONCTIONNALITES ET ORIGINALITES

Cette solution met en avant des fonctionnalités très importantes comme la résilience apportée par la réparation du scénario et la génération d’alternatives répondant aux objectifs initiaux ainsi que de la variabilité venant également des différentes alternatives générées. En outre, cette solution offre plusieurs originalités permettant d’insister sur d’autres fonctionnalités.

### A. Génération de scénario en temps interactif

En premier lieu, les alternatives générées le sont lors d’une phase *offline* sans utilisateur humain, ce qui permet d’utiliser des algorithmes de planification plus centrés sur la qualité des plans générés que sur la vitesse de calcul. Cette méthode permet lors des séances avec utilisateur humain, d’utiliser directement les branches alternatives calculées *offline* pour réparer le plan, et ainsi disposer, en temps interactif, d’une replanification de qualité, ce qui n’est pas le cas dans les solutions existantes à l’heure actuelle.

### B. Réparation de plan

Une autre originalité vient du fait que la génération des branches alternatives de scénario se fait sur la base d’une situation rencontrée par les PVA. Plusieurs systèmes proposent aujourd’hui de la réparation de plan en cours de simulation ou de la génération *offline* d’alternatives, afin de rendre le scénario plus résilient. Cependant, ces approches posent problèmes, dans le premier cas, la réparation doit se faire en temps interactif et implique de la génération rapide qui peut conduire à des plans

de mauvaise qualité. Dans le second cas, il est difficile de déterminer des situations où il est pertinent de planifier des alternatives, les systèmes sont donc contraints d'explorer un grand nombre de situations et d'alternatives possible ce qui peut causer des problèmes de passage à l'échelle lorsque l'on se place dans des environnements complexes. De notre côté la génération se fait *offline* pour pouvoir prioriser la qualité par rapport au temps de calcul et la génération d'alternative est déclenchée lorsqu'un point de blocage est détecté par l'*Experience Manager* et est directement issu du comportement des PVA, réduisant ainsi le nombre de planifications aux seules situations réellement pertinentes.

### C. Représentation du scénario

La représentation que nous faisons du scénario présente également des originalités. Bien souvent, les systèmes de scénarisation d'environnement virtuels pour la formation et l'entraînement se concentrent sur la mise en place de la meilleure expérience possible pour l'apprenant. C'est bien entendu un objectif primordial mais il ne faut cependant pas oublier les formateurs qui doivent être en mesure de comprendre et surveiller les décisions prises par le moteur de scénarisation. Dans notre système, nous avons développé une représentation du scénario centrée sur les compétences travaillées. Ainsi, on peut voir le scénario de deux manières différentes. La première, classique, peut se définir comme un ensemble d'opérateur narratifs instanciés, partiellement ordonnés et exécutables ou observables dans un environnement virtuel [2]. Cette vision présente l'avantage de pouvoir suivre l'action qui se déroule effectivement dans l'environnement virtuel. Cependant, il est très important pour le formateur de pouvoir observer le déroulement de la séance d'un point de vue pédagogique. Nous proposons donc un autre découpage du scénario, le scénario pédagogique, sous la forme d'un ensemble ordonné d'unités d'apprentissage. Les unités d'apprentissage sont des opérateurs narratifs particuliers que l'on peut représenter comme des « boîtes » contenant une partie du scénario ayant une incidence sur une ou plusieurs compétences en particulier. Le but, en termes de planification, d'un scénario pédagogique est donc d'atteindre un certain niveau dans un ensemble de compétences. Ces deux découpages rendent le scénario beaucoup plus expressif pour le formateur, en effet, lorsque le système déclenche une replanification ou applique une alternative déjà calculée, les formateurs peuvent très simplement voir les éléments qui ont permis de prendre cette décision, que le problème prévienne une incohérence au niveau du scénario ou d'un risque par rapport aux compétences au niveau du scénario pédagogique.

### D. Experience Manager

L'utilisation classique d'un *Experience Manager* est le contrôle du scénario. Son but est d'observer son déroulement, de détecter les situations qui remettent en cause la validation des objectifs scénaristiques et d'intervenir pour contrer cette situation par la génération d'un nouveau plan ou le blocage de certaines actions de l'utilisateur [5] [4].

Dans notre système, nous étendons le rôle de l'*Experience Manager*. Lors de la phase d'apprentissage, en plus de son rôle classique de détection et d'intervention, l'*Experience Manager* est en communication avec le formateur pour donner des éléments d'explications sur les différentes interventions effectuées et demander des validations. Cependant, l'originalité de son utilisation se trouve plus particulièrement lors de la

deuxième phase. Lors de cette deuxième phase, les branches alternatives de scénario ont déjà été calculées et les situations ayant conduit à des problèmes lors de la première phase ont été enregistrées par l'*Experience Manager* sous forme de vecteurs de données observables. Dès lors, le rôle de l'*Experience Manager* est de déterminer la proximité entre les situations rencontrées au cours du scénario avec celles enregistrées afin de pouvoir appliquer directement les bonnes alternatives en cas de besoin.

## IV. LE PROJET ORCHESTRAA

Cette thèse est financée dans le cadre du projet ORCHESTRAA (DGA rapid), visant au développement d'une application d'aide à l'entraînement de contrôleurs aériens militaires. Cette application sera composée d'un environnement virtuel interactif dans lequel pourront évoluer les différents participants, de PVA et d'un système de contrôle de scénario qui implémentera les différentes approches développées lors de cette thèse.

## V. PROCHAINES ETAPES

Nous travaillons à l'élaboration d'un jeu « bac à sable » avec un environnement très simplifié afin d'éprouver les premières versions des différents algorithmes et modèles développés.

En ce qui concerne le système de contrôle de scénario en lui-même, il reste encore du travail au niveau de la formalisation des différents éléments du scénario afin de pouvoir intégrer et utiliser un système de planification.

## VI. REFERENCES

- [1] D. W. Carruth, «Virtual reality for education and workforce training,» chez *15th International Conference on Emerging eLearning Technologies and Applications (ICETA)*, Starý Smokovec, 2017.
- [2] R. Lacaze-Labadie, *Planification et modèle graphique pour la génération dynamique de scénarios en environnement virtuels*, Compiègne: Université de Technologie de Compiègne, 2019.
- [3] N. Szilas, «IDtension : a narrative engine for interactive drama,» chez *Technologies for Interactive Digital Storytelling and Entertainment (TIDSE)*, Darmstadt, 2003.
- [4] M. Riedl, C. J. Saretto et R. M. Young, «Managing interaction between users and agents in a multi-agent storytelling environment,» chez *Proceedings of the 2nd international joint conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*, Melbourne, 2003.
- [5] M. O. Riedl et V. Bulitko, «Interactive Narrative: An Intelligent Systems Approach,» *AI Magazine*, vol. 34, n° %11, pp. 67-77, 2012.
- [6] C. Barot, *Scénarisation d'environnements virtuels. Vers un équilibre entre contrôle, cohérence et adaptabilité*, Compiègne: Université de Technologie de Compiègne, 2014.

# Evidential lymphoma segmentation of 3D PET/CT images

Ling HUANG

Directeurs de thèse : Thierry DENOEU, Su RUAN

Équipe : CID

**Résumé—II.** In this paper, a segmentation method based on belief functions is proposed to segment lymphomas in 3D PET/CT images. The architecture is composed of a feature extraction module and an evidential segmentation module. Dice and uncertainty loss are minimized to increase segmentation accuracy. Quantitative and qualitative results show that our method outperforms the state-of-the-art methods.

## I. INTRODUCTION

Positron Emission Tomography-Computed Tomography (PET/CT) scanning is an effective imaging tool for lymphoma segmentation with application to clinical diagnosis and radiotherapy planning. The standardized uptake value (SUV) for PET images is widely used to locate and segment lymphomas thanks to its high sensitivity and specificity to the metabolic activity of tumor. CT images are usually used jointly with PET images because of their anatomical feature representation capability.

Because of low resolution and contrast due to limitations of medical imaging technology, PET/CT image segmentation results are tainted with uncertainty. Belief function (BF) theory [1] [2], also known as Dempster-Shafer theory, is a formal theory for information modeling, evidence combination and decision-making under uncertainty. In this paper, we propose a 3D PET/CT diffuse large b—cell lymphoma segmentation model based on BF theory and deep learning. The proposed deep neural network architecture is composed of a UNet module for feature extraction and a BF module for decision with uncertainty quantification. End-to-end learning is achieved by minimizing a two-part loss function allowing us to increase the Dice score while decrease the uncertainty.

## II. RELATED WORKS

The methods of lymphoma segmentation can be classified into three main categories : SUV-threshold-based [3], region-growing-based [4] and Convolutional Neural Network (CNN)-based [5] methods. For PET images, it is common to segment lymphomas with a set of fixed SUV thresholds. This method is fast but lacks of flexibility in boundary delineation and requires domain knowledge to locate the region of interest. Region-growing-based methods have been proposed to optimize boundary delineation by taking texture and shape information into account. However, those methods still need clinicians to locate the seeds for region growing. CNN-based segmentation methods have recently achieved great success. The UNet architecture [6] has become the most popular

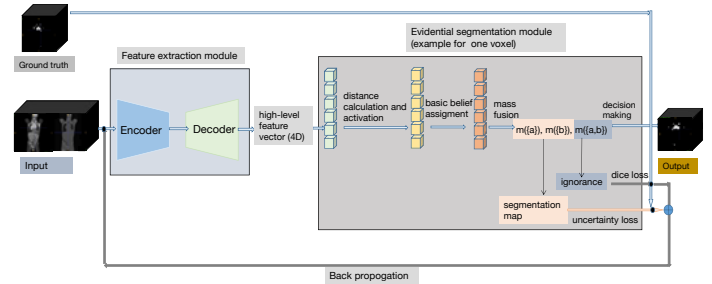


Fig. 1. Global lymphoma segmentation model (ES-UNet).

medical image segmentation model. In [5], Li et al. propose a lymphoma segmentation model with a two-flow architecture. In [7], Blanc-Durand et al. propose a UNet-based lymphoma segmentation network.

## III. PROPOSALS

### A. Network Architecture

Fig. 1 shows the global lymphoma segmentation architecture (ES-UNet). It is composed of (1) an encoder-decoder feature extraction module (UNet), and (2) an evidential segmentation (ES) module comprising a distance activation layer, a basic belief assignment layer and a mass fusion layer.

### B. Evidential segmentation module

A probabilistic network with a softmax output layer may assign voxels a high probability of belonging to one class while the segmentation uncertainty is actually very high because, e.g., the voxel is located close to the fuzzy boundary between the tumor region and other tissues. Based on the evidential neural network model introduced in [8], we propose a BF theory-based ES module to quantify the uncertainty about the class of each voxel by a mass function. The main idea of the ES module is to assign a mass to each of the  $K$  classes and to the whole set of classes  $\Omega$ . For a given voxel  $x$ , each prototype  $p_i$  is considered as a piece of evidence, the reliability of which decreases with the Euclidean distance  $d_i$  between  $x$  and  $p_i$ . Each prototype  $p_i$  is assumed to have a membership degree  $u_{ik}$  to each class  $\omega_k$  with the constraint  $\sum_{k=1}^K u_{ik} = 1$ . The mass function induced by prototype  $p_i$  is

$$m_i(\{\omega_k\}) = \alpha_i u_{ik} \exp(-\gamma_i d_i^2), \quad k = 1, \dots, K \quad (1a)$$

$$m_i(\Omega) = 1 - \alpha_i \exp(-\gamma_i d_i^2), \quad (1b)$$



Table I

PERFORMANCE COMPARISON WITH THE BASELINE METHODS ON THE TEST SET.

Models	Dice score		Specificity	Precision	F1 score
ES-UNet (ours)	<b>0.830</b>	0.923	0.908	0.912	<b>0.915</b>
UNet [6]	0.769	0.798	<b>0.963</b>	0.890	0.833
nnUNet [9]	0.702	<b>0.950</b>	0.499	0.758	0.807
VNet [10]	0.802	0.882	0.904	0.916	0.909
SegResNet [11]	0.811	0.899	0.942	<b>0.925</b>	0.901

The mass functions induced by the  $I$  prototypes are then combined by Dempster’s rule [1]

$$m = \bigoplus_{i=1}^I m_i. \quad (2)$$

In our case,  $\Omega = \{a, b\}$  and  $K = 2$ . The ES module outputs for each voxel three mass values: two masses corresponding to lymphoma ( $\{a\}$ ) and background ( $\{b\}$ ), and an additional mass corresponding to ignorance ( $\Omega$ ).

### C. Loss function based on accuracy and uncertainty for segmentation

Since we quantify uncertainty by the “ignorance class” via the evidential network, we propose to minimize a loss function defined as the sum of two terms: a Dice loss  $\text{loss}_d$  that measures the discrepancy between the ground truth and segmentation outputs, and an uncertainty loss  $\text{loss}_u$  that measures the uncertainty of the segmentation outputs. More precisely, the Dice loss is defined as

$$\text{loss}_d = 1 - \frac{2 \sum_{n=1}^N S_n G_n}{\sum_{n=1}^N S_n + \sum_{n=1}^N G_n}, \quad (3)$$

where  $N$  is the number of voxels in the image volume,  $S$  is the segmentation outputs of our model and  $G$  is the ground truth. The uncertainty loss is defined as

$$\text{loss}_u = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [m_n(\Omega)]^2, \quad (4)$$

where  $m_n$  is the mass function computed for voxel  $n$ . The total loss function is then

$$\text{loss} = \text{loss}_d + \text{loss}_u + \lambda \|\alpha\|_1, \quad (5)$$

where  $\lambda$  is the regularization coefficient for parameter  $\alpha$  defined in (1).

## IV. EXPERIMENTAL RESULTS

### A. Results and discussion

The dataset contains images from 173 patients who were diagnosed with large b-cell lymphoma and underwent PET/CT examination. The quantitative results are shown in Table I. Our model outperforms the baseline model UNet as well as the other state-of-the-art methods. In particular, our model outperforms the best model SegResNet by, respectively, 1.9%, 2.4%, 1.4% in Dice score, Sensitivity and F1 score.

Fig. 2 shows an example of segmentation results obtained by ES-UNet. Our model can locate and segment most of the lymphomas. The segmentation results were found credible and were confirmed by experts.

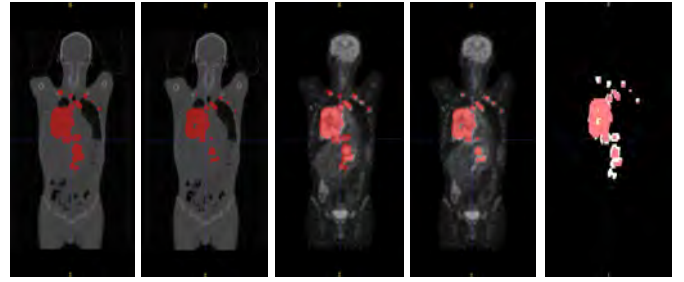


Fig. 2. Segmentation results of ES-UNet. From left to right: ground truth, segmentation results, difference map between the ground truth, and segmented lymphomas.

## V. CONCLUSION

An evidential segmentation framework (ES-UNet) for segmentation of lymphomas from 3D PET/CT with uncertainty quantification has been introduced. The proposed architecture is based on the concatenation of a UNet and an evidential segmentation layer, making it possible to compute output mass functions for each voxel. Future research will tackle multi-modality medical image fusion with BF theory.

## REFERENCES

- [1] G. Shafer, *A mathematical theory of evidence*. Princeton university press, 1976, vol. 42.
- [2] T. Denœux, D. Dubois, and H. Prade, “Representations of uncertainty in artificial intelligence: Beyond probability and possibility,” in *A Guided Tour of Artificial Intelligence Research*, P. Marquis, O. Papini, and H. Prade, Eds. Springer Verlag, 2020, vol. 1, ch. 4, pp. 119–150.
- [3] H. Ilyas, N. G. Mikhael, J. T. Dunn, F. Rahman, H. Möller, D. Smith, and S. F. Barrington, “Defining the optimal method for measuring baseline metabolic tumour volume in diffuse large b cell lymphoma,” *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*, vol. 45, no. 7, pp. 1142–1154, 2018.
- [4] H. Hu, P. Decazes, P. Vera, H. Li, and S. Ruan, “Detection and segmentation of lymphomas in 3D PET images via clustering with entropy-based optimization strategy,” *International journal of computer assisted radiology and surgery*, vol. 14, no. 10, pp. 1715–1724, 2019.
- [5] H. Li, H. Jiang, S. Li *et al.*, “DenseX-net: an end-to-end model for lymphoma segmentation in whole-body PET/CT images,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 8004–8018, 2019.
- [6] O. Ronneberger, P. Fischer, and T. Brox, “U-Net: convolutional networks for biomedical image segmentation,” in *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*, N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, and A. F. Frangi, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2015, pp. 234–241.
- [7] P. Blanc-Durand, S. Jégou, S. Kanoun *et al.*, “Fully automatic segmentation of diffuse large B cell lymphoma lesions on 3D FDG-PET/CT for total metabolic tumour volume prediction using a convolutional neural network,” *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, pp. 1–9, 2020.
- [8] T. Denœux, “A neural network classifier based on Dempster-Shafer theory,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, vol. 30, no. 2, pp. 131–150, 2000.
- [9] F. Isensee, J. Petersen, A. Klein, D. Zimmerer *et al.*, “nnu-net: Self-adapting framework for u-net-based medical image segmentation,” *arXiv preprint arXiv:1809.10486*, 2018.
- [10] F. Milletari, N. Navab, and S.-A. Ahmadi, “V-net: Fully convolutional neural networks for volumetric medical image segmentation,” in *2016 fourth international conference on 3D vision*. IEEE, 2016, pp. 565–571.
- [11] A. Myronenko, “3D MRI brain tumor segmentation using autoencoder regularization,” in *International MICCAI Brain Lesion Workshop*. Springer, 2018, pp. 311–320.

# Improving real estate management with data science

Soundouss MESSOUDI

Directeurs de thèse : Sébastien DESTERCKE, Sylvain ROUSSEAU

Équipe : CID

**Résumé**—This PhD is part of a partnership between UTC and Sopra/Sterea with the objective of finding reliable and cautious Machine Learning models applied to real estate. To do so, we adopted conformal prediction, a framework that provides predictions with a statistical guarantee depending on the probability of error tolerated by the user, and applied it to the prediction of tenants in debt.

## I. INTRODUCTION

### A. Context

This PhD is part of a partnership signed 4 years ago between UTC and Sopra/Sterea. Its goal is to help the company enrich its offer of property management services in real estate and to value the numerous building data (BIM, IoT and ERP) that are not yet exploited to their full potential. This thesis is thus a continuation of the work that was done by students during AP or TX projects in order to use data science techniques in real estate. The PhD has started on February 2019 and is expected to finish by February 2022. It is financed by a fund that was donated by Sopra/Sterea to the UTC foundation.

### B. Motivation and objectives

There are a lot of useful Machine Learning applications in real estate, and many startups have already deployed some of these applications in reality through real estate technology, especially with the rise of IoT, augmented reality and Big Data. However, one of Sopra/Sterea’s most important needs is to have reliable ML models based on high quality data in order to make the best decisions, especially when it comes to sensitive issues. Indeed, ML models can sometimes provide scores with a high confidence in a clearly erroneous prediction. Such an issue can be solved by using conformal prediction [1]. Therefore, the thesis is focused on two goals :

- Explore conformal prediction approaches.
- Apply them to Sopra/Sterea’s real estate problems.

### C. Thesis progress

In the first year of the thesis, we worked on the state of the art of conformal prediction, with a focus on a density-based approach for cautious deep learning [2]. In the second year of the thesis, we focused more on applying conformal prediction to the Multi-target Regression problem, a relatively unexplored area in the conformal prediction setting [3], [4].

In this third year of the thesis, we focused on the work with Sopra/Sterea by supervising UTC students during an AP in A20 and exploring a database that gathers tenant data in order to extract from it a suitable dataset for the prediction of tenants in debt. This problem is interesting for Sopra/Sterea since it

is essential for social property owners to anticipate tenants that are likely to fall into debt and to limit the number of tenants that are misclassified as in debt in order to avoid paying unnecessary costs, or wasting social agents’ time. To tackle this problem, we proposed a class-wise confidence approach based on mondrian conformal prediction.

## II. MONDRIAN CONFORMAL PREDICTION (MCP)

MCP is a variant of conformal prediction that provides a validity on a subset of the dataset [5]. In this case, each specific category of the dataset has its own individual guarantee based on the chosen individual error rate.

Let  $z_1 = (x_1, y_1), \dots, z_n = (x_n, y_n) \in \mathbf{Z}$  be successive pairs constituting the examples, with  $x_i \in \mathbf{X}$  an object and  $y_i \in \mathbf{Y} = \{C_1, \dots, C_p\}$  its class. Let  $\mathbf{Z}$  be exchangeable (a weaker condition than i.i.d.). We can predict  $y_{n+1} \in \mathbf{Y}$  for any new object  $x_{n+1} \in \mathbf{X}$  by following the mondrian conformal framework steps for a class-conditional conformal classifier :

- 1) Split the original training dataset  $\mathbf{Z}$  into a *proper training set*  $\mathbf{Z}^{tr}$  with  $|\mathbf{Z}^{tr}| = m$  and a *calibration set*  $\mathbf{Z}^{cal}$  with  $|\mathbf{Z}^{cal}| = n - m = q$ .
- 2) Train a classification *underlying algorithm*  $h : \mathbf{X} \rightarrow \mathbf{Y}$  on  $\mathbf{Z}^{tr}$  to obtain the *non-conformity measure*  $f(z)$ . The standard non-conformity measure in a classification setting when  $h$  is a probabilistic classifier is defined as  $f(z) = 1 - \hat{P}_h[y | x]$ .
- 3) Apply  $f(z)$  to each example  $z_i$  of  $\mathbf{Z}^{cal}$  to get the non-conformity scores  $\alpha_1, \dots, \alpha_q$ .
- 4) Choose a *significance level*  $\epsilon \in (0, 1)$  to get a prediction set with a *confidence level* of  $1 - \epsilon$ .
- 5) For a new example  $x_{n+1}$ , compute a non-conformity score for each class  $C_k \in \mathbf{Y}$  :

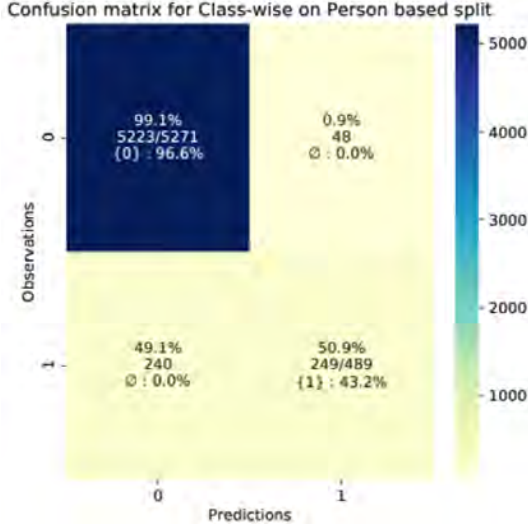
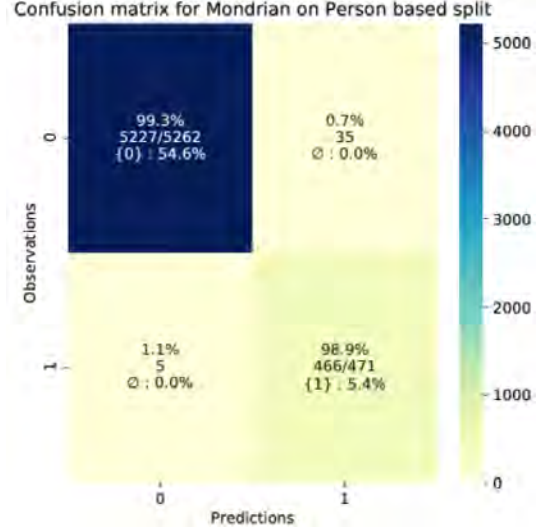
$$\alpha_{n+1}^{C_k} = f((x_{n+1}, y = C_k)). \quad (1)$$

- 6) For each class  $C_k \in \mathbf{Y}$ , compute the  $p$ -value for the object  $x_{n+1}$  by only taking non-conformity scores  $\alpha_i$  in  $\mathbf{Z}^{cal}$  that are related to the examples belonging to the same class we are hypothetically testing  $C_k$  :

$$p_{n+1}^{C_k} = \frac{|\{i \in 1, \dots, q : y_i = C_k, \alpha_{n+1}^{C_k} \leq \alpha_i\}|}{|\{i \in 1, \dots, q : y_i = C_k\}|}. \quad (2)$$

- 7) Build the prediction set  $\Gamma^\epsilon = \{C_k \in \mathbf{Y} : p_{n+1}^{C_k} > \epsilon\}$ .

The prediction set can be a singleton when the predictor is sure, a set with more than one class in case of ambiguity and an empty set  $\emptyset$  when the model does not know or did not see a similar example during training. Class-conditional MCP is mostly used when data is imbalanced, in order to maintain the same error rate even for the minority class.


 Fig. 1. Confusion matrix for class-wise confidence ( $\epsilon_g = 0.05$ ,  $\epsilon_0 = 0.01$ ).

 Fig. 2. Confusion matrix for MCP ( $\epsilon_g = \epsilon_0 = 0.01$ ).

### III. CLASS-WISE CONFIDENCE

Our goal is to control the error rate of a given class, while preserving a relatively low global error rate. This means that we need to specify different significance levels for the classes and for the global dataset. To do so, we adapt the class-conditional mondrian conformal prediction described in Section II.

Let  $\epsilon_g \in (0, 1)$  be the global error rate for all the dataset,  $\epsilon_0 \in (0, 1)$  be the one specified for the label  $y = 0$ , i.e. the person is not in debt, and  $\epsilon_1 \in (0, 1)$  be the one related to the class  $y = 1$ , i.e. the person is in debt.  $\epsilon_0$  is thus the variable over which we wish to have a strong control. We have

$$\epsilon_g = \epsilon_0 \mathbb{P}(y = 0) + \epsilon_1 \mathbb{P}(y = 1). \quad (3)$$

With  $\epsilon_g$  and  $\epsilon_0$  chosen by the user, and provided we have reasonable estimations of  $\mathbb{P}(y = 0)$  and  $\mathbb{P}(y = 1)$ , we can calculate  $\epsilon_1$  by :

$$\epsilon_1 = \frac{\epsilon_g - \epsilon_0 \mathbb{P}(y = 0)}{\mathbb{P}(y = 1)}. \quad (4)$$

When defining  $\epsilon_g$  and  $\epsilon_0$ , and since  $\epsilon_1 \in (0, 1)$ , we need to respect that  $\epsilon_0 \mathbb{P}(y = 0) < \epsilon_g < \epsilon_0 + (1 - \epsilon_0) \mathbb{P}(y = 1)$ , otherwise we would obtain an unfeasible  $\epsilon_1$ .

This enables us to have individual significance levels for each class that will guarantee an overall confidence level for the dataset. Apart from this step, the other steps of class-conditional MCP remain the same with the gradient boosting algorithm "LightGBM" as the underlying algorithm.

### IV. EXPERIMENTS AND RESULTS

Figures 1 and 2 show the confusion matrix for our class-wise confidence and the MCP approaches respectively. In addition to having the percentage and amount of data falling in each cell, we have added an extra element, which is either the proportion of singleton predictions in the case of correct predictions (that is, the ratio of  $\{0\}$  or  $\{1\}$ , considering a  $\{0, 1\}$  prediction is always correct), or the proportion of

empty set predictions in case of incorrect predictions. For our approach, Figure 1 shows that the global error rate and the one for class 0 are approximately equal to the chosen  $\epsilon_g$  and  $\epsilon_0$ , and that the one for class 1 is also approximately 0.52, the result of Equation (4) when  $\epsilon_0 = 0.01$  and  $\epsilon_g = 0.05$ , which shows that our method achieves a class-wise confidence while keeping a global confidence, both chosen by the user. Similarly, Figure 2 shows expected results for the more classical choice  $\epsilon_g = \epsilon_0$ . However, a striking difference between the two is the number of precisely recognised persons that will be in debt or not, i.e. the percentage of singletons. For people in debt, our method detects much more problematic tenants, allowing for more prevention. For people not in debt, all  $\epsilon$  values are equal in the classical MCP, which leads to more  $\{0, 1\}$  sets predicted in order to ensure the 99% validity for the minority class. When using our method, less  $\{0, 1\}$  sets are predicted, meaning that experts will have much less cases to verify manually.

### V. CONCLUSION

During the PhD, we mainly focused on conformal prediction as a method to get robust models and applied it to one of Sopra/Steria's problems which is the prediction of tenants in debt. The perspectives on the next months will be continuing the work on conformal prediction for Multi-Target Regression with conditional coverage, and on other Sopra/Steria issues.

### RÉFÉRENCES

- [1] V. Vovk, A. Gammerman, and G. Shafer, *Algorithmic learning in a random world*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [2] S. Messoudi, S. Rousseau, and S. Destercke, "Deep conformal prediction for robust models," in *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*. Springer, 2020, pp. 528–540.
- [3] S. Messoudi, S. Destercke, and S. Rousseau, "Conformal multi-target regression using neural networks," in *Conformal and Probabilistic Prediction and Applications*. PMLR, 2020, pp. 65–83.
- [4] —, "Copula-based conformal prediction for multi-target regression," *Pattern Recognition*, p. 108101, 2021.
- [5] V. Vovk, D. Lindsay, I. Nourtdinov, and A. Gammerman, "Mondrian confidence machine," *Technical Report*, 2003.

# Learning Resources Recommender System for Teachers

Nader NASHAT NASHED ABDELMALEK

Directeurs de thèse : Marie-Hélène ABEL, Christine LAHOUD

Équipe : CID

**Résumé**—Teachers search excessive number of unorganized resources to find the course’s support. Thus, the representation of these resources through an organized manner saves the teacher’s time and effort. This complex problem must consider multiple aspects including the resource representation, the contextual conditions of teachers and the learning environment. In this paper, Teacher context ontology (TCO) is introduced that organizes resources and eases the resources sharing through educational resources recommender system.

## I. INTRODUCTION

Teachers face struggles in their job such as their lack of knowledge about their working environment, the inefficient self-evaluation, and the learner’s motivation and discipline [1]. Teachers suffer from additional struggles if they are working in rough conditions such as rural and prioritized areas [2]. These struggles can be eased by some effective solutions such as the knowledge sharing and experience exchange between teachers.

Therefore, teachers need a method of experience sharing through an information system such as educational resources recommender system (ERRS) [3]. The system facilitates the knowledge sharing and the resource recommendation, but it requires an explicit representation of resources and teacher’s context. This representation can be achieved using the ontology representation of the educational resources as well as teacher, learner, and their contextual environments [4]. We defined a domain ontology called Teacher Context Ontology (TCO) in a teacher-centered approach. It also includes the resource and learner representations in addition to considering the multiple contexts in which the learning process takes place [5].

This abstract summarizes TCO and its usage in an ERRS for teacher. TCO facilitates the teacher context description in term of environment, teacher’s profile, and the audience’s profile. The rest of the abstract is divided into four sections. The next section illustrates the related work. In the following section, the TCO ontology is presented. Then, the possibility and perspectives of using TCO in an ERRS is discussed. The final section concludes this abstract.

## II. RELATED WORK

Ontologies are used in different fields with various purposes. Ontologies are widely integrated with recommender systems in different fields to match the users with recommended items, or to represent knowledge [6]. The previously conducted research

tends to investigate learner-centered approaches or couple teachers with curriculum creation and learner’s assessment.

The most significant educational ontologies during the past 10 years were investigated in [5]. Each ontology describes multiple concepts within the educational concepts. These ontologies are used in either an e-learning system or a recommender system. Out of the fourteen ontologies, only two ontologies represent the teacher concept. Learner concept is the most represented concept in these educational ontologies. While a systematic survey of high impact educational resources recommender systems (ERRSs) during the past 10 years was conducted in [3]. Only three ERRSs, out of the eleven ERRSs, use a semantic data model such as ontology.

The improper teacher representation in the major educational ontologies along with the lack of usage of ontologies in ERRSs urges us to target our research effort in this region.

## III. ONTOLOGY TCO

The Teacher Context Ontology (TCO) represents the teacher as the main concept along with multiple concepts of the educational context including the educational institution and learners. TCO as shown in Fig. 1 introduces the intersection of multiple contextual environments of a single teacher [7]. It also includes the teacher interactions with resource items in the learning context. TCO was encoded and developed using the Ontology Web Language (OWL)<sup>1</sup> and the Protégé framework<sup>2</sup>.

The four main concepts in this ontology are the teacher, the learner, the environment, and the resource. A teacher is described by the basic user account information such as name, age, gender, contact information, education, teacher’s work experience, and teaching style. Teacher’s work experience is measured according to the period of his teaching career, the highest academic degree, and the targeted learners. The teaching styles are used to connect the teacher with the learners and are divided into five types : authority, demonstrator, facilitator, delegator, and hybrid styles [8]. A teacher concept has multiple relations with the environment through “worksIn”, with educational course through “teaches” and with resources through “interacts”.

A learner is described by the basic user account information along with the educational level and the learning styles. Each learner has an educational level according to the 2011

1. <https://www.w3.org/TR/owl-ref/>

2. <http://protege.stanford.edu>





# Génération de scénario d'entraînement au stress en situation de crise en environnement virtuel

Luca PELISSERO-WITOSLAWSKI

Directeurs de thèse : Domitile LOURDEAUX, Dominique LENNE

Équipe : CID

**Résumé**—Les environnements virtuels permettent de mettre en place des situations difficiles à reproduire dans la réalité comme les entraînements à la gestion du stress. Notre objectif est de créer un profil dynamique de stress d'une personne, prenant en compte les incertitudes liées aux situations de crises et aux mesures. Nous créons également un générateur dynamique de scénarios, utilisant profil du stress et théories narratives pour générer des scénarios personnalisés.

## I. INTRODUCTION ET PROBLÉMATIQUE

Les entraînements en environnement virtuel permettent la mise en place de situations complexes qu'il serait difficile de reproduire dans le cadre d'un entraînement classique, comme les situations de crise (attaque terroriste, situation de conflit armé, catastrophe naturelle). De plus, la réalité virtuelle pour l'entraînement permet de confronter l'apprenant à une grande diversité de situations.

Les situations de crise sont particulièrement stressantes pour les personnes devant oeuvrer dans des conditions réelles similaires. Nous faisons l'hypothèse que multiplier les confrontations à des situations de plus en plus complexes et/ou stressantes permettrait aux apprenants de mieux réguler leur stress.

Cependant, chaque personne est unique. Une situation de développement potentiel pour un apprenant pourrait se révéler être une situation difficilement surmontable pour un autre, le mettant par conséquent en échec. De la même manière, toutes les personnes ne sont pas stressées par les mêmes stimuli.

Nous proposons un système permettant de définir un profil dynamique et personnalisé pour chaque apprenant. Ce profil, reflétant les capacités de l'apprenant à gérer des éléments stressants, est généré grâce à des données issues de capteurs physiologiques.

Cependant, ces données sont empreintes d'incertitudes. En plus de l'incertitude liée aux erreurs potentielles de mesure, les signaux analysables en temps réel permettant de connaître l'état de stress d'une personne sont influencés par de nombreux facteurs, phénomènes ou actions que l'on retrouve fréquemment lors de l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle. Il est également difficile d'isoler le facteur à l'origine de ce stress, les causes pouvant même se révéler être multiples. C'est pourquoi ce système s'appuie sur la théorie des croyances transférables ainsi que sur un modèle de connaissances pour permettre d'effectuer des raisonnements sémantiques dans l'incertain.

Ce profil est utilisé conjointement à un planificateur dynamique s'appuyant sur des théories narratives pour générer des

situations d'entraînements personnalisés. Le profil est utilisé pour déterminer quels seront les stresseurs mis en scène dans l'environnement virtuel au travers d'un récit assurant une tension et une cohésion narratives adaptées au contexte et à l'apprenant.

Ces scénarios devant être adaptés à chaque apprenant, il est important de pouvoir modifier dynamiquement les situations que nous lui présentons lors d'une session d'entraînement. Nous souhaitons par ce procédé diagnostiquer les effets d'une situation proposée durant son exécution, mais également pour les futures sessions.

## II. ETAT DE L'ART

Afin d'établir notre diagnostic, nous devons réfléchir à la méthode que nous pouvons utiliser pour représenter les connaissances de l'apprenant et prédire l'état de ses connaissances. Ainsi, nous souhaitons pouvoir modéliser un ensemble de données qui peuvent s'avérer fausses. En d'autres termes, nous avons besoin d'utiliser un modèle pour représenter des croyances.

Nous avons examiné plusieurs théories dans la littérature pour modéliser ces croyances : la théorie des ensembles flous [1]; la théorie des possibilités [2], [3]; les réseaux bayésiens [4]; la théorie des fonctions de croyance [5]; le modèle des croyances transférables [6].

Nous avons également étudié des profils apprenants existants utilisant ces modèles, afin de déterminer les avantages et les inconvénients de ces derniers.

Nous avons finalement choisi la théorie des croyances transférables pour la génération de notre profil. Cette théorie qui englobe toutes les autres permet également de représenter les conflits entre les sources d'information, ainsi que le manque de connaissances. Ce cadre formel offre également des outils pour fusionner des informations provenant de plusieurs sources, ainsi que des outils pour faire des inférences sur les valeurs d'une variable présentant un manque de connaissance.

## III. PROFIL

Au travers du profil dynamique du stress, nous souhaitons pouvoir rendre compte du niveau de développement présent des capacités d'un apprenant à faire face à des stresseurs, de son niveau de développement potentiel, mais également pouvoir conseiller au formateur de nouveaux stresseurs à travailler. Cela revient à représenter la zone proximale de développement de Vygotsky [7].

Carpentier propose une représentation de la ZPD nommée espace-ZPD (voir Fig.1). Cette représentation s’appuie elle même sur le modèle des croyances transférables [8] afin d’établir un diagnostic de l’apprenant.

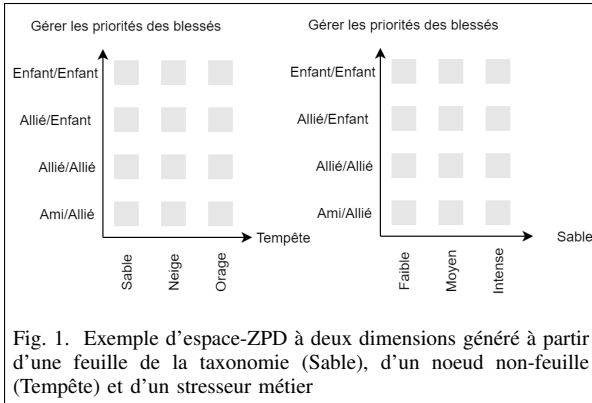


Fig. 1. Exemple d’espace-ZPD à deux dimensions généré à partir d’une feuille de la taxonomie (Sable), d’un noeud non-feuille (Tempête) et d’un stresser métier

Nous nous appuyons alors sur ce modèle afin d’établir notre propre profil du stress de l’apprenant, tout en y apportant des améliorations en terme de puissance générative.

L’originalité porte sur le couplage d’un modèle sémantique et du modèle des croyances transférables. Il permet d’émettre des hypothèses sur les causes du stress et de conseiller un entraînement adapté à cette situation. Ce couplage permet également d’inférer sur les capacités de l’apprenant à gérer des situations stressantes, tout en prenant en compte les nombreuses incertitudes inhérentes à l’acquisition et l’analyse du stress.

Les stressers sont structurés sous forme de taxonomie. Cette taxonomie est construite selon la similarité sémantique des concepts qui la composent, ainsi qu’une catégorisation des stressers [9]. Les feuilles représentent des stressers, tandis que leurs parents représentent des ensembles de stressers.

A partir de cette taxonomie, nous sommes en mesure de générer des espace-ZPD à n-dimensions, chaque axe représentant un noeud sélectionné de la taxonomie (voir Fig.1). Les situations qu’il est possible d’instancier sont alors représentés par les cases de l’espace-ZPD, que nous appelons classe de situation. Il existe ainsi autant de situations d’entraînement que de combinaison de noeuds dans la taxonomie des stressers.

Par l’application de la fonction de distribution de masse de croyance [5] sur son cadre de discernement  $\Omega$ , on associe à chaque classe de situations un tuple constitué de quatre masses de croyance :  $m^{\Omega(S_i)}(\{Ability\})$ , la capacité de l’apprenant à faire face à une situation, notée  $a(S_i)$ ;  $m^{\Omega(S_i)}(\{Disability\})$ , l’incapacité de l’apprenant à faire face à une situation, notée  $d(S_i)$ ;  $m^{\Omega(S_i)}(\{Ability, Disability\})$ , le conflit créé lorsque deux sources d’informations entrent en contradiction à propos de la capacité ou l’incapacité de l’apprenant, notée  $c(S_i)$ ;  $m^{\Omega(S_i)}(\{\emptyset\})$ , l’ignorance qu’a le système à déterminer la capacité ou l’incapacité de l’apprenant, notée  $i(S_i)$ .

Ces masses de croyances sont générées à partir d’une analyse des signaux des différents capteurs de stress que nous utilisons, ainsi que d’observables dans l’environnement virtuel permettant d’attester de la réussite ou non de l’apprenant sur les actions qui lui sont demandées.

Nous nous appuyons sur la fonction de propagation afin de propager les croyances entre les classes de situations, au travers de l’ensemble de la taxonomie. La similarité sémantique étant calculée grâce à la distance dans la taxonomie entre deux noeuds  $sim(A, B)$ , la formule de propagation est tel que :

$$\begin{aligned} a_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_a(S_A, S_B) = sim(A, B) \times a_{S_A} \\ d_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_d(S_A, S_B) = sim(A, B) \times d_{S_A} \\ c_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_c(S_A, S_B) = sim(A, B) \times c_{S_A} \\ i_{S_A \rightarrow S_B} &= \Phi_i(S_A, S_B) = sim(A, B) \times (i_{S_A} - 1) + 1 \end{aligned}$$

Cette propagation nous permet d’établir des prédictions quant à la capacité de l’apprenant à gérer son stress dans des situations semblables à celles qu’il a déjà rencontré.

#### IV. PERSPECTIVES

Pour la suite de nos travaux, nous allons développer le second modèle, permettant la génération dynamique de scénarios d’entraînements autour de situations sélectionnées par le profil dynamique du stress, et s’appuyant sur la théorie narrative des contes du Gange [10] afin de maintenir la cohésion narrative. Ce scénario sera construit afin d’assurer une tension narrative forte dans le récit, et de maintenir l’intérêt de l’apprenant également de mettre en place des expérimentations dans le but de valider et tester notre profil, celui-ci n’ayant pu être testé qu’avec des données artificielles. Ces travaux font l’objet d’un article publié à la conférence EIAH 2021, et présenté le 10 juin 2021. Ils font également l’objet de la rédaction d’un second article soumis à la conférence SMC 2021.

#### REMERCIEMENTS

Ces travaux sont financés par la Région Hauts-de-France et le Fonds Européen de Développement Régional (FEDER) 2014/2020 ainsi que le Labex MS2T.

#### RÉFÉRENCES

- [1] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” in *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems : selected papers by Lotfi A Zadeh*. World Scientific, 1996, pp. 394–432.
- [2] —, “Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility,” *Fuzzy sets and systems*, vol. 1, no. 1, pp. 3–28, 1978.
- [3] D. Dubois and H. Prade, *Possibility theory : an approach to computerized processing of uncertainty*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [4] J. Pearl, *Probabilistic reasoning in intelligent systems : networks of plausible inference*. Elsevier, 2014.
- [5] G. Shafer, *A mathematical theory of evidence*. Princeton university press, 1976, vol. 42.
- [6] P. Smets and R. Kennes, “The transferable belief model,” *Artificial intelligence*, vol. 66, no. 2, pp. 191–234, 1994.
- [7] L. S. Vygotsky, *Mind in society : The development of higher psychological processes*. Harvard university press, 1980.
- [8] K. Carpentier and D. Lourdeaux, “Generation of learning situations according to the learner’s profile within a virtual environment,” in *International conference on agents and artificial intelligence*. Springer, 2013, pp. 245–260.
- [9] G. Fink, “Stress, definitions, mechanisms, and effects outlined : lessons from anxiety,” in *Stress : Concepts, cognition, emotion, and behavior*. Elsevier, 2016, pp. 3–11.
- [10] H. Koenitz, A. Di Pastena, D. Jansen, B. Lint, and A. Moss, *The Myth of ‘Universal’ Narrative Models*, 11 2018, pp. 107–120.

# Contrôle adaptatif par optimisation distribuée dans le contexte des véhicules connectés

Mathieu RANDON

Directeurs de thèse : Benjamin QUOST, Nassim BOUDAUD, Dirk VON WISSEL

Équipe : CID (Heudiasyc), Systèmes intégrés : produit / process (Roberval), Renault S.A.S

**Résumé**—La transition énergétique automobile s’effectue notamment avec l’électrification progressive des groupes motopropulseurs (GMP). Les GMP hybrides parviennent à optimiser la consommation en carburant en tirant partie d’un modèle énergétique. Cette thèse développe l’apprentissage automatique d’un tel modèle robuste aux incertitudes sur les données de façon à rendre fiable l’optimisation énergétique.

## I. MOTIVATION

### A. Contexte industriel

La transition énergétique automobile s’effectue avec l’électrification progressive des groupes motopropulseurs (GMP). Un GMP hybride (HEV) assiste la traction du véhicule avec l’énergie électrique récupérée en freinage et en descente, tandis qu’un GMP hybride rechargeable (PHEV) dispose de davantage d’autonomie avec sa batterie plus volumineuse et rechargeable à l’arrêt. Ces motorisations hybrides offrent un compromis entre réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, et rationalisation du volume de batteries dont la production nuit à l’environnement [1].

Le volume restreint des batteries limite l’énergie électrique disponible. La propulsion électrique doit donc être utilisée opportunément sur un trajet pour atteindre les meilleures économies en carburant [2]. Dans les véhicules hybrides Renault [3], l’éco-navigation (EN) planifie l’utilisation optimale de cette énergie [4]. Par exemple, il est préférable de réserver la propulsion électrique aux rues citadines pour les démarrages fréquents, ou aux fortes pentes pour assister le moteur thermique.

L’optimalité du contrôle est assurée par un modèle de consommation énergétique. Plus ce modèle concordera avec la consommation réelle du véhicule, meilleurs seront les gains de carburant. Aujourd’hui, son paramétrage appelé « calibration » est ajusté avant la validation d’un nouveau véhicule. Or ce dernier sera utilisé dans des contextes très variables et est susceptible d’évoluer au cours du temps [5].

### B. Problème industriel

L’objectif de cette thèse est d’adapter le modèle énergétique d’un véhicule par apprentissage automatique. L’apprentissage facilitera la calibration du modèle énergétique avec les données de simulation et d’essais. Le modèle pourra ensuite être réajusté automatiquement en vie série pour rester conforme aux consommations réellement mesurées. Pour disposer d’une puissance de calcul suffisante, il sera déporté sur un serveur distant et connecté au véhicule.

Cette thèse s’inscrit dans la continuité d’une collaboration entre Renault et l’UTC sur l’amélioration du contrôle des émissions du groupe motopropulseur (GMP) [6], [7].

### C. Problème scientifique

L’enjeu scientifique est de maîtriser la robustesse de l’EN quand le modèle de consommation est appris avec des données incertaines. Pour cela, nous explorons les méthodes d’apprentissage automatique robuste du modèle de consommation (partie II) permettant la planification de trajectoire robuste de la décharge batterie (partie III).

## II. APPRENTISSAGE ROBUSTE

### A. Régression

Le modèle  $\Delta E_{ther}^*$  utilisé par l’EN, est appris par régression. Il s’agit de modéliser la consommation de carburant sur une section de route  $i$  en fonction du choix d’apport d’énergie électrique  $\Delta E_{elec}$  et des demandes énergétiques fonctionnelles du véhicule (propulsion  $\Delta E_{trac}$ , auxiliaires de l’habitacle  $\Delta E_{aux}$ , et freinage  $\Delta E_{brake}$ ).

$$\Delta E_{ther} \sim \Delta E_{ther}^*(\Delta E_{elec}, \Delta E_{trac}, \Delta E_{aux}, \Delta E_{brake}) \quad (1)$$

Notre contribution par rapport à l’existant [7] consiste à utiliser la régression par processus gaussiens (GP) [8] qui est robuste aux incertitudes.

### B. Incertitudes

L’utilisation de données industrielles risque de biaiser les estimations à cause de l’incertitude entachant les données. Nous distinguons trois sources d’incertitudes : les erreurs de mesures liées au bruit des capteurs, le manque de données lié à des plans d’expérience qui peuvent omettre certains cas d’usage rares, et les incertitudes de modélisation liées au choix a priori d’une famille restreinte de modèles et à un paramétrage inapproprié si le véhicule évolue.

L’apprentissage automatique robuste procure des estimations fiables en présence d’incertitudes grâce à l’évaluation d’un intervalle de plausibilité sur chaque estimation. La fiabilité s’obtient quand les estimations de consommation coïncident avec les mesures collectées sur le véhicule, et sont conformes aux lois physiques qui régissent le système dynamique considéré [9].

1) *Conformité des mesures*: Le GP assure la conformité des prédictions avec les mesures disponibles. Pour chaque prédiction gaussienne, un intervalle de prédiction à 95% peut être déduit avec les quantiles à 2.5% et 97.5% de la distribution. L'estimation est conforme quand l'intervalle contient la valeur mesurée. Cet intervalle agrège les trois types d'incertitude : les probabilités d'erreur de mesure de  $\Delta E_{ther}$ , les incertitudes de modélisation avec le formalisme bayésien, et les incertitudes épistémiques modélisées par les paramètres du noyau du GP.

2) *Conformité physique*: Pour l'instant, assurer la conformité du modèle de consommation aux lois de la physique consiste à vérifier que la consommation de carburant décroît avec l'apport d'énergie électrique. Cette contrainte de monotonie a pu être satisfaite en restreignant la famille de modèles a priori avec un noyau de fonctions logistiques.

### C. Résultats

L'apprentissage d'un modèle contraint ( $\mathcal{GP}(0, K_{aLBF})$ ) et non-contraint ( $\mathcal{GP}(0, K_{aSE})$ ) a été réalisé avec trois jeux de données collectées sur un PHEV Renault en simulation ( $\mathcal{D}_{sim}$ ), en validation ( $\mathcal{D}_{cycle}$ ), et sur route ouverte ( $\mathcal{D}_{road}$ ). La figure 1 présente les scores de validation croisée obtenus sur chaque jeux de test.

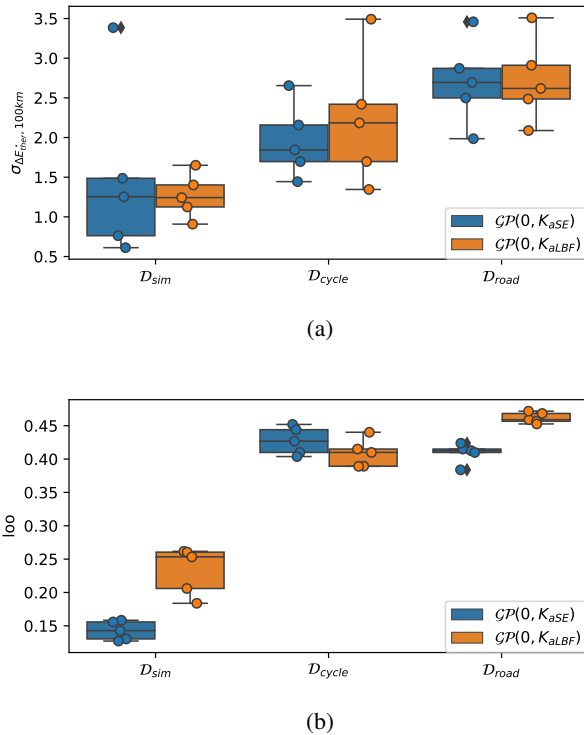


FIG. 1 – Comparaison du modèle non-contraint  $\mathcal{GP}(0, K_{aSE})$ , et contraint  $\mathcal{GP}(0, K_{aLBF})$  pour les trois jeux de données  $\{\mathcal{D}_{sim}, \mathcal{D}_{cycle}, \mathcal{D}_{road}\}$  : Écart-type de l'erreur d'estimation de la consommation totale en carburant pour un trajet de 100km (1a), et conformité d'estimation - *leave-one-out* [10] (1b).

Les erreurs d'estimation, d'écart-type inférieur à 3.5%, sont similaires pour les deux modèles mais augmentent avec les

incertitudes de mesure qui apparaissent sur un véhicule réel (figure 1a). La figure 1b montre une conformité des estimations améliorée avec la contrainte physique en simulation et sur route ; amélioration certainement due à la meilleure généralisation du modèle grâce à la contrainte de monotonie imposée permettant une meilleure cohérence physique.

### III. OPTIMISATION ROBUSTE

Le modèle de consommation robuste (1) est ensuite utilisé pour planifier la trajectoire de décharge batterie optimale  $\Delta \hat{E}_{elec}$  sur chaque section  $i = 1 \dots n$  d'un trajet. Cette planification veut minimiser l'estimation de consommation totale en carburant sur le trajet.

$$\Delta \hat{E}_{elec} = \min_{\forall \Delta E_{elec i}} \sum_{i=1 \dots n} \Delta E_{ther i}^* (\Delta E_{elec i}) \quad (2)$$

Ce problème est classiquement résolu par programmation dynamique [11] en utilisant l'estimation espérée  $\mathbb{E}[\Delta E_{ther i}^*]$ . Nous souhaitons maintenant prendre en compte les incertitudes pour assurer la robustesse de l'EN. Différentes philosophies sont envisageables [12] : minimiser le risque d'écarts sur la consommation totale  $\text{Var}[\Delta E_{ther i}^*]$  permettra d'assurer la robustesse de la planification, tandis que minimiser le pire cas de consommation  $\text{Sup}[\Delta E_{ther i}^*]$  assurera un niveau de charge suffisant pour des contextes anormalement énergivores (bouchons ou zone restreinte aux véhicules zéro émissions, etc). Nous comparerons ces différentes approches dans un travail futur.

### RÉFÉRENCES

- [1] N. Lutsey and D. Hall, "Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions," 2018.
- [2] A. Sciarretta and L. Guzzella, "Control of hybrid electric vehicles," *IEEE Control Systems*, vol. 27, pp. 60–70, 2007.
- [3] N. Fremau, A. Ketfi-Cherif, L. Cailleton, and H. Mukundan, "Renault new dedicated hybrid transmission for b and c segment," *SIA*, 2019.
- [4] A.-D. Ourabah, B. Quost, G. Atef, and T. Denoëux, "Estimating the energy consumption of a PHEV using vehicle and on-board navigation data," in *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2015)*, 2015, pp. 755–760.
- [5] G. Fontaras, N.-G. Zacharof, and B. Ciuffo, "Fuel consumption and co2 emissions from passenger cars in europe – laboratory versus real-world emissions," *Progress in Energy and Combustion Science*, vol. 60, pp. 97 – 131, 2017.
- [6] S. Castric, "Méthodes de recalage de modèles et application aux émissions des moteurs diesel," Ph.D. dissertation, Université de Technologie de Compiègne, 2007.
- [7] A.-D. Ourabah, "Prédiction énergétique d'un véhicule hybride rechargeable pour la réduction de consommation de carburant," Ph.D. dissertation, Université de Technologie de Compiègne, 2017.
- [8] C. E. Rasmussen and C. K. I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*. the MIT Press, 2006, pp. 7–30 and 105–128.
- [9] A. Karpatne, G. Atluri, J. H. Faghmous, M. S. Steinbach, A. Banerjee, A. R. Ganguly, S. Shekhar, N. F. Samatova, and V. Kumar, "Theory-guided data science : A new paradigm for scientific discovery from data," *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 29, pp. 2318–2331, 2016.
- [10] A. Vehtari, T. Mononen, V. Tolvanen, T. Sivula, and O. Winther, "Bayesian leave-one-out cross-validation approximations for gaussian latent variable models," 2016.
- [11] R. E. Bellman, *Dynamic Programming*, 1st ed. Princeton, NJ, USA : Princeton University Press, 1957.
- [12] N. V. Sahinidis, "Optimization under uncertainty : state-of-the-art and opportunities," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 28, no. 6, pp. 971–983, 2004.

# Fusion of evidential CNN classifiers for image classification

TONG Zheng

Directeurs de thèse : Thierry Dencœur

Équipe : CID

**Résumé**—We propose an information-fusion approach based on belief functions to combine convolutional neural networks. In this approach, several pre-trained DS-based CNN architectures extract features from input images and convert them into mass functions on different frames of discernment. A fusion module then aggregates these mass functions using Dempster’s rule. An end-to-end learning procedure allows us to fine-tune the overall architecture using a learning set with soft labels, which further improves the classification performance. The effectiveness of this approach is demonstrated experimentally using three benchmark databases.

## I. INTRODUCTION

Deep learning-based models, especially convolutional neural networks (CNNs) and their variants, have been widely used for image classification and have achieved remarkable success. To train such networks, several image data sets are available, with different sets of classes and different granularities. For instance, a dataset may contain images from dogs and cats, while another one may contain images from several species of dogs. The problem then arises of combining networks trained from such heterogenous datasets. The fusion procedure should be flexible enough to allow the introduction of new datasets with different sets of classes at any stage.

We present a modular fusion strategy based on DS theory for combining different CNNs. Several pre-trained DS-based CNN architectures, also known as evidential deep-learning classifiers in [9], extract features from input images and convert them to mass functions defined on different frames of discernment. A fusion module then aggregates these mass functions by Dempster’s rule, and the aggregated mass function is used for classification in a refined frame. An end-to-end learning procedure allows us to fine-tune the overall architecture using a learning set with soft labels, which further improves the classification performance. The effectiveness of the approach is demonstrated experimentally using three benchmark databases: CIFAR-10 [1], Caltech-UCSD Birds 200 [2], and Oxford-IIIT Pet [3].

## II. PROPOSED APPROACH

### A. Overview

The main idea of the proposed approach is to combine different pre-trained evidential CNN classifiers by plugging a mass-function fusion module at the outputs of these CNN architectures. The architecture of the proposed approach, called mass-fusion evidential CNN (MFE-CNN) classifier, is illustrated in Figure 1 and can be defined by the following three-step procedure.

Step 1: An input image is classified by  $N$  pre-trained DS-based CNN architectures [4]. The  $n$ -th CNN architecture,  $n=1, \dots, N$ , extracts a feature vector from the input, as done in a probabilistic CNN [5]. The vector are then fed into an evidential distance-based neural-network layer, called the DS layer [6], which computes a mass function  $m^n$  on the frame of discernment  $\Theta^n$  composed of  $M(n)$  classes  $\theta^{n_1}, \dots, \theta^{n_{M(n)}}$  and an “anything else” class  $\theta^{n_0}$ . Given the design of the DS layer, the focal sets of mass function  $m^n$  are the singletons and  $\Theta^n$ . The outputs after this first step are the  $N$  mass functions  $m^1, \dots, m^N$  defined on  $N$  compatible frames  $\Theta^1, \dots, \Theta^N$ .

Step 2: A mass-function fusion module aggregates the  $N$  mass functions by Dempsters’ rule. Let  $\Omega$  be a common refinement of the  $N$  frames  $\Theta^1, \dots, \Theta^N$ . A combined mass function  $\tilde{m}$  on  $\Omega$  is computed as the orthogonal sum of the  $N$  mass functions  $\tilde{m} = m^1 \oplus \dots \oplus m^N$ . This final output of the mass-function fusion module represents the total evidence about the class of the input image based on the outputs of the  $N$  CNN classifiers.

Step 3: The pignistic criterion is used for decision-making, in which the mass functions  $\tilde{m}$  are converted into the pignistic probability  $BetP_{\tilde{m}}$  as

$$BetP_{\tilde{m}}(\{\omega\}) = \sum_{\{A \subseteq \Omega: \omega \in A\}} \frac{\tilde{m}(A)}{|A|},$$

for all  $\omega \in \Omega$ , and the final prediction is  $\hat{\omega} = \underset{\omega \in \Omega}{\operatorname{argmax}} BetP_{\tilde{m}}(\omega)$ .

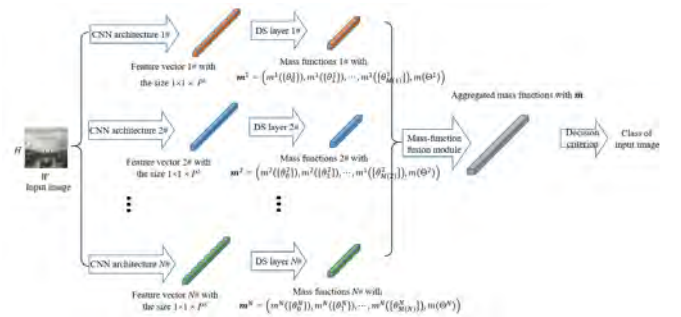


Fig. 1. Architecture of a MF-ECNN classifier.

### B. Learning

An end-to-end learning procedure is proposed to fine-tune all the parameters in a MFE-CNN classifier using a learning set with soft labels, in order to improve the classification performance. In the procedure, the learning sets of different pre-trained CNN architectures are merged into a single one. As some labels become imprecise after merging, they are referred to as soft labels. For example, the “bird” label in the CIFAR-10 [1]



database becomes imprecise when the database is merged with the Caltech-UCSD Birds 200 database containing 200 bird species [2]. To fine-tune the different classifiers using a learning set with soft labels, we define a label as a nonempty subset  $A \in 2^\Omega \setminus \emptyset$  of classes an image may belong to. Label  $A$  indicates that the true class is known to be one element of set  $A$ , but one cannot determine which one specifically if  $|A| > 1$ .

In the fine-tuning phase, all parameters in a MFE-CNN classifier are initialized by the parameters in pre-trained CNNs. Given a learning image with nonempty soft label  $A \subseteq \Omega$  and output pignistic probability  $\text{Bet}P_{\tilde{m}}$ , we define the loss as:

$$\mathcal{L}(\text{Bet}P_{\tilde{m}}, A) = -\log \text{Bet}P_{\tilde{m}}(A) = -\log \sum_{\omega \in A} \text{Bet}P_{\tilde{m}}(\omega).$$

This loss function is minimized when the pignistic probability of soft label  $A$  equals 1. The gradient of this loss w.r.t all network parameters can be back-propagated from the output layer to the input layer.

### III. EXPERIMENT

Table 1 shows the test average accuracies of the evidential and probabilistic classifiers trained from each of the three datasets, as well as the performances of the different fusion strategies (with and without fine tuning) on each individual dataset, and on the union of the three datasets.

Looking at the performance of the MFE strategy, we can see that, after fusion, the accuracies on the CIFAR-10 and Oxford databases increase, but the accuracy on the CUB database does not change. As shown in Table 2, the accuracies for the “cat”, “dog”, “bird” classes on the CIFAR-10 database increase, but the ones of other classes do not change after fusion. These observations show that the proposed approach makes it possible to combine CNN classifiers trained from heterogenous databases to obtain a more general classifier able to recognize classes from any of the databases, without degrading the performance of the individual classifiers, and sometimes even showing better performance for some classes.

Looking at the performance of the MFE strategy, we can see that, after fusion, the accuracies on the CIFAR-10 and Oxford databases increase, but the accuracy on the CUB database does not change. As shown in Table 3, the accuracies for the “cat”, “dog”, “bird” classes on the CIFAR-10 database increase, but the ones of other classes do not change after fusion. These observations show that the proposed approach makes it possible to combine CNN classifiers trained from heterogenous databases to obtain a more general classifier able to recognize classes from any of the databases, without degrading the performance of the individual classifiers, and sometimes even showing better performance for some classes.

### IV. CONCLUSION

In the study, we have proposed a fusion approach based on belief functions to combine different CNNs for image classification. The proposed approach makes it possible to combine CNN classifiers trained from heterogenous databases

with different sets of classes. The combined classifier is able to classify images from any of these databases while having at least as good performance as those of the individual classifiers on their respective databases. Besides, the proposed approach makes it possible to combine additional classifiers trained from new datasets with different sets of classes at any stage. An end-to-end learning procedure further improves the performance of the proposed architecture.





Table 1: Test classification accuracies of different classifiers. “E2E” stand for fine-tuned classifiers. E- and P-FitNit-4 are the evidential and probabilistic CNN classifiers before fusion.

	Classifier	CIFAR-10	CUB	Oxford	Overall
Before fusion	E-FitNit-4	0.936	0.934	0.898	-
	P-FitNit-4	0.935	0.926	0.895	-
After fusion	MFE	0.950	0.934	0.901	0.936
	PMF	0.941	0.927	0.898	0.929
	BF	0.938	0.911	0.889	0.923
	E2E MFE	<b>0.955</b>	0.935	0.902	<b>0.940</b>
	E2E PMF	0.946	0.927	0.899	0.932
	E2E BF	0.938	0.913	0.891	0.924
	E2E EFC	0.931	0.928	0.887	0.921
	E2E PFC	0.938	<b>0.936</b>	<b>0.903</b>	0.930

Table 2: Test accuracy before and after information fusion on CIFAR-10.

	Classifier	aero	mobile	bird	cat	deer	dog	frog	horse	ship	truck
Before fusion	E-FitNit-4	0.976	0.961	0.936	0.865	0.910	0.899	0.944	0.932	0.965	0.973
	P-FitNit-4	0.984	0.974	0.913	0.843	0.904	0.875	0.958	0.947	0.981	0.974
After fusion	E2E MFE	0.978	0.961	0.981	0.937	0.915	0.961	0.945	0.935	0.965	0.973
	E2E PMF	0.984	0.975	0.950	0.872	0.910	0.908	0.958	0.947	0.982	0.974
	E2E BF	0.985	0.975	0.919	0.860	0.910	0.890	0.959	0.948	0.982	0.975

Table 3: Examples of mass functions (MF’s) before and after fusion by the MFE strategy.

Instance/label	Before fusion		MF on $\Omega$ after fusion	
	MF from CIFAR-10	MF from CUB	MF from Oxford	MF on $\Omega$
 /airplane	$m(\{\text{airplane}\}) = 0.506$	$m(\{\text{caspinan}\}) = 0.098$	$m(\{\text{samyod}\}) = 0$	$m(\{\text{airplane}\}) = 0.191$
	$m(\{\text{bird}\}) = 0.882$	$m(\{\text{horned grebe}\}) = 0.109$	$m(\{\text{pyrenees}\}) = 0.001$	$m(\{\text{caspinan}\}) = 0.672$
	$m(\emptyset) = 0.065$	$m(\emptyset) = 0.095$	$m(\emptyset) = 0.905$	$m(\Omega) = 0.007$
 /caspinan	$m(\{\text{airplane}\}) = 0.009$	$m(\{\text{caspinan}\}) = 0.423$	$m(\{\text{samyod}\}) = 0$	$m(\{\text{caspinan}\}) = 0.415$
	$m(\{\text{bird}\}) = 0.823$	$m(\{\text{horned grebe}\}) = 0.452$	$m(\{\text{pyrenees}\}) = 0.001$	$m(\{\text{horned grebe}\}) = 0.450$
	$m(\emptyset) = 0.092$	$m(\emptyset) = 0.084$	$m(\emptyset) = 0.951$	$m(\Omega) = 0.009$
 /byssinian	$m(\{\text{cat}\}) = 0.742$	$m(\{\text{caspinan}\}) = 0.002$	$m(\{\text{byssinian}\}) = 0.412$	$m(\{\text{byssinian}\}) = 0.414$
	$m(\{\text{dog}\}) = 0.131$	$m(\{\text{horned grebe}\}) = 0$	$m(\{\text{bengal}\}) = 0.503$	$m(\{\text{bengal}\}) = 0.505$
	$m(\emptyset) = 0.032$	$m(\emptyset) = 0.991$	$m(\emptyset) = 0.038$	$m(\Omega) = 0.005$
 /keeshond	$m(\{\text{cat}\}) = 0.158$	$m(\{\text{albatross}\}) = 0.001$	$m(\{\text{rogdoll}\}) = 0.082$	$m(\{\text{rogdoll}\}) = 0.369$
	$m(\{\text{dog}\}) = 0.705$	$m(\{\text{horned grebe}\}) = 0$	$m(\{\text{keeshond}\}) = 0.254$	$m(\{\text{keeshond}\}) = 0.485$
	$m(\emptyset) = 0.058$	$m(\emptyset) = 0.975$	$m(\emptyset) = 0.001$	$m(\{\text{cat}\}) = 0.021$

## References

- [1] Krizhevsky, A., Hinton, G.: Learning multiple layers of features from tiny images. Tech. rep., University of Toronto (2009)
- [2] Welinder, P., Branson, S., Mita, T., Wah, C., Schroff, F., Belongie, S., Perona, P.: Caltech-UCSD Birds 200. Tech. Rep. CNS-TR-2010-001, California Institute of Technology (2010)
- [3] Parkhi, O.M., Vedaldi, A., Zisserman, A., Jawahar, C.V.: Cats and dogs. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Providence, Rhode Is-land (2012).
- [4] Tong, Z., Xu, P., Deneux, T.: An evidential classifier based on Dempster-Shafer theory and deep learning. Neurocomputing (2021), arXiv preprint arXiv:2103.13549.
- [5] Deneux, T.: A neural network classifier based on dempster-shafer theory. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans 30(2), 131–150 (2000).
- [6] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G.: Deep learning. nature 521(7553), 436–444 (2015).

# Éthique et sincérité des systèmes d'aide à la décision

Hénoïk WILLOT

Directeurs de thèse : Khaled BELAHCENE, Sébastien DESTERCKE

Équipe : CID

**Résumé**—Donner une justification à une décision prise automatiquement par un système d'aide à la décision, peu importe le type de système (vote, multi-agent, multi-critère), est nécessaire d'un point de vue sociétal et juridique. Un premier objectif de cette thèse est d'identifier à quoi correspond une explication en fonction du système d'aide à la décision, à quel interlocuteur elle est destinée (analyste, consommateur, juriste) puis de définir un processus de génération.

## I. CONTEXTE

Les systèmes d'aide à la décision sont de plus en plus présents dans la société sous différentes formes : recommandation de produits personnalisés pour un client, décision collégiale à partir d'avis divers issus d'un comité d'experts, structuration de la pensée d'un interlocuteur à partir d'exemples *etc.* Ces systèmes étant destinés à des usagers différents requièrent des traitements différents. Par exemple, dans le cadre d'un système fournissant des recommandations à un utilisateur final, il est nécessaire de prouver que certaines données critiques ne sont pas utilisées, ou dans le cas contraire montrer comment elles sont utilisées et protégées afin de répondre à la législation RGPD, sans exposer le modèle utilisé au public.

Fournir une explication dépend bien évidemment aussi du type de modèle de représentation des connaissances. Dans le cadre de la fusion d'information, nous pouvons nous référer à Dubois et al. [1] qui proposent un *framework* se basant sur les différentes propriétés que l'on peut souhaiter rechercher dans une fonction de fusion tout en les appliquant dans différents modèles de modélisation d'incertitude. Une fonction de fusion permet, à partir d'un ensemble de profils d'informations, par exemple un ensemble d'avis d'experts, de générer un profil d'information. La nature de ce profil "fusionné" dépend énormément, bien entendu, des propriétés vérifiées par la fonction. Se servir de ces propriétés est une possibilité afin de justifier la nature du résultat de la fusion d'avis venant de différentes sources, et aussi de différentes qualités grâce à la modélisation de l'incertitude. Une méthodologie similaire a été appliquée par Brandt et al. [2] pour l'agrégation de formules logiques.

Dans le cadre de la recommandation, différentes approches existent, dépendant évidemment du type de représentation. Un bon exemple d'explication apportée dans ce cadre est donné par Labreuche, Maudet et Ouerdane [3]. Pour

un système de recommandation appliquant le principe de Condorcet<sup>1</sup> accompagné d'informations sur des comparaisons d'importance entre critères, ils proposent d'expliquer une recommandation en exhibant un ensemble de critères d'importance suffisante pour appuyer le sens de la préférence. Ce type d'explication reste assez technique et proche de la façon dont a été modélisé le modèle, et semble donc plus destiné à un analyste.

Une autre proposition de génération d'explication de recommandations est formulée par Belahcene et al. [4]. Cette dernière s'organise, pour expliquer la préférence d'un candidat  $a$  sur un candidat  $b$ , autour d'une suite de préférences simples à comprendre, partant de  $a$  et arrivant à  $b$ . Elle permet donc d'expliquer la préférence établie par le modèle, et donc difficile à accepter en l'état par l'utilisateur, au moyen d'une série de préférences qui, prises individuellement, sont triviales et compatibles avec les informations recueillies sur les préférences de ce dernier.

Afin de résumer brièvement cet état de l'art non exhaustif, le type d'explication possible dépend fortement du domaine ainsi que du type de modèle. Ces modèles sont utilisés en décision, multi-critère, multi-agent ou encore dans l'incertain, et se basent sur des propriétés différentes. À partir de cette analyse, nous nous sommes orientés dans le cadre de ce début de thèse sur l'explication d'un modèle particulier, la somme pondérée ordonnée (OWA) à partir d'explications semblables à celles utilisées dans [4] qui nous semblent plus facilement compréhensibles vu qu'elles reposent uniquement sur les axiomes de base du modèle et sur les données fournies par l'utilisateur.

## II. À QUOI POURRAIT RESSEMBLER UNE EXPLICATION POUR UNE SOMME PONDÉRÉE ORDONNÉE ?

Avant de parler de la forme que pourrait prendre une explication pour ce modèle, nous allons présenter la somme pondérée ordonnée. Historiquement ce modèle est issu de la décision multi-critère, introduit par Yager [5], mais est aussi applicable en décision multi-agents. Soit  $\mathcal{X}$  un ensemble de  $n$  critères  $X_i$  définis chacun sur  $[0, 1]$ . Tous les candidats  $x$  sont définis par leur vecteur sur les critères de  $\mathcal{X}$ ,  $x = (x_1 \dots x_n) \in \mathcal{X}$ .

1. un candidat  $a$  est préféré à un candidat  $b$  s'il y a plus de preuves que  $a$  est préféré à  $b$  que de preuves que  $b$  est préféré à  $a$

**Définition II.1** (Somme pondérée ordonnée). *La somme pondérée ordonnée, notée  $OWA_w$ , est une fonction  $\mathcal{X} \rightarrow \mathbb{R}^+$  définie par un vecteur  $w \in \mathcal{W}$  tel que  $w_i \in [0, 1]$  et  $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ . Cette fonction associe à un candidat  $x \in \mathcal{X}$  :*

$$OWA_w(x) = \sum_{i=1}^n w_i \times x_{(i)}$$

avec  $(\cdot)$  la permutation vérifiant  $x_{(1)} \leq x_{(2)} \leq \dots \leq x_{(n)}$

Nous pouvons donc faire le lien entre la somme pondérée ordonnée et la somme pondérée classique par sa forme, mais les modèles décrits sont différents grâce à la non linéarité introduite par la permutation  $(\cdot)$ . Ainsi il est possible de décrire n'importe quel quantile (y compris le min et le max) avec un jeu de poids  $w$  adéquat.

Il est possible de généraliser le modèle afin d'obtenir une somme pondérée ordonnée robuste à la manière de Mitchell [6] et ainsi de raisonner avec un ensemble  $\mathbb{W} \subseteq \mathcal{W}$  de fonctions  $OWA_w$  compatibles avec les informations recueillies, *i.e.* si nous avons recueilli que le candidat  $x$  est préféré au candidat  $y$  alors  $\forall w \in \mathbb{W} \ OWA_w(x) \geq OWA_w(y)$ .

Une élicitation de ce modèle peut se faire de manière analogue à la méthode GRIP définie par Figueira et al. [7] dans le cadre de la somme pondérée, et des relations de préférences nécessaires et possibles peuvent être inférées [8]. On dit que  $x$  est nécessairement (resp. possiblement) préféré à  $y$  par notre somme pondérée ordonnée robuste  $\mathbb{W}$  si  $\forall w \in \mathbb{W}$  (resp.  $\exists w \in \mathbb{W}$ )  $OWA_w(x) \geq OWA_w(y)$ .

De manière générale, les sommes pondérées ordonnées sont utilisées afin de représenter un comportement tiré vers l'équité vu qu'ils autorisent de mettre plus de poids sur les valeurs les plus faibles de chaque candidat (le plus extrême étant le min). Nous pouvons donc nous intéresser à un sous-ensemble spécifique de modèles de  $\mathcal{W}$ , noté  $\mathcal{W}^{\searrow}$  qui vérifie cette propriété d'équité "plus de poids sont attribués aux valeurs les plus faibles",  $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n$ . Nous appellerons ce type de somme pondérées ordonnées "équilibrante". Nous définissons la somme pondérée ordonnée équilibrante robuste par l'ensemble de fonctions  $\mathbb{W} \in \mathcal{W}^{\searrow}$

Il est aisé de voir qu'avec cette condition, les modèles de  $\mathcal{W}^{\searrow}$  vérifient le principe de Pigou-Dalton, introduit par Shorrocks [9] en économie.

Dans le cadre de l'économie, les  $n$  critères sont en fait les revenus de  $n$  agents, que l'on classe du moins riche au plus riche (soit l'application de la fonction  $(\cdot)$ ). Une distribution de revenus  $u$  est préférée par le principe de Pigou-Dalton à une distribution  $u'$  si et seulement si elles sont égales sur tous les agents sauf les agents  $i$  et  $j$ ,  $i < j$ , et qu'ils vérifient la condition de transfert suivante :  $u_i = u'_i + \epsilon$ ;  $u_j = u'_j - \epsilon$ , tel que  $\epsilon$  est suffisamment petit pour ne pas changer la répartition de la distribution. Le principe de Pigou-Dalton établit donc que, toutes choses étant égales par ailleurs, un petit transfert

venant réduire l'inégalité entre les revenus les plus pauvres et les plus riches est à préférer.

En revenant à nos sommes pondérées ordonnées équilibrantes, ce principe est vérifié étant donné qu'avec la condition  $w_1 \geq w_2 \geq \dots \geq w_n$  on a  $\epsilon \times w_i \geq \epsilon \times w_j$ .

Nous pouvons donc nous demander s'il est possible d'expliquer certains, voire peut-être tous, les résultats d'une somme pondérée ordonnée équilibrante au travers d'une série d'utilisation du principe de Pigou-Dalton, jumelé avec de la dominance de Pareto<sup>2</sup>, et d'expliquer la version robuste en rajoutant l'information récoltée depuis l'utilisateur.

Ce type d'explication se rapproche de celles définies dans [4] puisqu'elles sont basées sur un échange entre deux variables pour le transfert de Pigou-Dalton, échange qui définit une préférence immédiatement compréhensible par l'utilisateur compte tenu que c'est sa volonté d'équité qui a mené à utiliser ce modèle. Il utilise également de la dominance de Pareto, qui est naturelle (entre deux candidats strictement équivalents mais dont un possède un avantage strict, nous choisissons toujours le meilleur), ainsi que les préférences que l'utilisateur nous a déjà exprimé. Une explication basée sur ces principes semble a priori pouvoir être facilement comprise par l'utilisateur.

#### REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes directeurs de thèse pour leur accompagnement ainsi que le Sorbonne Center for Artificial Intelligence (SCAI) qui finance cette thèse.

#### RÉFÉRENCES

- [1] D. Dubois, W. Liu, J. Ma, and H. Prade, "The basic principles of uncertain information fusion. An organised review of merging rules in different representation frameworks," *Information Fusion*, vol. 32, pp. 12–39, 2016, publisher : Elsevier.
- [2] F. Brandt, V. Conitzer, U. Endriss, J. Lang, and A. D. Procaccia, *Handbook of computational social choice*. Cambridge University Press, 2016.
- [3] C. Labreuche, N. Maudet, and W. Ouerdane, "Justifying Dominating Options when Preferential Information is Incomplete." in *20th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'12)*, vol. 242. IOS Press, 2012, pp. 486–491.
- [4] K. Belahcene, C. Labreuche, N. Maudet, V. Mousseau, and W. Ouerdane, "Explaining robust additive utility models by sequences of preference swaps," *Theory and Decision*, vol. 82, no. 2, pp. 151–183, 2017, number : 2 Publisher : Springer.
- [5] R. R. YAGER, "On ordered weighted averaging aggregation operators in multicriteria decisionmaking," in *Readings in Fuzzy Sets for Intelligent Systems*, D. Dubois, H. Prade, and R. R. Yager, Eds. Morgan Kaufmann, 1993, pp. 80–87.
- [6] T. M. Mitchell, "Generalization as search," *Artificial intelligence*, vol. 18, no. 2, pp. 203–226, 1982, number : 2 Publisher : Elsevier.
- [7] J. R. Figueira, S. Greco, and R. Slowiński, "Building a set of additive value functions representing a reference preorder and intensities of preference : GRIP method," *European Journal of Operational Research*, vol. 195, no. 2, pp. 460–486, 2009, number : 2 Publisher : Elsevier.
- [8] A. Giarlotta and S. Greco, "Necessary and possible preference structures," *Journal of Mathematical Economics*, vol. 49, no. 2, pp. 163–172, 2013, number : 2.
- [9] A. F. Shorrocks and J. E. Foster, "Transfer sensitive inequality measures," *The Review of Economic Studies*, vol. 54, no. 3, pp. 485–497, 1987, number : 3 Publisher : Wiley-Blackwell.

$$2. \forall (x, y) \in \mathcal{X} \times \mathcal{X} \ x \succeq_{Pareto} y \iff \forall i \ x_i \geq y_i \text{ and } \exists j \ x_j > y_j$$

# A cautious and explainable classifier

Haifei ZHANG

Directeurs de thèse : Benjamin QUOST, Marie-Hélène MASSON

Équipe : CID

**Abstract**—The objective of the thesis is to construct a cautious explainable classifier to manage uncertainty from data. Different from traditional classifiers, cautious classifiers are allowed to make imprecise decisions when the accessible data are insufficient to support precise decisions. Meanwhile, the explanation of decisions can help users better understand the sources of uncertainty related to decisions.

## I. INTRODUCTION

Machine learning algorithms, an important branch of artificial intelligence, have achieved remarkable success in many fields. Classification problem is one of the most important issues for machine learning, in which, usual classifiers choose one of the alternative labels as a prediction. This prediction mechanism often returns wrong predictions in case of high level uncertainty, e.g., scarce data. A better solution in such contexts is to construct cautious classifiers, i.e., which are allowed to make imprecise decisions, such as set-valued predictions.

Another challenge for machine learning is interpretability and explainability. Increasingly complex models are being proposed and applied in order to obtain a better accuracy, leading to difficulties for users to understand why the model makes such predictions when it is fed with specific data. Consequently, explainable artificial intelligence (XAI) [1], [2], aiming at providing explanations for decisions made by a model, has recently received a lot of attention. In addition to naturally interpretable models, for example, linear models, logistic regression, and decision tree, several propositions have been made to add explainability to a model [3].

Based on the above two motivations, we are interested in establishing cautious explainable classifiers based on random forests. Random forests are known to be an accurate classifier [4]. The decision tree, which is the base classifier in a random forest, makes decisions based on the proportion of samples of each category in the leaves. It is quite easy to construct imprecise outputs in the form of upper and lower bound probabilities, e.g., through the Imprecise Dirichlet Model [5]. Moreover, the interpretation based on the combination of decision trees will be more readily available and easily understood due to the naturally interpretability property of a decision tree.

## II. PROGRESS

In the first year of the thesis, we mainly focused on constructing cautious random forests. We have extended the majority and weighted voting mechanisms under precise classification to imprecise classification applying Imprecise Dirichlet Model and belief function theory [6]–[8].

### A. Combining credal decision trees

We focus here on a binary classification problem. Assuming a training data set  $(x_i, y_i)$  with  $i = 1, \dots, N$ , where  $y_i \in \{0, 1\}$ , the probability that sample  $x_i$  belongs to category 0 (respectively, 1) is written  $p_{i,0}$  (resp.,  $p_{i,1}$ ). We consider a random forest composed of  $T$  trees  $\{C_1, \dots, C_t, \dots, C_T\}$  whose leaf information is summarized by  $(n_i^t, N_i^t)$ , where  $n_i^t$  is the number of samples of category 1 and  $N_i^t$  is the total number of training samples falling into the leaf  $i$  of tree  $t$ .

The Imprecise Dirichlet Model gives an interval-valued estimate  $I_i^t = [p \quad \bar{p}_{i,1}]$  of  $p_{i,1}$ :

$$I_i^t = \left[ \frac{n_i^t}{N_i^t + s}, \frac{n_i^t + s}{N_i^t + s} \right] \quad t = 1, \dots, T, \quad (1)$$

where the parameter  $s$ , which controls the level of uncertainty, can be interpreted as a number of virtual samples with unknown class information.

We have proposed to aggregate these intervals by computing the belief and the plausibility of the interval  $[0.5; 1]$ , i.e. that the available evidence points towards class 1 for instance  $x_i$ :

$$\begin{aligned} bel_{i,1} &= bel(p_{i,1} \in [0.5, 1]) \\ &= \sum_{t=1}^T w_i^t \mathbb{I}([p_{i,1}^t] \geq 0.5), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} pl_{i,1} &= pl(p_{i,1} \in ]0.5, 1]) \\ &= \sum_{t=1}^T w_i^t \mathbb{I}([\bar{p}_{i,1}^t] > 0.5), \end{aligned} \quad (3)$$

where  $w_i^t$  ( $t = 1, \dots, T$ ) is the weight of interval  $I_i^t$  in the aggregation process. A natural choice is  $w_i^t = 1/T$ , which is majority voting. A decision can then be made by applying interval dominance to  $bel_{i,1}$  and  $pl_{i,1}$ : we would choose class 1 whenever  $bel_{i,1} > 0.5$ , class 0 whenever  $pl_{i,1} < 0.5$ , and leave the decision as indeterminate otherwise.

The  $U_{65}$  and  $U_{80}$  criteria [9] are commonly used for comparing imprecise classification results. In the case of binary classification,  $U_{65}$  (respectively,  $U_{80}$ ) rewards precise and correct decisions with  $\frac{1}{N}$ , and indeterminate ones with  $\frac{0.65}{N}$  (resp.,  $\frac{0.8}{N}$ ), thus making being cautious attractive while still penalizing indeterminate predictions.

### B. Leaf weights

We have proposed here two alternatives, which depend on the number of instances in the leaves. The first one is

$$w_i^t = \frac{N_i^t}{\sum_{j=1}^T N_i^j}, \quad \forall t = 1, \dots, T; \quad (4)$$

using (4), leaves with fewer samples bring weaker evidence. The second one defines, for  $t = 1, \dots, T$ ,

$$w_i^t = \frac{1 - u_i^t}{\sum_{j=1}^T (1 - u_i^j)}, \quad \text{with} \quad u_i^t = \frac{s}{N_i^t + s}, \quad (5)$$

where  $u_i^t$  is the level of epistemic uncertainty for instance  $x_i$  and for the  $t$ th tree. Intuitively, with this proposal, leaves with a smaller epistemic uncertainty get larger weights.

The details and experimental results of this part of work are described in the paper accepted at ISIPTA21 [10].

### C. Tree weights

Another path, which we currently work on, is to automatically learn weights associated with trees, i.e.,  $w_i^t = w^t$  for  $i = 1, \dots, N$ . According to (2) and (3), we proposed a new cost function defined as:

$$J(\mathbf{w}) = \sum_{i=1}^n [y_i H(0.5 - bel_{i,1}) + (1 - y_i) H(pl_{i,1} - 0.5)] - \gamma H((0.5 - bel_{i,1})(pl_{i,1} - 0.5)) + \lambda \|\mathbf{w}\|_2^2 \quad (6)$$

where  $H$  is the Heaviside function. With these definitions, we get a cost matrix like

	y=0	y=1
$\hat{y} = 0$	0	1
$\hat{y} = 1$	1	0
$\hat{y} = \{0, 1\}$	$1 - \gamma$	$1 - \gamma$

The idea behind the cost function is to directly optimize the criterion used for the evaluation of a cautious model. If an instance is classified precisely and correctly (respectively, incorrectly), the cost is 0 (resp., 1). If an instance is classified imprecisely, the cost will be  $1 - \gamma$ . Here, the value of  $\gamma$  can be interpreted as an optimization to the global performance evaluation in imprecise classification. For example,  $\gamma = 0.65$  optimizes the  $U_{65}$  score and  $\gamma = 0.8$  the  $U_{80}$  score. Thus, the larger  $\gamma$  is, the more cautious the model will be. Furthermore, in (6),  $\lambda \|\mathbf{w}\|_2^2$  is a regularization term to prevent overfitting. In practice, the sigmoid function is applied as an approximation to  $H$ :

$$u(x) = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha x)} = \frac{\exp(\alpha x)}{1 + \exp(\alpha x)} \quad (7)$$

In this part, we have explored robustness against label noise, by flipping a controlled proportion of labels in the training data. From the experimental results so far, our method is more cautious than simple majority voting, regardless of the level of noise. Our model is also more accurate for samples that are precisely classified. In Fig. 1, boxplots are used to illustrate the relative improvement of our model over simple majority voting on the  $U_{65}$  score under different levels of noise across 14 data sets. The results demonstrate that the more severe the noise, the more remarkable the superiority of our model.

### III. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In the first year, a binary cautious classifier based on random forests, the Imprecise Dirichlet Model and belief function theory has been proposed. Different tree aggregation methods

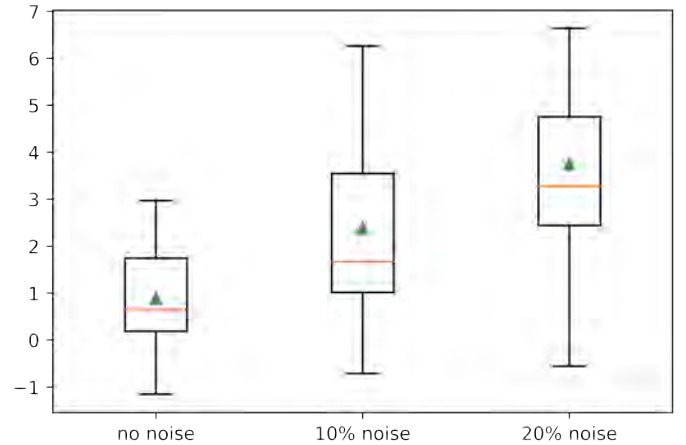


Fig. 1. Relative improvement (%) on  $U_{65}$  score of our method over majority voting.

have been investigated. In the future, our research will focus on extending our method to multi-class problems. Different weights associated with trees and leaves will also be explored. Finally, we will provide an explanation for the decision of our model, especially why a decision is imprecise. The analysis of the weights will be the first step towards this explanation, for example, to construct feature importance measurement or to generate most approximate counterfactual instance.

### REFERENCES

- [1] A. Barredo Arrieta, N. Díaz-Rodríguez, J. Del Ser *et al.*, “Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI,” *Information Fusion*, vol. 58, pp. 82–115, 2020.
- [2] A. Adadi and M. Berrada, “Peeking Inside the Black-Box: A Survey on Explainable Artificial Intelligence (XAI),” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 52 138–52 160, 2018.
- [3] C. Molnar, *Interpretable Machine Learning. A Guide for Making Black Box Models Explainable*. Lulu, 2019.
- [4] L. Breiman, “Random forests,” *Machine Learning*, vol. 45, pp. 5–32, 2001.
- [5] P. Walley, “Inferences from Multinomial Data: Learning About a Bag of Marbles,” *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, vol. 58, pp. 3–34, 1996.
- [6] A. P. Dempster, “Upper and Lower Probabilities Induced by a Multi-valued Mapping,” *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 38, pp. 325–339, 1967.
- [7] G. Shafer, *A mathematical theory of evidence*. Princeton university press, 1976.
- [8] T. Denœux, “Extending stochastic ordering to belief functions on the real line,” *Information Sciences*, vol. 179, pp. 1362–1376, 2009.
- [9] M. Zaffalon, G. Corani, and D. Mauá, “Evaluating credal classifiers by utility-discounted predictive accuracy,” *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 53, pp. 1282–1301, 2012.
- [10] H. Zhang, B. Quost, and M.-H. Masson, “Cautious Random Forests : a new decision strategy and some experiments,” in *International Symposium on Imprecise Probability: Theories and Applications (ISIPTA)*, 2021.



**EQUIPE SCOP**

# Robust and Secure Communication Time Allocation Models for the Scalable Internet of Things: Application to Smart Cities and Mobility

Khaled ABID

Thesis directors : Hicham LAKHLEF, Abdelmadjid BOUABDALLAH

Team : SCOP

**Abstract**—MAC protocols for wireless decentralized networks in IoT aims to coordinate access among IoT devices to the shared wireless medium. To face the main communication challenges between IoT devices such as collisions and conflicts as well as mobility, it is crucial to design an efficient MAC protocol. In this thesis, we are working on MAC protocols for wireless decentralized networks. We have conducted a state-of-the-art review.

## I. MOTIVATION

Different from wired and optical ones, wireless networks suffer from limited bandwidth. This limitation comes from the nature of the shared medium between nodes "Air". Also, simultaneous transmission of two or more nodes causes collisions and conflicts [1] when they are in each other's coverage area. A collision occurs when a node receives messages from two or more neighbors at the same time. A conflict occurs when, during the same time, two neighbors send a message to each other. Therefore, a wireless communication requires the design of appropriate MAC protocol to control the access of nodes to the shared medium [2]. However, several challenges need to be addressed at the MAC layer level to provide good Quality of Service (QoS) [3].

In our survey, we propose a new classification criterion of MAC protocols by taking into consideration the different mobility models. We will classify them according to their applicability on networks with different mobility degrees. We also consider and study existing intelligent solutions which will revolutionize communication in IoT [4].

## II. CONTRIBUTION

In our survey, we classified MAC protocols into three main types according to network's mobility degree. To better understand the difference between these three types of networks based on their mobility degree, we first present the main characteristics of each one of them as follows:

- **Static network:** composed by a set of connected static IoT devices (fixed location sensors etc.) by wireless link. According to this definition, network topology never changes during the operation. These nodes are generally deployed with high density and have a long lifetime. Some applications of static networks are agriculture,

surveillance and industry.

- **Low and medium mobility networks:** composed by a set of connected mobile nodes by wireless links forming a network where the mobility degree is low or medium, e.g. person, animals, vehicles. Safe driving and real traffic monitoring are examples of application supporting this type of mobility. Since nodes in the network are free to move, network topology changes dynamically with low frequency. Node's movement can be either predictable (e.g. vehicle movement) or unpredictable (e.g. animals). Compared to static networks, nodes here have generally lowered network lifetime. This can be explained by the need for nodes to exchange information frequently to adapt to topology change. Generally, nodes are deployed in a less density way than in static networks. The most known Mobile Ad-hoc Network "MANET" and Vehicular Ad-hoc Network "VANET" can be classified as subsets of low/medium mobility network.
- **High and very high mobility networks:** composed of a set of mobile nodes where their mobility is high (fixed and rotating UAVs). Due to high mobility, topology changes in a high frequency. This makes nodes obliged to process environmental data frequently to adapt to the high frequency change. This type of networks is used in surveillance and search and rescue operations applications. Generally, these networks are known by Flying Ad-hoc Network "FANET".

We summarize the above described characteristics of each network in the radar chart in figure 1.

## III. COMMUNICATION CHALLENGES

Recently, researchers are interested more and more in distributed communication protocols for wireless decentralized networks for plenty of reasons : more suitable for scalable and fault tolerant networks, topology independent, flexible, installation speed and simplicity and mobility. Despite these benefits, distributed protocols face new challenges such as agent's coordination and collaboration as well as heterogeneity and scalability.

All these challenges are cited in figure 2.

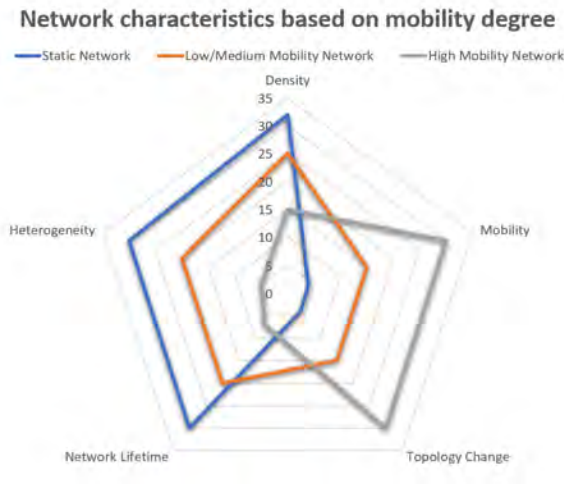


Fig. 1. Network characteristics based on mobility degree.



Fig. 2. Contention-free MAC protocols: Challenges & Requirements.

#### IV. FUTURE RESEARCH

Because of the presence of obstacles (i.e. buildings, mountain) and the high speed of nodes in mobile networks, network topology becomes highly variable and can cause frequent partitions. Furthermore, critic missions in IoT may face a problem of connectivity with control station such as search and rescue mission and wildlife monitoring after a disaster where internet infrastructure becomes unavailable. Therefore, the network must adapt to these situations to guarantee connectivity and avoid mission failure.

When a network goes through a lot of partitions, agents need to be aware of the current situation and dynamically assign or release resources in the moment of partition and union of the network. In the case of isolation, the network should provide sufficient resources for new coming agents to exchange information in a fluid way. These new coming agents can be considered as relays between different networks that did not have a direct path to connect with. They are called data

mules or ferries, which travel among intermittent networks to collect data and disseminate configuration updates from control centers to all participating nodes reliably. The above situation has many similarities with the approach of Delay and Disruption Tolerant Network "DTN". DTNs allow for information to be shared between agents even in the presence of high delays. More precisely, when a network faces partitions or two networks haven't a direct path to communicate, packets that cannot be routed are stored and carried until a new route becomes available. In a MAC layer level, network resources must be shared dynamically between agents to face the above situations.

From the above investigation, we clearly notice that DTN concept can be considered as an opportunity for wireless networks to solve nodes' mobility issues such as network partition and connectivity.

#### V. CONCLUSION

In this thesis, we conducted a comprehensive survey on recent works that solve communication time allocation for wireless IoT networks. These solutions were categorized by the mobility degree of the network (Static, low/Medium mobility and High mobility networks). This type of classification is especially useful to understand design space (problem space and the solution space) of a mobility-related MAC algorithms. We have discussed important challenges that face MAC protocol design and development. Finally, we have investigated a new research direction (contention-free MAC protocol in wireless IoT network with DTN functionality) by searching for its main requirements and setting its important objectives. In the future, the security issue and challenges specific to wireless decentralized networks would be analysed to suggest potential solutions to handle different attack vectors.

#### REFERENCES

- [1] A. Bouabdallah, H. Lakhlef, M. Raynal, and F. Taïani, "Providing collision-free and conflict-free communication in general synchronous broadcast/receive networks," in *2017 IEEE 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, 2017, pp. 399–406.
- [2] A. Ouaddah, H. Mousannif, A. Abou Elkalam, and A. Ait Ouahman, "Access control in the internet of things: Big challenges and new opportunities," *Computer Networks*, vol. 112, pp. 237–262, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128616303735>
- [3] M. A. Yigitel, O. D. Incel, and C. Ersoy, "Qos-aware mac protocols for wireless sensor networks: A survey," *Computer Networks*, vol. 55, no. 8, pp. 1982–2004, 2011. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128611000703>
- [4] A. Čolaković and M. Hadžialić, "Internet of things (iot): A review of enabling technologies, challenges, and open research issues," *Computer Networks*, vol. 144, pp. 17–39, 2018. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128618305243>

# A joint approach combining Safety and Security in Railway teleoperation

**AKTOUCHE Sadek Rayan**

Directeurs de thèse : Mohamed Sallak, Abdelmadjid Bouabdallah, Walter Schön

Équipe : SCOP

**Résumé—** The recent need for connectivity in railways introduces new Security threats managed separately from traditional Safety risks. In this thesis, we study the combination of Safety and Security and their interactions in the risk assessment activity. We propose a collaborative Safety and Security V-shaped risk analysis process that we apply to railway teleoperation. The process is further supported by a relational model that emphasizes on the interactions between specific entities of the analyses.

## I. INTRODUCTION

Modern cyber-physical systems know an increase of connectivity between components and modules. This causes a need to deal with Cybersecurity risks in addition to traditional Safety risks. However, the cohabitation of Safety and Cybersecurity requires to consider the interactions that the two might have. These interactions can be positive as Safety and Cybersecurity work towards the same goals, or negative as they might be contradictory.

Risk assessment processes in Safety and Cybersecurity share the goal of identifying, evaluating and acting upon risks but the difference lie firstly in the origin of the risk which is accidental in Safety whereas it comes from a malicious intent in Cybersecurity. And secondly in risk likelihood evaluation as in safety risk likelihood is evaluated precisely using probabilities whereas in Cybersecurity, likelihood when considered is mainly qualitative.

These fundamental differences justify the existence of distinct risk assessment processes for the two disciplines each performed by their own experts and backed by their own standards such as EN 50126 [1] for railways Safety and ISA/IEC 62443 [2] for Security. However, we noticed that even though the processes are distinct they happen to use similar concepts such as feared events, countermeasures, and requirements. These entities are also a key element in Safety and Security interactions because the interactions are generally defined between two or more entities. For example: A Cybersecurity measure that entails a double authentication of a user might contradict a Safety requirement of quickly taking control of a safety-critical part of a system in case of an emergency.

Our thesis proposes the elaboration of a joint Safety and Security risk analysis process supported by a relational model implemented in a knowledge base to specify the entities involved in risk assessment processes for both Safety and Cybersecurity and the existing relations between them.

## II. CONTEXT OF THE THESIS

The thesis takes place at UTC, within the SCOP team and in close collaboration with the IRT Railenium and a set of additional partners including SNCF, Thales, Actia and Ifsttar. It is part of the TC-Rail project [7] and more broadly in the Autonomous Train program.

### A. Presentation of IRT Railenium

It is the testing and applied research center for the railway industry. Its mission is to develop through collaborative innovation the competitiveness of companies as an engine of growth. Railenium implements innovation partnerships between industry and academia to ensure a high-level response to the challenges of the sector.

### B. Presentation of the TC-Rail project

Automatic train control is already operational for metro applications for different levels of automation (up to GoA4 - Grade of Automation). Compared to urban systems, the situation of other rail line systems (TGV, regional, FRET) is more complex, due to a larger and interconnected rail network, a diversified fleet of rolling stock and a complex operating system that operates in a completely open environment.

One of the technological building blocks required for the future Autonomous Train is teleoperation, which will allow remote driving of rolling stock to manage degraded modes.

The main objective of the TC-Rail project is to demonstrate the possibility of driving a locomotive safely from a remote site, without a driver in the train cabin, with a level of safety globally at least equivalent (Globalement Au Moins Équivalent GAME) to that obtained in presence of a driver in the cabin.

In TC-Rail, there are respective teams in charge of Safety and Cybersecurity, to which the thesis attempts to bring synergy and collaboration through combined analysis and discussions. The final desired result being an approach combining Safety and Security applied to the teleoperation system developed in the project.

## III. THE V-SHAPED COLLABORATIVE SAFETY AND SECURITY RISK ANALYSIS PROCESS

After studying the existing approaches, we opted to act on the risk management processes with the objective of performing a co-analysis of Safety and Cybersecurity risks by bringing together the Safety and Security risk analysis processes at several levels of the analyses. Our motivations are mainly that what we have at hand in the TC-Rail project is risk analyses performed by the separate safety and cybersecurity experts. In

addition to that, literature seems to lack a process-based co-analysis method that takes a similar route to ours.

Our overall goal is to propose a Safety and Cybersecurity collaborative risk analysis method, and in order to achieve that goal, we brought together Safety and Cybersecurity risk analysis processes from the TC-Rail project and linked them in various phases of the process in order to deal with interconnections between entities both internally and in a transversal manner. The figure below depicts a model of the V-shaped process where from one side there are the Safety steps labeled Safe.x and the other side there are the Cybersecurity steps labeled Cyber.y. In between the two are intermediate and collaborative steps that we've added in order to deal with interdependencies at various stages of the processes.

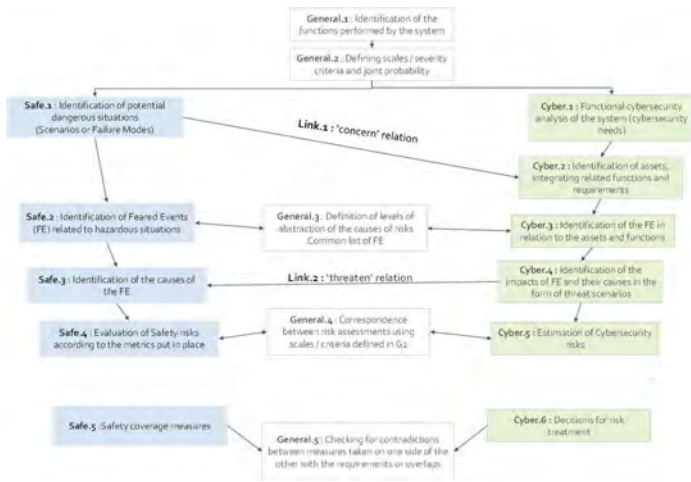


Fig. 1. V-Shaped collaborative risk assessment process

#### IV. A RELATIONAL MODEL FOR JOINT SAFETY AND SECURITY RISK ANALYSIS

In this section, the relational model for Safety and Cybersecurity collaborative analysis will be briefly described, starting with identification of the entities manipulated in risk analysis processes from both disciplines. We use as a reference for these processes, the standards CENELEC NF EN 50126 and IEC 6243. The methodology consists of identifying in the standards all entities that have a direct or indirect role in both risk analysis processes; the relations are further identified based rather on the interactions that we noticed in the actual risk analyses of the TC-Rail project.

As an illustration, we present in the following figure the entities in a Safety risk analysis and the internal relations between them. The same work is conducted for Cybersecurity, and in addition to those transversal relations are further identified according to the V-shaped process established links.

We went on to implement the relational model in the OWL [5] knowledge base format using the protégé tool [6] and show how it can be used. This is done by defining entities as classes in the ontology by regrouping them using the notion of hierarchy. Relations are then defined through the notion of annotation properties in OWL.

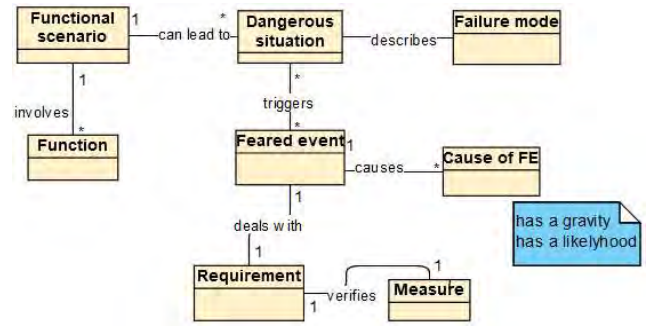


Fig. 2. UML Representation of internal safety relations

#### V. CONCLUSION AND FUTURE PROSPECTS

In this thesis we laid the foundation for what could become a safety and security joint risk analysis approach by showing how risk analyses that have so far been completely disjoint could interact with each other. In summary, what we provide is a guide of good practices in order to bring together safety and security risk analyses, these practices are backed by the idea of the relational model. We show how the interactions can be highlighted through bringing together steps of the risk analysis processes and linking entities manipulated in the analyses. The future goal for the end of the thesis would be to populate formally the relational knowledge base and constructing queries that would answer questions about safety and security interactions such as “What are all the Safety feared events that could have a Cybersecurity impact on this asset?”. This work has led to accepted papers to Lambda Mu 22 [8] as well as ESREL2021 [9]. We also have more prospects of international conference communications as well as a journal project.

#### References

- [1] CENELEC. NF EN 50126 : Applications ferroviaires Spécifications et démonstration de Fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité (FDMS), (2017)
- [2] [2] IEC 62443-3-2, Security for industrial automation and control systems – Part 3-2: Security risk assessment for system design IEC (2020)
- [3] Martin-Guillerez, D., Guiochet, J., Powell, D., & Zanon, C. A UML-based method for risk analysis of human-robot interactions. In Proceedings of the 2nd International Workshop on Software Engineering for Resilient Systems (pp. 32-41). (2010, April).
- [4] Sommestad, Teodor, Mathias Ekstedt, and Pontus Johnson. "A probabilistic relational model for security risk analysis." Computers & security 29.6 (2010): 659-679.
- [5] McGuinness, Deborah L., and Frank Van Harmelen. "OWL web ontology language overview." W3C recommendation 10.10 (2004).
- [6] Musen, M.A. The Protégé project: A look back and a look forward. AI Matters. Association of Computing Machinery Specific Interest Group in Artificial Intelligence, 1(4), (2015, June). DOI: 10.1145/2557001.25757003.
- [7] É. Masson, P. Richard, S. Garcia-Guillen and TBD, “TC-Rail: Railway Remote Driving,” in WCRR 2019, Tokyo, (2019)
- [8] Aktouche, S. R., Sallak, M., Bouabdallah, A., & Schön, W. (2020, October). Combinaison Safety-Security dans les systèmes de transport ferroviaire: Contexte, Défis, et Méthodologies. In Lambda Mu 22- Congrès de maîtrise des risques et de sûreté de fonctionnement.
- [9] Aktouche, S. R., Sallak, M., Bouabdallah, A., & Schön, W. (2021). TOWARDS A RELATIONAL MODEL FOR COLLABORATIVE SAFETY AND SECURITY RISK ASSESSMENT PROCESSES. 31st European Safety and Reliability Conference (ESREL 2021)

# Algorithmique répartie des réseaux dynamiques de véhicules

Guillaume BÉDUNEAU

Directeurs de thèse : Bertrand DUCOURTHIAL, Ghada JABER (co-encadrante)

Équipe : SCOP

**Résumé**—La collaboration entre véhicules intelligents promet de réduire la mortalité routière, les congestions et la pollution atmosphérique. Dans ce contexte, l'étude des algorithmes répartis de collaboration dans un réseau véhiculaire est de première importance. Mais la prédiction de leur comportement demande de nouveaux modèles et des méthodes appropriées.

## I. INTRODUCTION

Alors que des véhicules de plus en plus équipés prennent la route, il apparaît clair que leur coopération a un fort potentiel, à la fois dans la réduction des accidents graves mais aussi dans l'amélioration du trafic routier.

Pour coopérer, les véhicules doivent exécuter un même algorithme réparti et communiquer entre eux. Comme les véhicules sont en mouvement et communiquent sans fil, les communications ne sont pas pérennes et peuvent échouer. Ces problèmes de communication sont à même de réduire les performances de l'algorithme réparti voire de le faire échouer. Mais ils restent difficiles à prévoir.

De nouveaux outils méthodologiques pourraient permettre de prédire le comportement des algorithmes dans un scénario routier donné.

Nous résumons tout d'abord l'étude algorithmique du problème de la diffusion fiable avant de présenter l'état des travaux effectués pour la modélisation de scénarios dynamiques. Nous terminons par montrer comment la modélisation alliée à une étude algorithmique permet des prédictions dans un scénario dynamique.

## II. DIFFUSION FIABLE

Un problème classique de communication est la diffusion fiable : elle consiste à transmettre d'un membre du groupe à tous les autres une donnée tout en s'assurant de la bonne réception de cette dernière par chacun des destinataires. Dans un réseau statique, une telle diffusion s'appuierait sur du routage et des accusés de réception envoyés par chacun des destinataires.

Dans un réseau dynamique, la diffusion fiable reste un problème complexe, surtout si on considère les ressources limitées d'un réseau véhiculaire : une bande passante réduite et partagée et un cache mémoire fini.

Dans [1], un algorithme réparti assurant la diffusion fiable dans les réseaux véhiculaires a été présenté. La publication intègre l'étude de ses performances par émulation de réseau dynamique.

## III. MODÉLISATION

Pour pouvoir prédire le comportement d'un algorithme réparti, il est important de modéliser le réseau dans lequel il s'exécute. Cette modélisation nécessite de prendre en compte les aspects importants du monde réel avant de les intégrer dans une modélisation exploitable.

### A. Scénario réel et observation

Dans un réseau de véhicules, le mouvement des véhicules peut mettre en échec un algorithme de coopération. Ainsi, la prédiction de succès d'un algorithme réparti dépendra du scénario considéré.

Un scénario dynamique réel, appelé *observation* est caractérisé par un ensemble fini de nœuds exécutant l'algorithme réparti. À tout moment, un nœud peut tenter d'émettre un message vers un autre. Un lien est constaté si une telle communication est réalisable, c'est-à-dire que les deux nœuds restent à portée l'un de l'autre suffisamment longtemps. Dans un réseau dynamique, un tel lien a une date de début et de fin.

Une *observation* est constituée d'un nombre fini de nœuds et d'une liste de liens datés. Dans un réseau fixe, l'observation donnerait un graphe. Avec des nœuds en mouvement, l'observation fournit un graphe dynamique dans lequel les arêtes sont datées.

Notons que l'existence d'une arête dans le graphe dynamique ne garantit pas pour autant que la communication réussisse car d'autres facteurs que la topologie entre en jeu. Par ailleurs, pour assurer un meilleur partage des ressources tout en palliant les erreurs de transmission, les algorithmes considérés sont généralement basés sur des émissions périodiques. Le délai entre deux messages est un paramètre important pour la modélisation, tout comme la durée des arêtes.

### B. Graphes $p$ -dynamiques

Une  $p$ -arête (ou un  $p$ -arc) est un ensemble ininterrompu de liens permettant à l'émetteur d'envoyer  $p$  messages consécutifs au receveur. Elle a une date de début et une date de fin.

Pour toute  $p$ -arête, il existe une  $(p-1)$ -arête ayant la même date de début.

Un *graphe  $p$ -dynamique* est un graphe contenant exclusivement des  $p$ -arêtes. Sa date de début est la plus tardive des dates de début de ses  $p$ -arêtes et sa date de fin la plus précoce des dates de fin de ses  $p$ -arêtes. Un graphe  $p$ -dynamique comprend toutes les  $p$ -arêtes qui existent entre son début et sa fin.



Pour tout scénario dynamique et pour tout entier  $p$  fixé, il existe une unique séquence de graphes  $p$ -dynamiques représentant le scénario. Une famille  $p$ -dynamique est constituée de l'ensemble des séquences de graphes  $p$ -dynamiques différentes représentant le même scénario pour différentes valeurs de  $p$ .

#### IV. PRÉDICTION DANS LES RÉSEAUX DYNAMIQUES

##### A. Principe

En étudiant le fonctionnement d'un algorithme réparti, nous pouvons établir des conditions assurant le succès de son exécution dans un réseau dynamique tel qu'un réseau de véhicules. Les graphes  $p$ -dynamiques constituent une modélisation intéressante pour exprimer ces conditions.

En analysant la famille de graphes  $p$ -dynamique issue du scénario réel, il devient possible de prédire le succès de l'exécution en vérifiant que les conditions nécessaires à l'algorithme y sont satisfaites.

Techniquement, on utilise un émulateur pour reproduire un trafic routier. Cet émulateur permet d'archiver tous les contacts possibles entre les différents véhicules et, dans le même temps, d'exécuter l'algorithme réparti. À partir des traces des contacts, on calcule la famille de graphes  $p$ -dynamique qui permet de prédire si l'algorithme a réussi. On vérifie ensuite la véracité de la prédiction en analysant les résultats applicatifs réels.

##### B. Exemple

Considérons l'algorithme réparti suivant. Chaque nœud du réseau émet cycliquement un message contenant  $\frac{1}{3}$  d'une donnée fractionnée, et stocke la liste des messages qu'il reçoit des autres. L'algorithme est un succès si toute la donnée est reçue par chacun des nœuds au cours de l'exécution.

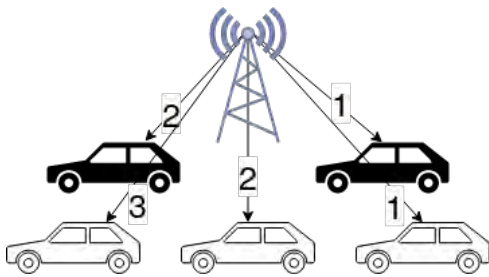


Fig. 1. Les deux véhicules passent proches de la borne. Le véhicule noir, plus rapide que le véhicule blanc, n'a pas reçu la donnée complète.

L'existence, pour chaque couple  $(u, v)$  de nœuds au cours d'une exécution, d'une 4-arête entre  $u$  et  $v$  garantit le succès de l'algorithme. La prédiction consiste alors à vérifier si la séquence des 4-graphes issue de la modélisation de l'observation réelle contient une arête pour chaque couple de nœud.

##### C. Limites

L'expression utilisant les graphes  $p$ -dynamiques n'est pas forcément toujours strictement équivalente à la condition de succès. Par exemple, ci-dessus il s'agissait d'une condition suffisante de succès et non d'une condition nécessaire.

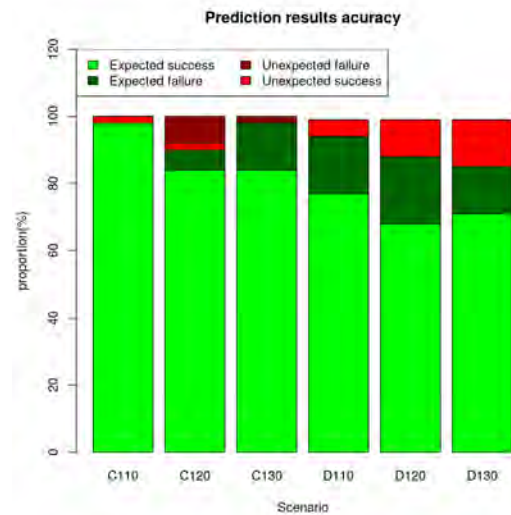


Fig. 2. Exactitude des prédictions selon le type de scénario dynamique : croisement pour les scénarios croisement (C) et dépassement (D) avec des vitesses de 110, 120 et 130 km/h

Comme l'expression utilisant les graphes  $p$ -dynamiques est fortement dépendante de l'algorithme considéré, elle doit être refaite à chaque modification de l'algorithme. Elle est en outre difficile à portée d'un algorithme à un autre. Si l'algorithme est complexe, elle peut être très difficile à obtenir.

##### D. Cas réaliste

L'algorithme étudié est un algorithme de partage d'information avec accusé de réception. La réussite de l'algorithme pourra être considérée s'il permet l'échange de 24 fragments de données.

Les tests sont effectués sur plusieurs types de trafics routiers émulsés : véhicules qui se croisent sur autoroute, dépassement sur autoroute, vitesse de 110, 120 ou 130 km/h. La figure 2 présente les résultats de prédiction. Les scénarios sont représentés par la lettre C pour croisement ou D pour dépassement, suivi par la vitesse utilisée.

Les prédictions s'avèrent exactes dans plus de 90% des cas pour le scénario de croisement et plus de 80% pour le dépassement.

D'autres algorithmes de partage de données entre véhicules ont subi la même étude (pour des résultats assez similaires)

#### V. CONCLUSION

La modélisation du réseau dynamique et l'étude formelle de l'algorithme sont indispensables pour réaliser des prédictions efficaces. Des expériences supplémentaires viseront à diversifier les scénarios étudiés et les algorithmes, et un travail concernant la prise en compte de pertes aléatoires supplémentaires liées par exemple à des collisions radio est également engagé.

#### RÉFÉRENCES

- [1] G. Béduneau, G. Jaber, and B. Ducourthial, "Reliable multi-diffusion with limited memory in vehicular networks," in *PerVehicle 2021 : 3rd International Workshop on Pervasive Computing for Vehicular Systems (PerVehicle 2021)*, Kassel, Germany.

# Cloud-IoT For Smart Cities

Sana BENHAMAID

Directeurs de thèse : Abdelmadjid BOUABDALLAH, Hicham LAKHLEF

Équipe : SCOP

**Résumé**—With the explosive growth of the Internet-of-Things (IoT), the constant increase of the IoT devices energy consumption, in addition to the energy crisis our world actually knows, the objective of this PhD is to develop energy efficient solutions for IoT networks that reduce the energy consumption and increase the networks lifetime.

**Index Terms**—Internet of Things, energy efficiency, data collection, deep reinforcement learning

## I. INTRODUCTION

### A. Context and challenges

One of the major challenges of IoT networks is the lifetime of the battery limited IoT devices. In the first year of this PhD, we have studied the state of the art of the well-known and novel energy management techniques for IoT. We have identified the energy conservation and energy harvesting approaches that utilize various techniques in order to achieve green and sustainable IoT networks. This state of the art have led to the redaction of a submitted survey [1]. We noticed during our study that IoT devices consume large amounts of energy in order to communicate data with their neighbours. These communications will quickly lead to the devices battery depletion. Once emptied or depleted, those batteries are often difficult to replace especially if the devices are placed in an isolated or a difficult to access position. One promising solution is to collect the generated data and communicate it in an efficient way to reduce the transmission energy cost.

### B. Background

Several data collection approaches have emerged in order to reduce the energy consumption, delay and maximize the network lifetime [2]. During our study we have identified four approaches : Data aggregation that consist on using a node or a number of nodes to gather data from the other nodes. The probability-based approach that use approximation models to find correlations and predict the value of sensed data. Another approach is compressive sensing which consists on reducing the quantity of data sent through the network. Finally, we studied the mobility-based data collection approach that exploits the mobility of the nodes or the mobility of the data sinks in order to reduce the transmission energy.

### C. Objectives

With the data collection approaches presented previously, we have chosen to focus on how to enhance the energy efficiency of mobility-based data collection combined with data aggregation solutions. More specifically, we studied how to reduce the energy consumption of a mobile sink that gathers

data from IoT nodes clusters. This research lead is particularly interesting for smart cities where we can exploit moving vehicules such as cars, buses, UAVs to gather data from IoT nodes clusters. We focused our efforts in the start of the second year of this PhD on finding novel solutions for this challenging and attractive research area.

## II. SMART ENERGY EFFICIENT MOBILE DATA COLLECTION

Mobile data collection is a very efficient solution to gather information from spatially distributed IoT nodes. In order to enhance the efficiency of mobile data collection, the trajectory planning of the mobile node has been widely studied. Most of the solutions proposed for trajectory planning use static approaches which do not offer enough adaptability and context-awareness. Consequently, we opted for a learning based approach in which we study a trajectory planning problem in mobile data collection for IoT where IoT nodes are organized in clusters. A relay node is chosen from each cluster in order to collect data from IoT nodes and transmit it to the mobile node in its range.

Our idea consisted on planning an adaptive and context-aware trajectory of a mobile node using a deep reinforcement learning algorithm. As shown in Figure ??, we want our mobile node (e.g. a car) to adapt its trajectory to the context and ignore one of the clusters (cluster 2 in Figure ??) if, for example, the amount of data to be collected is too low or a cluster of higher priority is saturated. Reinforcement learning is a machine learning technique that allows us to use information about the environment to learn and find an energy efficient trajectory for the mobile node and adapt to significant changes in the context scenario (e.g. the amount of collectible data) without the need for expensive retraining or recollection of data. We chose to use a deep Q-learning algorithm which a combination of Q-learning, a reinforcement learning algorithm, and neural networks.

### A. System Model And Markov Decision Process

We consider an IoT network composed of a number of clusters randomly distributed in a square grid world of size  $M \times M \in \mathbb{N}^2$  with a mobile node collecting data through a relay node from a number  $K$  of clusters of IoT devices. We suppose that the relay node is already chosen depending on its energy capability. The  $k$ -th relay node is permanently located at  $[x_k(n), y_k(n)]$  in the grid world with  $k \in [1, K]$  and  $n = 1, 2, \dots, N$ , represents the number of time slots. In order to find an optimal data collection policy that maximizes the data collection and minimizes the energy consumption of the mobile node, we formulated our problem as a

Markov decision process problem (MDP). The MDP is defined by the tuple  $(S, A, R, P)$  with state-space  $S$ , action-space  $A$  and reward function  $R$  and  $P$  the transition probability. We solve this MDP problem using reinforcement learning. The state in time  $t$ , is given by  $s_t = p_t, D_t, e_t, C$ . The mobile node is limited to fly to one of the four adjacent grids from its current grid in each time slot. The action-space is defined as

$$A = \text{north, east, south, west}$$

The movement of the mobile node from a position  $p_t$  is expressed as

$$p_{t+1} = \begin{cases} p_t + (-X, 0) & \text{if } a_t = \text{west} \\ p_t + (X, 0) & \text{if } a_t = \text{east} \\ p_t + (0, X) & \text{if } a_t = \text{north} \\ p_t + (0, -X) & \text{otherwise} \end{cases}$$

More details about our system model and markov decision process can be found in our paper published in the 2021 PerCom International Conference [3].

### III. METHODOLOGY

#### A. Q-Learning

Q-learning is a model-free reinforcement learning technique that helps finding an optimal policy and maximize the expected value of the total reward from the current state and all the consecutive states. Formally, for an autonomous agent observing a state  $s$  of its environment at time step  $n$   $s_n \in S$  where  $S$  is the set of states. The agent executes an action  $a_n \in A$ , where  $A$  is the set of possible actions and interacts with its environment. This action changes the state of the environment to a new state  $s_{n+1}$  and the agent will receive a reward  $r_n$  accordingly. The environment is expected to be non-deterministic as taking the same action in the same state on different occasions may result in different states and different rewards. The agent's goal is to find a policy  $\pi$  that maps a state  $s_n$  to a probability of choosing action  $a_n$  and can be represent as following

$$\pi : S \rightarrow P(A)$$

The reward is the sum of discounted future rewards. To calculate the reward we use  $\gamma$ , where  $\gamma \in [0, 1]$  is a discount factor that determines the effect of the future rewards to the current one.

$$R_n = \sum_{i=n}^N \gamma^{i-n} r(s_i, a_i)$$

The optimal policy  $\pi^*$  is defined as

$$\pi^* = \operatorname{argmax} \mathbb{E}[R_n | \pi]$$

This optimal policy has an optimal state-action value function that satisfies Bellman optimality equation. It is described by the following

$$Q^{\pi^*}(s, a) = \mathbb{E}[R_{n+1} + \gamma \max_{a'} Q_*(s_{n+1}, a_{n+1})]$$

#### B. Deep Q-learning

Deep Q-Learning which is technique that uses neural networks to approximate the optimal Q-function  $Q_{\pi}(s, a)$ . Deep Q-learning often uses experience replay which is a technique that allows us to store the agent's experiences at each time step  $n$  in a data set called replay memory. At time step  $n$ , the agent's experience is defined as following

$$e_n = (s_n, a_n, r_{n+1}, s_{n+1})$$

The main reason for using experience replay is to break the correlation of consecutive samples. In our solution we uses two neural networks. The policy network  $\theta$  which approximates the optimal policy by finding the optimal Q-function. It accepts the current state  $s_n$  and finds the evaluation of the value  $Q(s_n, a_n, \theta)$ . We also use a second network called target network  $\theta'$  to improve the stability of learning. The target network weights are frozen with the original policy network and are updated periodically. It accepts the next state  $s_{n+1}$  and outputs the Q-value  $Q(s_{n+1}, a_{n+1}, \theta')$ . These values are optimized to minimize the loss function defined by

$$L(\theta) = \mathbb{E}[(T_n - Q(s_n, a_n))^2]$$

where  $T_n$  is the target value which is defined as following

$$T_n = r_n + \gamma^{n-1} \max Q(s_{n+1}, a_{n+1}, \theta')$$

where the Q-value for the next state  $s_{n+1}$  is passed to the target neural network  $\theta'$  for more stability in learning.  $\epsilon$  is the exploration rate which represents the probability that our mobile node will explore the environment and  $\epsilon_{expt}$  is the threshold from which our mobile node will stop exploring the environment and will exploit the experience acquired through the policy network.

### IV. CONCLUSION

In the first year of this PhD, we have studied the state of the art of Green-IoT and in the first half of the second year we have introduced a deep Q-learning method with experience replay for trajectory planning of a mobile node in a mobile data collection and cluster-based scenario. We are currently working on training a neural network that uses information about the environment to learn and find an energy efficient trajectory for the mobile node and adapt to significant changes in the context scenario (e.g. the amount of collectible data, the importance of the data) without the need for expensive retraining or recollection of data.

### RÉFÉRENCES

- [1] S. Benhamaid, A. Bouabdallah, and H. Lakhlef, "Recent advances in energy management for green-iot : An up-to-date and comprehensive survey."
- [2] T. Wala, N. Chand, and A. K. Sharma, *Energy Efficient Data Collection in Smart Cities Using IoT*. Cham : Springer International Publishing, 2020, pp. 632–654.
- [3] S. Benhamaid, H. Lakhlef, and A. Bouabdallah, "Towards energy efficient mobile data collection in cluster-based iot networks." 2021.

# VNF reconfiguration and dynamic management of 5G network slices

Hanane BIALLACH

Orange supervisor: Mustapha BOUHTOU

Thesis director: Dritan NACE

**Abstract**—The forthcoming 5G architecture will be essentially based on network slicing. As an emerging technology, network slicing brings several challenges in network management. The reconfiguration of 5G network slices problem is one of these challenges. In this document, we present our methodology to deal with this problem.

**Index Terms**—5G network slicing, VNF reconfiguration, ILP.

## I. INTRODUCTION

One of the visions of 5G is to have a multi-service network supporting a wide range of verticals with a varied set of performance and service requirements. Sharing or ‘slicing’ a single physical network into multiple isolated logical networks has become the key to realize this vision [1] [2].

One of the important research issues which need to be focused on is resource allocation. The problem we want to tackle is the resource allocation and reconfiguration of slices while respecting different requirements. Our objective is to schedule Virtualized Network Functions (VNFs) and generate a reconfiguration plan to pass rapidly and efficiently from an initial state where the resources of slices are not optimally allocated to a new state where the resources are optimally placed while minimizing the service interruption and respecting the resource capacity. We call this, VNF reconfiguration problem.

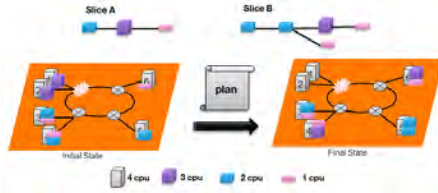


Fig. 1. VNFs reconfiguration problem

Figure 1 shows a simple example of VNFs reconfiguration problem. A breakdown is assumed in the first node affecting server 1 and server 2. The goal is to migrate the VNFs deployed in server 1 and server 2 in order to avoid loss of service and reach a feasible state known beforehand while minimizing the service interruption, and respecting the different constraints (capacity, precedence and the slice availability constraint..).

The remainder of this document is structured as follows: Section II describes the followed methodology to solve the VNF reconfiguration problem. Section II-A and II-B details the proposed ILP model with the experimental results. Finally, Section III presents the conclusion and an outlook on possible continuations of our work.

## II. METHODOLOGY

The problem of VNF reconfiguration is NP-Hard and to deal with it, we have proposed both exact methods and heuristics. From exact solution method point of view, we have proposed a Mixed Integer Linear Programming (ILP) model and a column generation algorithm that take into account both of hot and cold migration. From heuristic perspective, we formulated the problem as a graph one. The vertices represent the servers and the arcs represent the migrations of the Virtualized Network Functions (VNFs) which constitute each slice. If the resulting graph is acyclic, the solution is feasible in polynomial time. In this case, we apply the topological sorting. If the graph is cyclic, one may apply the feedback arc set problem algorithm to render it acyclic. Then, we apply the topological sorting in order to obtain the reconfiguration plan that contains the list of VNFs migrations. In the following section, we present in detail the ILP model with the experimental results.

### A. ILP formulation

Before presenting our proposed model, we list in Table I all variables and parameters used in the model for easy reference. We considered a datacenter that is composed of  $N_s$  servers and  $N_v$  Virtual Machines (VMs). Each VNF is implemented in one VM.

TABLE I  
TABLE OF NOTATIONS

Notation	Description
$N_v$	number of VNFs
$N_s$	number of servers
$k$	order / stage of the reconfiguration
$x_{ik}$	a binary variable indicating that $VM_i$ is migrated in stage $k$
$y_{ik}$	a binary variable indicating the stage $k$ where $VM_i$ is interrupted in source host
$O_{(s)}$	set of VMs originating from server $s$
$D_{(s)}$	set of VMs targeting server $s$
$C_s^k$	residual capacity of server $s$ in stage $k$
$T_i$	represents the occupied capacity of $VNF_i$
$\delta_i$	represents the interruption duration of $VNF_i$
$\beta_i$	represents the cost to be minimized

The optimisation objective is to minimize the interruption duration while satisfying the resource requirements

$$\min \sum \beta_i \delta_i \quad (1)$$

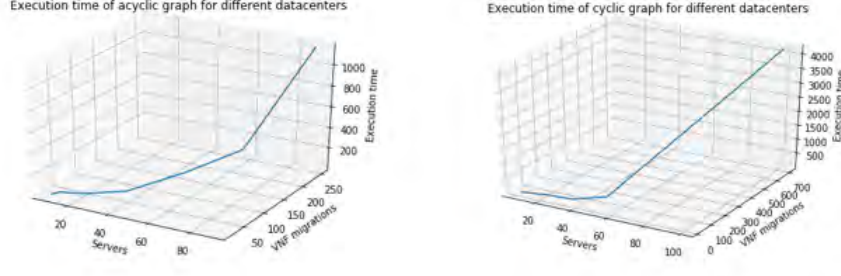


Fig. 2. Execution time of acyclic and cyclic graph for different datacenters

Equation (3) ensures that  $VNF_i$  can only be migrated once in destination server.

$$x_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{if the } VM_i \text{ is migrated in stage } k; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{N_v} x_{ik} = 1; \forall i \quad (3)$$

Equation (5) shows that  $VM_i$  can only be interrupted once in source server.

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{if the } VM_i \text{ is interrupted in stage } k; \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{N_v} y_{ik} = 1; \forall i \quad (5)$$

Equation (6) encompasses the cold and hot migrations. If the VNF is migrated with cold migration, the interruption and migration could be performed in one same stage. Otherwise, if the VNF is migrated with hot migration. The VNF is interrupted in the source host after totally being migrated to destination host.

$$\sum_{k=1}^{N_v} ky_{ik} \leq \sum_{k=1}^{N_v} kx_{ik} + 1; \forall i \quad (6)$$

The interruption time is considered as the number of stages between the VM interruption and VM migration. In hot migration the interruption time is negligible, we consider  $\delta_i = 0$ . In cold migration, the VM interruption is performed at least in one stage  $\delta_i = 1$ . Equation (7) refers to the formulation of VM interruption time.

$$\delta_i = \left( \sum_{k=1}^{N_v} kx_{ik} + 1 \right) - \left( \sum_{k=1}^{N_v} ky_{ik} \right) \quad (7)$$

Equation (8) represents the CPU Capacity constraints

$$C_s^k - \sum_{i \in D(s)} x_{ik} T_i + \sum_{i \in O(s)} y_{ik} T_i = C_s^{k+1}; \forall s; \forall k \quad (8)$$

$$C_s^k \geq 0 \quad (9)$$

### B. Experimental results

The ILP model is solved using CPLEX Optimization Studio V12.8, and all experiments were conducted on machine with Core i7-6600U CPU and 16 Go of RAM. The Datasets are randomly generated with different sizes of graphs.

The first study case we dealt with is that we resolve the model with different sizes of data centers on the acyclic graph as well as on the cyclic graph (see Figure 2). The behavior of the curves shows clearly that the execution time increases according to the size of the infrastructure. The model spends more time to find solution in case of large infrastructure due to the NP-hardness of the problem.

We studied acyclic and cyclic graphs with datacenter of 50 servers and each time we increased the VNF migrations. To further extend the evaluation and improve the execution time, we have increased the capacity of the servers and we have clearly noticed that the execution time has decreased for both acyclic and cyclic graphs, which means that the complexity of the model depends largely on the capacity. Furthermore, The results of cyclic graphs shows that the execution time becomes more important comparing to acyclic graphs, which means that the complexity depends on the presence of cycles. Moreover, we compared the topological sorting algorithm with our model. For acyclic graph, the solution with topological sorting is carried out in polynomial time, which is quite interesting for an urgent reconfiguration demand. For cyclic graph, our ILP model performs better than topological algorithm in terms of interruption duration.

### III. CONCLUSION

The next step of this work will be introducing the optimization criteria to topological sorting algorithm and the VNF precedence constraints, and testing the proposed models on Orange datasets .

### REFERENCES

- [1] "End to end network slicing," 2017.
- [2] "5g; procedures for the 5g system (3gpp ts 23.502 version 15.2.0 release 15), v15.2.0."

# Génération de sillons optimisés dans un environnement ferroviaire complexe

Guillaume JOUBERT

Directeurs de thèse : Antoine JOUGLET, Dritan NACE, Équipe : SCOP

Encadrante : Marion POSTEC, Entreprise : SNCF Réseau

**Résumé**—Cette thèse CIFRE vise à apporter de l'aide à la décision aux horairistes de SNCF Réseau afin d'horairiser des circulations de trains répondant à une expression de besoins émanant des Autorités Organisatrices incarnées par les régions. Les horaires doivent minimiser les temps de transport, respecter des contraintes d'exploitation et être robustes face à de petits aléas. Le problème est modélisé par un Programme Linéaire en Nombres Entiers.

## I. INTRODUCTION

Le Service Annuel de la SNCF correspond à l'ensemble des circulations prévues sur le Réseau Ferré National et qui sont commercialisées. Celui-ci est préparé au cours d'étapes de planification successives qui démarrent plusieurs années en amont de l'exploitation. De nouvelles normes apparues ces dernières années comme le cadencement des circulations et la mise en place de l'ouverture de l'exploitation à la concurrence ont fait évoluer la manière de construire l'horaire. En amont du processus, les Autorités Organisatrices (AO) incarnées par des régions expriment un besoin en mobilité ferroviaire sur leur territoire. Ce besoin est représenté par un ensemble de sillons, qui sont des réservations de capacité sur l'infrastructure ferroviaire dans l'espace et dans le temps permettant de faire circuler des trains. Ces sillons peuvent différer par le type de train qui lui sont associés : il peut par exemple s'agir de trains de marchandises, ou de trains de voyageurs, à grande vitesse ou non. L'origine, la destination et la politique de desserte sont aussi des caractéristiques des sillons. La région définit la fréquence de chaque sillon, des correspondances souhaitées entre certains sillons, ainsi que le besoin d'espacer certains sillons dans le temps. À partir de cette expression de besoins, c'est à SNCF Réseau que revient la tâche d'horairiser les sillons, c'est-à-dire de décider des horaires sur tout le parcours des sillons de façon que les exigences des AO soient satisfaites, tout en veillant à garantir la sécurité de l'exploitation et la robustesse de ces horaires face à de légers retards. Les horairistes de SNCF Réseau construisent ainsi des trames de sillons horairisés périodiquement comme solution à ce problème. Ce travail repose sur leur expérience et leur expertise : leur connaissance du réseau, des normes d'exploitation ferroviaire, et la maîtrise de logiciels d'aide à la conception des horaires.

Cette thèse CIFRE s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif d'accompagner les horairistes dans leur mission en élaborant un outil d'aide à la décision permettant d'horairiser des sillons répondant optimalement aux exigences d'une expression de besoins sous contraintes de respecter l'ensemble

des normes d'exploitation ferroviaire. L'outil permettra notamment de recalculer plus rapidement de nouvelles solutions dans le cas de modifications dans les données d'entrée ayant pour conséquence la non faisabilité des anciennes solutions. De tels changements dans les données d'entrée peuvent être une renégociation de l'expression de besoins, des modifications de l'infrastructure comme l'ouverture de nouveaux tronçons ou la limitation temporaire de vitesse sur certaines sections en raison de travaux. Une fois que la trame horaire est constituée par les horairistes, une étape de planification ultérieure consiste à affecter une voie à quai aux sillons dans toutes les gares de leur parcours. Nous faisons le choix d'intégrer cette étape d'affectation de voies dans le périmètre du problème d'horairisation de cette thèse.

Les problèmes d'horairisation et d'affectation de voies à quai sont originellement énoncés et résolus avec un horizon de temps dépourvu de période cyclique [1]. Dans le manuscrit [2], ces problèmes sont résolus avec une préoccupation particulière sur le temps de trajet des voyageurs, à l'échelle d'un pays et avec une notion du temps cyclique. L'article [3] résout le problème d'horairisation en combinant des approches utilisant des niveaux d'infrastructure microscopique et macroscopique. L'article [4] s'intéresse à une optimisation conjointe d'un plan de ligne au niveau stratégique et de l'horairisation des circulations associées. Les articles [5] [6] traitent simultanément les problèmes d'horairisation et d'affectation de voies à quai : le premier cherche à minimiser la période de répétition des trains sur une infrastructure unidirectionnelle, tandis que le deuxième prend en compte des contraintes de roulements-matériels et se place à un niveau d'infrastructure mésoscopique. Notre modèle possède des similitudes avec ce-dernier, connu sous le nom de *Track Choice Periodic Event Scheduling Problem*.

## II. DESCRIPTION DU PROBLÈME

Soit une infrastructure ferroviaire formée de sections de gare contenant des voies à quai où les trains des sillons passent ou stationnent, et de sections de lignes contenant des voies en ligne où les trains des sillons circulent. Quand deux sections de lignes distinctes jouxtent l'extrémité d'une même section de gare, elles appartiennent à une même zone. Certaines voies sont circulables dans les deux sens, tandis que d'autres sont caractérisées par un sens de circulation dédié. L'accès depuis une voie d'une première section vers une voie circulable dans le même sens d'une section contiguë n'est pas toujours possible : cet accès dépend de la présence d'appareils de voie (aiguillages) et de signalisation autorisant l'itinéraire



en question. Un itinéraire réalisable est ainsi défini comme un couple de voies accessibles sur des zones contiguës. Deux itinéraires réalisables sur deux mêmes zones contiguës sont compatibles si et seulement si des trains ont la possibilité de circuler simultanément sur ces itinéraires.

Soit un ensemble de sillons à horairiser sur l’infrastructure précédemment décrite. Chaque sillon est composé d’une suite d’opérations de stationnement et de circulation sur les sections de son parcours. Pour chaque opération  $j$  d’un sillon  $i$ , il s’agit de fixer une valeur à la variable entière  $t_{ij} \in [0, \text{periode}]$  qui correspond à une minute cyclique de début de l’opération, *periode* étant l’horizon de temps du cycle, la minute 59 dans notre cas. Parmi les voies présentes sur la section où se déroule l’opération  $j$  du sillon  $i$ , il s’agit aussi de décider quelle sera la voie  $k$  sur laquelle l’opération sera effectuée, c’est-à-dire quelle variable booléenne  $x_{ijk}$  sera égale à 1,  $k$  appartenant à l’ensemble des voies de la section correspondante. L’objectif est de minimiser le temps de parcours des sillons, sous les contraintes suivantes :

- Contraintes conjonctives : l’instant de début d’une opération est supérieur ou égal à l’instant de début de l’opération précédente auquel s’ajoute le temps minimal d’exécution de l’opération précédente.
- Contraintes de contre sens : l’opération d’un sillon ne peut pas être affectée sur une voie dont le sens de circulation ne lui est pas compatible.
- Contraintes d’accès : si l’opération d’un sillon est affectée sur une voie sur la section correspondante, alors l’opération suivante aura un choix d’affectation de voies sur la section suivante restreinte aux itinéraires réalisables entre la voie sélectionnée sur la première section et les voies de la section suivante.
- Contraintes d’affectation : une voie et une seule doit être affectée pour chaque opération des sillons.
- Contraintes d’espacement : si deux sillons de même sens sont affectés sur la même voie en ligne, alors un délai sécuritaire de quelques minutes d’espacement doit séparer l’accès des deux sillons à la section correspondante.
- Contraintes de cisaillement : soit deux sillons de sens quelconques circulant sur deux mêmes zones contiguës. Si les itinéraires empruntés par ces sillons dans ces zones sont incompatibles, alors le début de la deuxième opération de chacun de ces sillons doivent être séparés d’un délai de quelques minutes de cisaillement.
- Contraintes de réoccupation : si deux sillons de sens opposés sont affectés sur la même voie en ligne, ou si deux sillons de sens quelconque sont affectés sur la même voie à quai, alors un délai de quelques minutes de réoccupation doit séparer la libération de la voie par le premier sillon et l’arrivée sur la voie du deuxième sillon.

Une première intuition de caractérisation de la robustesse d’une solution consiste, en plus des délais sécuritaires susmentionnés, à éloigner temporellement les sillons de leurs points de conflits d’une valeur au moins égale à  $r$  minutes supplémentaires. La version robuste du problème consiste à minimiser les temps de parcours des sillons et à maximiser  $r$ .

### III. RÉSULTATS ET PERSPECTIVES

Le modèle précédemment décrit a été implémenté par un Programme Linéaire en Nombres Entiers et résolu avec CPLEX sur des instances fictives dont les expressions de besoins comportent 10, 20 et 24 sillons avec un nombre croissant de sections communes entre les sillons. Nous avons testé deux variantes de notre modèle : celle avec un espacement systématique à l’entrée de chaque section (SYST), et celle avec un espacement contextuel par voie, ce qui permet aussi de prendre en compte les cisaillements dans le même sens (CTXT). Cette deuxième variante est celle qui a été présentée à la section précédente. Pour les deux modèles et les trois instances, nous avons résolu le problème avec l’objectif de minimisation de temps de parcours, puis avec l’ajout de la maximisation de la robustesse telle qu’on l’a définie. Nous avons ensuite refait ces tests avec une relaxation continue des variables temporelles et de robustesse, ce qui a considérablement amélioré les temps de calcul sur ces instances et parfois la valeur de la métrique de robustesse. Cette relaxation est aussi une première étape vers l’obtention de résultats précis à la décimale, un prérequis pour pouvoir horairiser en Île-de-France. Les tables I et II présentent les résultats de ces études.

TABLE I  
TEMPS D’EXÉCUTION (EN SEC) POUR MINIMISER LES TEMPS DE PARCOURS, ET MAXIMISER LA ROBUSTESSE (EN MIN)

Instances	Modèle SYST		Modèle CTXT	
	Réalisable	Robuste	Réalisable	Robuste
1	6 sec	1395 sec $r = 12$ min	6 sec	13598 sec $r = 26$ min
2	720 sec	STOP 25000 sec $r \in [2, 10.5]$ min	539 sec	STOP 60000 sec $r \in [2, 22]$ min
3	1650 sec	non testé	10343 sec	non testé

TABLE II  
RÉSULTATS ANALOGUES À LA TABLE I AVEC UNE RELAXATION CONTINUE DES VARIABLES TEMPORELLES ET DE ROBUSTESSE

Instances	Modèle SYST		Modèle CTXT	
	Réalisable	Robuste	Réalisable	Robuste
1	3 sec	880 sec $r = 12.75$ min	7 sec	1101 sec $r = 26$ min
2	157 sec	STOP 25000 sec $r \in [3.57, 6]$ min	160 sec	STOP 60000 sec $r \in [4, 22]$ min
3	318 sec	non testé	638 sec	non testé

En perspective, nous continuerons d’affiner le modèle pour prendre en compte les correspondances et les enchaînements de sillons, nous travaillerons sur des instances réelles, et nous développerons des approches de résolution plus compétitives.

### RÉFÉRENCES

- [1] V. Cacchiani, L. Galli, and P. Toth, “A tutorial on non-periodic train timetabling and platforming problems,” in 2015, *EURO Journal on Transportation and Logistics* 4 :285-320.
- [2] P. Sels, “Large-scale, passenger oriented, cyclic railway timetabling and station platforming and routing,” in 2016, *Manuscrit de thèse*.
- [3] N. Bešinović, R. M. Goverde, E. Quaglietta, and R. Roberti, “An integrated micro-macro approach to robust railway timetabling,” in 2016, *Transportation Research Part B* 87 :14-32.
- [4] F. Yan and R. M. Goverde, “Combined line planning and train timetabling for strongly heterogeneous railway lines with direct connections,” in 2019, *Transportation Research Part B* 127 :20-46.
- [5] M. E. Petering, M. Heydar, and D. R. Bergmann, “Mixed-integer programming for railway capacity analysis and cyclic, combined train timetabling and platforming,” in 2015, *Transportation Science*.
- [6] R. Wüst, S. Bütikofer, S. Ess, C. Gomez, A. Steiner, M. Laumanns, and J. Szabo, “Periodic timetabling with ‘track choice’-presp based on given line concepts and mesoscopic infrastructure,” in 2018, *Operations Research Proceedings 2018*.

# Elaboration of an economic model for decision aid optimizing the maintenance strategy of transport systems

LOUHICHI Rim

Directeurs de thèse : Mohamed SALLAK

Équipe : SCOP

**Abstract—** The growing complexity of industrial systems is driving public and private decision-makers to optimize the life cycle of a system, particularly with regard to maintenance operations. In this thesis, we propose an approach to optimize and plan the maintenance strategy taking into account both the costs of operations and the risks associated with system failure. The novelty of the proposed approach lies in an integration, in the objective function that we minimize, of the set of maintenance costs as well as the financial, environmental and human risks that could be caused by a possible system failure.

This thesis has started in May 2018 within the laboratory Heudiasyc and is part of the ANR project called MAPSYD (« MAintenance Prévisionnelle des SYstèmes de tranport en présence de Données incomplètes ou incertaines »). Several industrial (SECTOR, SYNOX) and academic (INSTITUT LOUIS BACHELIER, HEUDIASYC) partners are involved in this project.

Predictive maintenance is carried out following a forecast derived from repeated analysis or known characteristics and evaluation of the significant parameters of the degradation of the system [1]. Usually, we use the Remaining Useful Life (« *RUL* »), defined as the expected length of time left for the system before it falls down, as a measure of the system's health state.

Through predictive maintenance, it is now possible for industrials to estimate the *RUL* of the system as one among other measures used to predict the failure time of the system, so that industrials are able to maintain the system before it falls down. However, in practice, once the *RUL* or other indicators of the health state of the system are determined, industrials face several issues related to the decision making process: what is the best time to perform predictive maintenance? And how can we optimize the total cost of maintenance?

Besides, a sudden failure of the system may result in major accidents, causing damages to human and to the environment. The main challenge for industrials is to quantify the impacts of these probable accidents in order to implement a cost-efficient maintenance strategy [2].

In this thesis, we try to answer the previous issues by proposing an approach allowing to identify the cost-optimal strategy for predictive maintenance, taking into considerations the possible impacts that a failure accident may cause on the system and on its surroundings.

## II. METHODOLOGY DESCRIPTION

### A. Assumptions

In developing the predictive maintenance strategy, some assumptions are addressed as below:

- 1- The system under study is a single component.
- 2- The system under study is part of a whole complex system, which has a duration of exploitation known beforehand, noted  $D$ .
- 3- A perfectly reliable inspection is applied regularly on the system (figure 1). The inspection gives an information on the state of health of the system. For instance, the inspection gives a real estimation of the *RUL* of the system. After simulations, the *RUL* is the expected interval of time the system is likely to operate before it requires replacement. The *RUL* of the system can be expressed by the following equation:

$$RUL(t) = E[T - t | T > t] = \frac{\int_t^{\infty} (u-t) \cdot f(u) \cdot du}{S(t)} \quad (1)$$

with  $T$  the time of failure of the system,  $f$  the failure density function of the system and  $S$  the survival function of the system.

- 4- The inspection does not affect the system's performance.
- 5- A first inspection is required in the early life of the system, but the health of the system is supposed not to require replacement because it is a new one.
- 6- Between inspection  $i$  and inspection  $i+1$  (figure 1), one of these scenarios happens :

- Predictive maintenance scenario : the *RUL* of the system attains some threshold value called  $RUL_{lim}$  under which the system is considered as deteriorated : the system is replaced by a new one before the inspection  $i+1$ .

- Non-predictive maintenance scenario : in this scenario, the system is not replaced by predictive maintenance. In such case, the system can fail or not:

- o The system fails before the next inspection  $i+1$  knowing that he was operating at inspection  $i$ , the system is then correctively replaced by a new one. The probability of occurrence of this scenario is given by  $\int_{i \setminus T > t_i}^{i+1} f_i(t) \cdot dt = \frac{\int_i^{i+1} f_i(t) \cdot dt}{S_i(t_i)}$ , where  $t_i$  is the time of the  $i^{th}$

inspection,  $f_i$  and  $S_i$  are respectively the failure density function of the system between inspection  $i$  and  $i+1$  and the reliability of the system at inspection  $i$ .

- The system operates normally until the next inspection  $i+1$  with the complementary probability of occurrence  $1 - \int_{i \setminus T > t_i}^{i+1} f_i(t) \cdot dt$ .
- 7- The duration and the cost of both predictive and corrective replacement are assumed to be constant and known as well as the cost of one inspection.
- 8- The failure distribution of the system is the Weibull distribution that is actualized at each inspection

### B. Typology of costs

We try to minimize the total cost of maintenance in the planning horizon  $D$  which is the summation of : the cost of predictive maintenance  $C_p$ , the cost of corrective maintenance  $C_c$ , the cost of inspection  $C_i$ , the cost of operating loss due to maintenance  $C_{ol}$  and the indirect cost. The indirect cost takes in account the risks related to maintenance. The decision variables are the total number of inspection  $N_{in}$  and the binary variable  $N_i$  that takes 1 in case of predictive maintenance between inspection  $i$  and  $i+1$  and 0 elsewhere. Fig.1 gives the typology of costs included in the objective function to minimize.

### III. HUMAN DECISION MAKING

The risks of maintenance can be either human, financial or environmental. Human and environmental risks are difficult to evaluate in terms of monetary losses. In order to evaluate the monetary value of human risks, the different severity levels of human injuries and their corresponding compensation costs are used in our work. Finally, adequate methods are used in order to assess the economic cost of environmental damage caused by the emission of a pollutant due to system failure.

The evaluation of risks by the decision maker is impacted by his psychology and his attitude to risks. Prospect theory comes up to consider the psychology and the human cognitive process in the process of decision making. The prospect theory starts with the concept of loss aversion, an asymmetric form of risk aversion, from the observation that people react differently between potential losses and potential gains [3]. Thus, people make decisions based on the potential gains or losses relative to their specific situation (the reference point) rather than in absolute terms: this is referred to as reference dependence. For example:

- faced with a risky choice leading to gains, individuals are risk-averse, preferring solutions that lead to a lower expected utility but with a higher certainty [3].
- faced with a risky choice leading to losses, individuals are risk-seeking, preferring solutions that lead to a lower expected utility as long as it has the potential to avoid losses. The prospect theory takes then another turn from the classic model of the expected utility theory, which only considers choices with the maximum utility [3].

Usually, decision making is performed under uncertain situations, meaning that the probability distributions of possible events following a decision are not known or partially known.

Decision making criteria such as Wald, maximax, Hurwicz and minimax regret criteria, are used to deal with this problem of uncertainty [4]. In this thesis, we integrate the different previously cited points on risk and uncertainty in human decision making to our maintenance cost optimization methodology, namely the maintenance risks, the prospect theory applied to maintenance risks and uncertainty in the decision to whether to perform maintenance or not. We then consolidate our proposals on maintenance risks and uncertainty in human decision making with numerical examples

### IV. PUBLICATIONS

- LOUHICHI, R., SALLAK, M., PELLETAN., J. Maintenance prévisionnelle des systèmes de transport en présence de données incomplètes et imprécises (MAPSYD), Journée Régionale des Doctorants en Automatique (JRDA), Amiens, 2018 (poster).
- LOUHICHI, R., SALLAK, M., PELLETAN., J. A cost model for predictive maintenance based on risk-assessment, Conférence internationale CIGI QUALITA, Montréal, Canada, 2019 (conference paper).
- LOUHICHI, R., SALLAK, M., PELLETAN., J. Elaboration of an economic model for decision aid optimizing the maintenance strategy of transport systems, Journée Régionale des Doctorants en Automatique (JRDA), Lille, 2019 (poster).
- LOUHICHI, R., SALLAK, M., & PELLETAN, J. (2020). A Maintenance Cost Optimization Approach: Application on a Mechanical Bearing System. International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, 9(5) (journal paper).
- LOUHICHI, R., SALLAK M., & PELLETAN, J. (2020). Avenues for future research on predictive maintenance purposes in terms of risk minimization. ESREL 2020 (conference paper).

Cost of predictive maintenance	• $C_p = \sum_{i=1}^{N_{in}-1} c_p \cdot N_i$
Cost of corrective maintenance	• $C_c = \sum_{i=1}^{N_{in}-1} c_c \cdot (1 - N_i) \frac{\int_{t_i \setminus T \geq t_i}^{i+1} f_i(t) \cdot dt}{S_i(t_i)}$
Cost of inspection	• $C_i = N_{in} \cdot c_i$
Cost of operating loss	• $C_{ol} = \sum_{i=1}^{N_{in}-1} c_{dt} \cdot D_p \cdot N_i + \sum_{i=1}^{N_{in}-1} c_{dt} \cdot D_c \cdot (1 - N_i) \frac{\int_{t_i \setminus T \geq t_i}^{i+1} f_i(t) \cdot dt}{S_i(t_i)}$
Cost of indirect loss	• $C_{ol} = \text{human risk} + \text{financial risk} + \text{environmental risk}$

Fig. 1. Typology of cost for optimization of maintenance strategy

### References

- [1] Afnor (2018). Norme, N. F. "EN 13306: 2018", « Maintenance-Maintenance Terminology ».
- [2] Khan, F. I., & Haddara, M. M. (2003). Risk-based maintenance (RBM): A quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 16(6), 561–573.
- [3] Gollier C., Hilton D., and Raufaste E. Daniel Kahneman et l'analyse de la décision face au risque. Cairn.info, 113:295–307, 2003.
- [4] Starr M. K. A discussion of some normative criteria for decision-making under uncertainty. Industrial Management Review (pre-1986), 8:71, 1966

# Energy-Efficient, Robust and Secure Models for Large-Scale Internet of Things

Michaël MAHAMAT

PhD supervisors : Ghada JABER, Abdelmadjid BOUABDALLAH

Équipe : SCOP

**Abstract**—The Internet of Things (IoT) is more and more present in our everyday life with many connected constrained devices. The explosion of communication technologies and protocols creates new vulnerabilities and attack surfaces. The goal of this PhD is to find solutions to provide an adapted security service to secure the network while reducing energy consumption. In this summary, we present four classes of security solutions having a decreased energy consumption.

**Index Terms**—Internet of Things (IoT), Adaptive security, Context-aware security, Energy consumption.

## I. INTRODUCTION

The Internet of Things (IoT) is an emerging network paradigm where many heterogeneous objects can be connected, from sensors, actuators to smart objects or vehicles. IoT networks have many promising applications, from smart cities to smart health. Smart objects may have limited resources, such as energy, storage and computational power. Some smart objects can be powered via batteries, other thanks to capacitors. Some objects can be recharged, can harvest energy from their environment and others can be linked to the power grid, although it is expensive. As energy is a scarce and an expensive resource, it must be well used. Security solutions in IoT networks consume a non-negligible amount of energy, that is why there exists commercial solutions which do not implement security solutions or implement weak security [1].

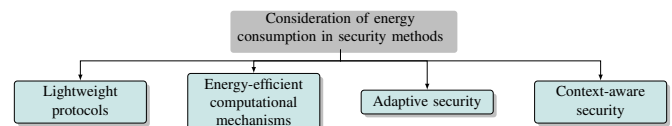
An ideal security solution for IoT networks should implement the following security services:

- Confidentiality: data protection from malicious entities.
- Integrity: data protection against malicious modifications.
- Availability: data must be available as much as possible.
- Non-repudiation: Actions or messages sent by a node cannot be repudiated by this node.

Confidentiality, integrity and availability are called the CIA attributes and must be fulfilled at all costs. Non-repudiation is also an important security attribute that should be fulfilled for critical systems.

This PhD thesis has started in October 2020 and it is co-funded by the multidisciplinary initiative “Mastery of safe and sustainable technological systems” of the Sorbonne University Alliance. It aims to study and propose models to balance the energy consumption of a security solution which satisfy the required security level. During this first year, we established a bibliography and we are finalizing a survey covering the fields of security solutions considering energy as a major constraint. Energy consumption of IoT networks as well as their security

Fig. 1. The different categories of security solutions considering energy presented in this survey.



are two major challenges for this research field and this PhD will be a means to reach a balance between security and energy.

## II. STATE OF THE ART

The first step of this PhD was to determine how can energy be efficiently saved or even, how can we find more energy due to the constrained nature of IoT devices. The second step has been to determine what classes of security solutions try to minimize their energy consumption.

### A. Management of energy in IoT networks

There is nothing to protect if nodes do not have sufficient energy to fulfill their duty. In order to maximize the network lifetime, energy must be well managed and two categories of techniques can be considered: energy harvesting and energy saving schemes [2].

IoT nodes, with appropriate equipment, can harvest energy from their environment to charge their batteries. Energy sources can be categorized regarding their controllability and predictability. For a given energy source, an adapted harvester is required. It is also possible to use mobile chargers along energy harvesting to extend nodes’ lifetime [3].

Apart from energy harvesting, there are schemes to efficiently manage energy and save it. They can either be algorithms, protocols or hardware solutions. Duty-cycling and wake-up radios, clustering and offloading computation techniques are examples of energy-efficient mechanisms.

These energy management schemes can optimize network lifetime and provide more energy to design complex applications or security services as they are energy consuming.

### B. Energy-efficient security solutions

We have identified four classes of security solutions which can lead to a reduced energy consumption compared to classical security approaches.

1) *Lightweight protocols*: Lightweight protocols are protocols specifically designed for constrained nodes [4], [5]. There are lightweight authentication protocols and lightweight encryption algorithms. Lightweight authentication protocols are designed to exchange less messages or be less computationally intensive to authenticate nodes and establish their identity. Lightweight encryption algorithms are designed to encrypt data using less resources and respect the confidentiality attribute.

Lightweight encryption algorithms should always be used and considered as building blocks for more complex security solutions. Lightweight authentication algorithms are often linked to access control mechanisms because after authentication, a node may be granted or denied access to data or services.

2) *Energy-efficient computational mechanisms*: For constrained or energy-harvesting nodes, there are methods to alleviate the energy cost of a given security solution while guaranteeing an adequate security level. For instance, we may offload heavy security operations to nodes having an excess of energy or pre-compute special values (called coupons) needed for a security service [6].

3) *Adaptive security*: The design of a security solution able to adapt over time its security level is challenging. Indeed, it requires to know if the network is under attack or if there is sensitive data. Adaptive security solutions provide an adaptive security service and are either threat-oriented or data-oriented. This approach can be combined with energy-efficient mechanisms to reduce the energy consumption of the security solution [7].

4) *Context-aware security*: Being able to have a security solution aware of the environment and network state may be the best way to balance the security service and its related energy consumption. Moreover, we can provide a fined-grained security service to the user by considering its context. Context-aware security is suited to mobile nodes as an adequate security service is chosen given the context [8], [9].

### III. ON-GOING WORKS AND POTENTIAL APPROACHES

From the state of the art presented in II, we identified that old and static approaches (such as applying the same security service to each node and data) to secure IoT networks are not the best approaches to maximize network lifetime. We are finalizing a survey of existing security solutions that offer a balance between the security service and the energy consumption. Different classes of security solutions have been identified to lean toward a reduced energy consumption. If one combines energy management schemes and lightweight or energy-aware security solutions, IoT networks may consume less energy while being efficiently secured. It is however difficult to protect each node in an IoT network because they are heterogeneous. In fact, due to the lack of common standards, each manufacturer may implement its own standards and security solutions. The use of many different devices from different manufacturers may create security breaches in the network.

As some IoT networks are dynamic and exposed to multiple threats, we need to adopt a new approach to tackle these new threats while considering the energy consumption. Lightweight protocols are static and do not suffice to secure IoT networks by themselves. The Advanced Encryption Standard (AES), an encryption algorithm, is widely used for its good security. However, it consumes more energy than lightweight alternatives such as the Tiny Encryption Algorithm (TEA) or the block cipher SPECK, which also provide a good security level. We need to consider an adaptive solution, aware of the network state, whether it is total or partial. This security solution should use lightweight blocks instead of costly building blocks for a nominal working state and only use costly operations during critical moments. Reinforcement learning (RL) is a promising approach to find the optimal security policy to use at a given time to secure an IoT network. It has been used in recent research with interesting results [10]. Combining multiple RL agents (routers, edge or fog nodes, controllers ...) to detect intrusions, anomalies and take an appropriate security decision might lead to an adaptive security solution, while considering energy constraints and heterogeneity in the decision.

### REFERENCES

- [1] F. Meneghello, M. Calore, D. Zucchetto, M. Polese, and A. Zanella, "IoT: Internet of Threats? A Survey of Practical Security Vulnerabilities in Real IoT Devices," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 6, no. 5, pp. 8182–8201, Oct. 2019.
- [2] D. K. Sah and T. Amgoth, "Renewable energy harvesting schemes in wireless sensor networks: A Survey," *Information Fusion*, vol. 63, pp. 223–247, Nov. 2020.
- [3] C. Wang, J. Li, Y. Yang, and F. Ye, "Combining Solar Energy Harvesting with Wireless Charging for Hybrid Wireless Sensor Networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 17, no. 3, pp. 560–576, Mar. 2018.
- [4] L. E. Kane, J. J. Chen, R. Thomas, V. Liu, and M. Mckague, "Security and Performance in IoT: A Balancing Act," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 121 969–121 986, 2020.
- [5] E. Aerabi, M. Bohlouli, M. H. A. Livany, M. Fazeli, A. Papadimitriou, and D. Hely, "Design Space Exploration for Ultra-Low-Energy and Secure IoT MCUs," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 19:1–19:34, May 2020.
- [6] H. Hellaoui, M. Koudil, and A. Bouabdallah, "Energy-efficient mechanisms in security of the internet of things: A survey," *Computer Networks*, vol. 127, pp. 173–189, Nov. 2017.
- [7] —, "Energy Efficiency in Security of 5G-Based IoT: An End-to-End Adaptive Approach," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 7, pp. 6589–6602, Jul. 2020.
- [8] A. Asaithambi, A. Dutta, C. Rao, and S. Roy, "Online Context-Adaptive Energy-Aware Security Allocation in Mobile Devices: A Tale of Two Algorithms," in *Distributed Computing and Internet Technology*, D. V. Hung and M. D'Souza, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 281–295.
- [9] M. A. Massad and B. A. Alsaify, "MQTTSec Based on Context-Aware Cryptographic Selection Algorithm (CASA) for Resource-Constrained IoT Devices," in *2020 11th International Conference on Information and Communication Systems (ICICS)*, Apr. 2020, pp. 349–354.
- [10] T. Mohammed, A. Albeshri, I. Katib, and R. Mehmood, "UbiPriSEQ—Deep Reinforcement Learning to Manage Privacy, Security, Energy, and QoS in 5G IoT HetNets," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 20, p. 7120, Jan. 2020.

# Planification de ressources et ordonnancement de tâches dans la chaîne inter et intra logistique hospitalière

Lahcene Mezouari

Directeurs de thèse : A. Moukrim

Co-encadrant : J.P. Boufflet

Équipe : SCOP

**Résumé**—Les travaux s’inscrivent dans le cadre du projet ANR OILH (Optimisation Inter et Intra Logistique Hospitalière) et ont pour objectif de concevoir et de développer un système d’aide à l’ordonnancement et à la planification des ressources dans les systèmes de production de soins.

Cette thèse s’inscrit dans le cadre du projet ANR OILH (Optimisation Inter et Intra Logistique Hospitalière) qui vise à concevoir et développer un système d’aide à l’ordonnancement et à la planification des ressources dans les systèmes de production de soins avec comme cas d’étude, les urgences Adultes/CHU de Lille. Les travaux ont débuté en juillet 2019 au sein du laboratoire Heudiasyc de l’UTC sous la direction de A. Moukrim et le co-encadrement de J.P. Boufflet.

Les services des urgences adultes (SUA) assurent la prise en charge des venues non programmées, dans un établissement de santé public ou privé, vingt-quatre heures sur vingt-quatre, tous les jours de l’année, de toute personne sans sélection, se présentant en situation d’urgence, y compris psychiatrique.

Le manque de ressources des services d’urgence pour faire face aux changements rapides observés dans la demande entraîne des niveaux élevés de congestion dans les salles d’attente des services des urgences. Les manques de ressources concernent les professionnels de santé (les infirmières, les médecins,...), mais aussi des ressources fixes, comme la capacité en lits. La congestion est causée par l’arrivée aléatoire des patients ainsi que par l’impossibilité de connaître à l’avance toutes les tâches de soin à prodiguer à un patient. Dans un monde idéal où l’on dispose d’informations parfaites sur l’arrivée des patients et les tâches de soin, il serait possible d’allouer la quantité exacte de ressources nécessaires au service. L’objectif de cette thèse est l’étude et le développement de modèles et de méthodes d’optimisation pour l’ordonnancement des tâches de soins directes ou indirectes à compétences multiples en tenant compte des ressources matérielles et humaines.

## I. AVANCEMENT

Les études portant sur l’amélioration du fonctionnement des systèmes de santé se sont multipliées ces dernières années, en particulier, celles sur l’organisation et l’opération des services des urgences. L’étude bibliographique a porté sur les problèmes d’ordonnancement et de planification dans les systèmes de santé. Trois grandes catégories sont identifiables :

les *Staffing problems* [1]–[3] (problèmes de dimensionnement, long terme), les *Rostering problems* [4]–[6] (problèmes d’affectation de ressources à des périodes de travail, moyen terme) et les *Task Scheduling problems* [7]–[10] (allocation des ressources aux patients pour réaliser des tâches de soins spécifiques, court terme). À l’heure actuelle, peu de travaux de recherche portent sur la résolution des *Task Scheduling problems*. Notre problématique s’insère dans la catégorie des *Task Scheduling Problems*. Ces problèmes sont particulièrement difficiles à traiter. Ils nécessitent de prendre en considération des contraintes de qualité de service, la disponibilité des ressources à chaque instant ainsi que l’arrivée non programmée des patients dans les SUA.

Nous avons observé des différences dans la procédure de traitement des patients selon les pays, ce qui rend la mise en comparaison difficile. Pour modéliser le parcours des patients dans le service des urgences du CHU Jeanne de Flandres de Lille, nous avons réalisé plusieurs séjours au SUA guidés par deux médecins urgentistes. Nous avons étudié l’organisation du SUA et observé les parcours des patients, les tâches des personnels et l’allocation des ressources matérielles. La fig 1 schématise l’organisation du SUA du CHU de Lille.

Les processus de soins présentent généralement des étapes ou des états de difficulté qui affectent négativement la qualité des soins dispensés aux patients. La structuration de chaque étape du processus est nécessaire pour révéler les transitions, les périodes d’attente et les divergences qui peuvent entraver la qualité des soins dispensés aux patients. Au départ, il est essentiel de se concentrer sur la compréhension des processus, et non sur la recherche de solutions. Nous avons modélisé le parcours des patients dans le SU du CHU de Lille par un *workflow*. Le *workflow* est la série des étapes d’activité et de points de décision qui se produit pour qu’un processus entier soit réalisé.

Le service des urgences adultes du CHU de Lille comprend deux circuits. Le circuit court (CC) fonctionne à la journée, il prend en charge les patients les moins urgents de 08h00 à 21h00, il est composé d’une unique zone (Cf. Fig 1). Le circuit long (CL) fonctionne 24h/24h et 7 jours/7, il prend en charge les patients les plus urgents dans la journée et tous les patients qui se présentent aux urgences la nuit, il est composé de quatre zones (Cf. Fig 1).

Le circuit long peut être vu comme plusieurs CC partageant



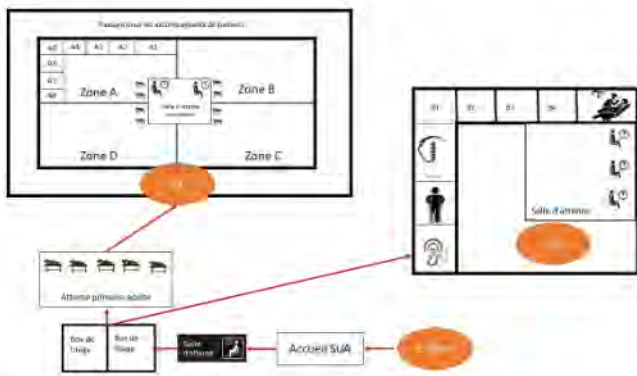


Fig. 1. Parcours patient dans le SU

des lieux ou ressources en commun. Nous avons modélisé le fonctionnement du circuit court (CC). L'objectif est de concevoir une modélisation la plus fidèle possible du fonctionnement réel du CC du SUA. Il s'agit d'identifier les séquencements de tâches au sein du SUA mais aussi les séquencements de tâches au sein des services externes au SUA. Cette modélisation permettra le développement de méthodes d'optimisation et d'ordonnancement.

Nous définissons trois concepts nécessaires à la modélisation les parcours patients :

- tâches : de soins (interne ou externe au SUA), d'attentes (interne ou externe au SUA), de déplacements (interne ou externe au SUA) ;
- ressources : regroupées par type, médecin, infirmier, aide-soignant, électrocardiographe (ECG) sur chariot, matériel de radiologie, matériel du service d'analyse biologique, etc ;
- lieux : au sein du SUA ou à l'extérieur du SUA dans d'autres services.

L'idée générale de la modélisation est qu'une *tâche de soin* requiert une ou des *ressource(s)* pour être réalisée et elle est exécutée dans un *lieu*. Une tâche est obligatoirement associée à un patient. Une tâche peut nécessiter d'être réalisée dans un *lieu* spécifique ou peut être réalisée indifféremment dans plusieurs lieux. Les temps d'attente sont modélisés comme des *tâches d'attente* qui suivent d'autres tâches, elles ne requièrent pas de ressources mais ont besoin d'un *lieu* pour être réalisées. Les *tâches de déplacement* sont réalisées entre des lieux. Les *ressources* peuvent être internes au SUA, elles sont de type personnel (médecin, infirmier, aide-soignant, etc.) mais aussi de type matériel (ECG sur chariot). Les *ressources* peuvent être externes au SUA, nous ne pouvons détailler précisément ces ressources (e.g. scanner et personnel médical qui réalise le scanner). La *tâche de soin* qui les utilise peut être vue comme une agrégation de l'utilisation de ressources qui ne sont pas maîtrisées par le SUA. Plusieurs *lieux* différents existent au sein du SUA pour réaliser des tâches de soin. Certaines tâches de soin (e.g. analyse biologique, radiographique) sont réalisées dans des *lieux* externes au SUA. Les lieux sont des ressources particulières identifiées explicitement car il est nécessaire de connaître l'emplacement d'un patient lors de son parcours au sein du SUA et en dehors du SUA pour les tâches de soin,

d'attente et de déplacements. Les lieux sont de capacité limitée à respecter, mais en situation tendue ils peuvent être utilisés en surcapacité.

Nous avons conçu un modèle mathématique basé sur le Programmation Linéaire en Nombres Entiers (PLNE), nous sommes en phase d'implémentation de ce modèle.

## II. PERSPECTIVES

Actuellement nous analysons des données recueillies au SUA de Lille afin de déterminer la nature des informations existantes et les informations manquantes. Notre objectif est d'identifier et d'extraire, si cela est possible, des DAG (*Direct Acyclic Graph*) de tâches (nature de chaque soin et de chaque examen), leur durée et leur séquencement. Il s'agit de mettre en évidence des parcours patients, ou des parties de parcours correspondant à des scénarios types. Dans [8], les auteurs ont modélisé uniquement quatre DAG avec des médecins urgentistes. L'identification de DAG, ou de portion de DAG, permet d'avoir une base d'information sur la nature (ressources nécessaires) et la structuration (ordre) des tâches des parcours patients. Ce travail nous permettra de valider la modélisation et de tester le PLNE dans le cas statique où toutes les données sont connues. Ce qui nous permettra de proposer ensuite une approche d'ordonnancement dynamique des tâches de soins d'un service d'urgence.

## REMERCIEMENTS

Ces travaux sont financés par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet OILH (Réf. ANR-18-CE19-0019).

## RÉFÉRENCES

- [1] L. V. Green, J. Soares, J. F. Giglio, and R. A. Green, "Using Queueing Theory to Increase the Effectiveness of Emergency Department Provider Staffing."
- [2] N. Izady and D. Worthington, "Setting staffing requirements for time dependent queueing networks : The case of accident and emergency departments," *European Journal of Operational Research*, vol. 219, no. 3, pp. 531–540, jun 2012.
- [3] D. Sinreich, O. Jabali, and N. P. Dellaert, "Reducing emergency department waiting times by adjusting work shifts considering patient visits to multiple care providers," *IIE Transactions*, vol. 44, no. 3, pp. 163–180, mar 2012.
- [4] J. F. Bard and H. W. Purnomo, "Hospital-wide reactive scheduling of nurses with preference considerations," *IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)*, vol. 37, no. 7, pp. 589–608, jul 2005.
- [5] E. K. Burke, J. Li, and R. Qu, "A hybrid model of integer programming and variable neighbourhood search for highly-constrained nurse rostering problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 203, pp. 484–493, 2009.
- [6] C. Ferreira, F. C. Filho, D. Aparecida, R. Rocha, G. Fernandes Costa, W. Coelho, and A. Pereira, "Using Constraint Satisfaction Problem approach to solve human resource allocation problems in cooperative health services," 2012.
- [7] Şafak Kırış, N. Yüzügüllü, N. Ergün, and A. Alper Çevik, "A knowledge-based scheduling system for emergency departments," *Knowledge-Based Systems*, vol. 23, no. 8, pp. 890–900, 2010.
- [8] R. Luscombe and E. Kozan, "Dynamic resource allocation to improve emergency department efficiency in real time," *European Journal of Operational Research*, vol. 255, no. 2, pp. 593–603, 2016.
- [9] F. Ajmi, H. Zgaya, S. B. Othman, and S. Hammadi, "Agent-based dynamic optimization for managing the workflow of the patient's pathway," *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 96, nov 2019.
- [10] S. Lee and Y. H. Lee, "Improving Emergency Department Efficiency by Patient Scheduling Using Deep Reinforcement Learning," *Healthcare*, vol. 8, no. 2, pp. 77–78, mar 2020.

# Modélisation et conception d’algorithmes pour la planification d’emplois du temps, CRONOS

Mohamed Amine Ouberkouk

Directeur de thèse : Aziz Moukrim

Équipe : SCOP

**Résumé**— La planification d’emplois du temps consiste à allouer des activités à des ressources et à des intervalles de temps dans un horizon de planification prédéfini, en respectant des contraintes de précédence, de durée, de capacité, de disjonction et d’exclusion. Le but de la thèse est d’étudier différents problèmes de planification, proposer une modélisation pour ces problèmes et de mettre en œuvre des méthodes de résolution efficaces basées sur des techniques de recherche opérationnelle et d’optimisation combinatoire pour les traiter. Deux problèmes de planification sont étudiés : le problème de planification d’équipes de pompiers et le problème de planification de cours d’universités.

## I. CONTEXTE

La thèse est financée par le Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche (MESR). Mes travaux de thèse ont débuté le 21 Janvier 2019 au laboratoire Heudiasyc (Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes, UMR-CNRS 7253) de l’Université de Technologie de Compiègne sous la direction de M. Aziz Moukrim et le co-encadrement de M. Jean-Paul Boufflet.

## II. OBJECTIF

L’objectif de cette thèse est d’explorer et de mettre en œuvre des approches pour la planification d’emploi du temps. Deux problèmes sont étudiés : le problème de planification de cours d’universités et le problème de planification d’équipes de pompiers. Nous envisageons d’explorer dans un premier temps la conception de prétraitements et la caractérisation de sous-ensembles d’activités difficiles à placer. Dans un second temps, nous explorerons des approches utilisant des hybridations de méthodes de résolution issues d’heuristiques, d’algorithmes de traitement de graphes et de la programmation mathématique. Il s’agit de développer des modèles linéaires et de procéder à la mise en place de schémas de résolution basés sur la génération de colonnes et/ou la génération de coupes. La validation s’appuiera sur les variantes mises à disposition de la communauté et sur les instances que nous aurons générées pour les différents types de problèmes traités.

## III. PROBLEMATIQUES TRAITEES

Nous étudions actuellement deux problèmes de planification, le problème d’emploi du temps de cours de l’UTC et le problème de planification d’équipes de pompiers (suite de travaux dans le cadre du projet européen Geo-SAFE).

### A. Les problèmes de planification de cours des universités

Les institutions de formation font face à des problèmes complexes de planification. La conception des plannings devient un enjeu majeur dans un cadre budgétaire contraint. Les

problèmes d’emploi du temps de cours d’universités sont des problèmes de planification sous contraintes de ressources. Il s’agit de construire des emplois du temps (EDT), c-à-d des plannings de modules d’enseignements composés d’activités pédagogiques (cours, TD, TP, etc.) en respectant des contraintes. L’objectif est de construire des plannings qui respectent des contraintes dures en minimisant des contraintes souples qui induisent des pénalités qui servent de métrique pour mesurer la qualité des EDT. L’ensemble de contraintes est spécifique de l’organisation pédagogique de l’université et des objectifs de qualité d’EDT qu’elle vise à atteindre. De fait, il existe une grande variété dans les contraintes (e.g. intégration de formations par voie d’apprentissage, accueil d’étudiants en situation de handicap, déplacements entre les sites, répartition des étudiants dans les modules en tenant compte des choix des étudiants).

Les emplois du temps d’universités font l’objet de compétitions internationales. Dans la compétition ITC2007 deux problèmes sont définis : CBCT (*Curriculum-Based Course Timetabling*) et PECT (*Post-Enrollement Course Timetabling*). Le CBCT concerne la conception d’emploi du temps de cours sur une semaine standard. Les cursus, ensemble de modules d’enseignement, suivis par des populations d’étudiants connues, sont fixes. Le PECT concerne aussi la conception d’emploi du temps de cours sur une semaine standard. Cependant, les cursus ne sont pas figés afin d’offrir aux étudiants le maximum de choix possibles dans leurs modules. Les étudiants s’inscrivent aux cours, et la minimisation des conflits d’étudiants fait partie des contraintes souples à minimiser. Ces définitions de problèmes d’emploi du temps d’universités sont des versions simplifiées de problèmes réels.

Dans la compétition ITC 2019 [2], le problème consiste, comme dans le cas du PECT de ITC2007, à construire conjointement le planning de cours (salles, horaires) et à affecter les étudiants dans les cours. Les contraintes dures usuelles permettent de définir l’admissibilité d’une solution (e.g. deux cours ne peuvent pas être planifiés dans une même salle). Les contraintes souples violées usuelles du PECT induisent des pénalités à minimiser pour obtenir des EDT de bonne qualité (e.g. éviter qu’un étudiant soit affecté à deux classes en même temps). Cependant le problème défini est plus proche de situation réelles en intégrant plus de données (e.g. l’horizon de planification est défini sur plusieurs semaines) et des contraintes qui se rapprochent plus de situation réelles (e.g. contraintes de distributions qui permettent d’intégrer les contraintes dures et souples des enseignants).

Chaque instance du problème a pour paramètre le nombre de semaines considérées, le nombre de jours dans une semaine ainsi que le nombre de créneaux dans une journée. Une salle est

définie par un identifiant et une capacité. Les déplacements des étudiants fait, par exemple, partie des contraintes souples à considérer.

Un cours est une structure hiérarchisée de classes. Il peut être constitué d'une ou plusieurs configurations. Chaque configuration est décomposée en sous-parties, et chaque sous-partie est composée d'une ou plusieurs classes.

Un étudiant affecté à un cours doit suivre une unique configuration, et dans chaque sous-partie de la configuration il est affecté exactement à une classe. Pour certaines classes, une classe parent est définie : tout étudiant participant à cette classe doit obligatoirement participer également à la classe parent. Une classe peut se réunir plusieurs fois par semaine, sur toutes ou une partie des semaines. La classe débute toujours à la même heure, à la même durée et est toujours dans la même salle. Pour chaque classe, on dispose de la pénalité associée au choix des salles possibles pour cette classe. Chaque classe dispose également d'une limite d'étudiants qu'elle peut accueillir.

Les étudiants sélectionnent les cours qu'ils souhaitent suivre. Une pénalité est accordée si un étudiant ne peut pas suivre un cours. Pour toutes les instances de la compétition, il existe au moins une solution réalisable, c'est-à-dire respectant les contraintes dures.

#### B. Problème de planification de cours de l'UTC

Le processus de gestion d'emplois du temps (EDT) à l'UTC est un processus cyclique. Une année universitaire est divisée en deux semestres. A chaque semestre correspond un cycle de conception d'EDT pour le semestre suivant.

Le problème de planification de cours de l'UTC consiste à produire un emploi du temps pour l'ensemble des UVs et enseignants de l'UTC et à affecter les étudiants aux UVs selon leurs choix. Nous disposons d'un ensemble d'UVs qui sont organisées en grilles. Une grille d'UVs représente un regroupement d'UVs du même type, cycle ou branche. Elle est divisée en plusieurs ensembles d'UVs sur lesquelles sont imposées des contraintes de compatibilité. Un ensemble d'UVs est dit compatible s'il peut être suivi par le même étudiant. C'est-à-dire, il existe un EDT réalisable, dans lequel un étudiant pourra être affecté à au moins un groupe de chaque activité de chaque UV. La notion de compatibilité est introduite afin de permettre la modélisation d'EDT.

Le problème de planification de cours de l'UTC est un problème fortement contraint, plusieurs contraintes sont imposées sur les différentes entités du problème. Nous citons les contraintes de distribution des UVs, les contraintes de disponibilités de salles, les préférences des enseignants ainsi que les contraintes de compatibilité.

#### C. Problème de planification d'équipes de pompiers

Le projet GEO-SAFE a réuni 17 partenaires dans 7 pays dont l'UTC. La thématique traitée par le projet concerne les feux de forêts.

Durant un détachement à l'université RMIT, nous avons travaillé sur la modélisation du problème d'emploi du temps des équipes de pompiers de l'institution INFOCA (Incendios

Forestales Comunidad Andaluza) en Andalousie, Espagne. INFOCA est une institution de prévention et de lutte contre les incendies de forêt en Andalousie qui comporte 23 bases. Nous nous sommes intéressés à la base la plus importante de cette institution qui est la base PUERTO LOBO. Elle comporte 18 équipes constituées de 7 pompiers chacune. La période de planification visée est la période à haut risque de feux de forêts entre le 1 juin et le 15 octobre.

Le problème consiste à déterminer le planning dans un horizon de planification fixe pour un certain nombre d'équipes de pompiers qui peuvent être affectées à plusieurs tâches telles que le travail en hélicoptère, le travail pendant la nuit, le travail sur demande (*on call for 24 hours*), ... L'objectif est de construire un planning pour chaque équipe en respectant les demandes minimales pour chaque tâche, les contraintes de réglementation imposées par l'institution ainsi que d'autres contraintes souples de bonne pratique afin de rendre les plannings adéquats aux préférences de l'institution. Les contraintes de bonne pratique concernent le regroupement des affectations des mêmes tâches dans des jours consécutifs, l'affectation des compensations après les jours de repos ainsi que la maximisation du nombre d'équipes opérationnelles chaque jour.

#### IV. CONTRIBUTIONS

Pour le problème de planification d'équipes de pompiers nous avons proposé deux modélisations sous forme de PLNE (Programme Linéaire en Nombres Entiers) qui sont efficaces sur des instances de petites tailles. Pour les instances de plus grandes tailles, nous avons proposé plusieurs méthodes de résolution : une heuristique de construction/destruction (AIDCH) et une méta-heuristique ALNS (*Adaptive Large Neighborhood Search*). Nous avons testé nos méthodes de résolution sur des datasets générés à partir des informations réelles de l'institution INFOCA. Nous avons aussi travaillé sur une version bi-objective du problème de planification de pompiers pour lequel nous avons mis sur place une méthode de résolution basée sur les  $\epsilon$ -contraintes et un algorithme de population pour la résoudre. Un article est soumis à la conférence META 2021.

Suite aux échanges avec la DSI et la DFP, nous avons établi le modèle physique du problème de planification de cours de l'UTC. Nous travaillons à présent sur une modélisation mathématique du problème de l'UTC et sur une méthode de résolution pour le traiter en nous appuyant sur les approches de résolution que nous avons mis en place pour le problème de planification d'équipes de pompiers.

#### Références

- [1] Babaei, H., Karimpour, J., and Hadidi, A. (2015). A survey of approaches for university course timetabling problem. *Computers & Industrial Engineering*, 86, 43-59.
- [2] Müller, T., Rudová, H., & Müllerová, Z. (2018). University course timetabling and international timetabling competition 2019. In *Proceedings of 12th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT)* (p. 27)

# Selective vehicle routing problems in cooperative wildfire response operations

Quentin PEÑA

Directeurs de thèse : Aziz MOUKRIM, Mehdi SERAIRI

Équipe : SCOP

**Abstract**—During a wildfire, community assets require protection actions carried out by Incident Management Teams (IMT). It is crucial for them to be able to reallocate the resources in a timely manner as disruptions may occur. We propose a heuristic resolution based on a relax-and-fix method to obtain a good trade-off surface between total protected value and deviation from initial plans in a timely manner for large instances.

## I. INTRODUCTION

This work is based on a Ministry of Research (Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche – MESR) grant. The thesis started on November, 2020, within the Heudiasyc laboratory (Heuristique et Diagnostic des Systèmes Complexes, UMR-CNRS 7253) of the Université de Technologie de Compiègne, under the supervision of Aziz Moukrim and Mehdi Serairi.

### A. Wildfire and response operations

For years, wildfires have been a common occurrence throughout the world. Due to the summers being drier and warmer, wildfires break more frequently in France, destroying 15,000 hectares of vegetation in 2019, 10,000 more than in the previous year. In 2020 again, several wildfires burned thousands of hectares of forest and vegetation. France is not the only country that has to deal with such fires, that can be caused by both natural causes and human actions and are facilitated by global warming and climate change. In 2019, more than 40,000 fires burned 906,000 hectares of the Amazonian forest. The same year, more than 100,000 hectares burned in California, and the Australian "Black Summer" started, burning over 18.6 million hectares at its end in March of 2020.

During these wildfires, community assets such as houses, schools, hospitals, bridges, or factories, face the risk of being damaged or destroyed. In some cases, this risk can be diminished or nullified if preventive protection actions are taken. Protection requires resources to be dispatched in a timely manner to the asset. These interventions are carried out by the Incident Management Teams (IMT) before the fire reaches the assets. Such actions include removing fuel materials, wetting down buildings, or reducing fire. The time window for performing these actions is crucial: they have to be taken before the fire fronts reach the asset, but not too early for the protection to be efficient. Some interventions may require several trucks with specific capacities, thus requiring different teams to collaborate to perform the task in a synchronous way.

Based on fire spread and behavior models, it is possible to plan routes for each of the trucks respecting the synchronization and time windows constraints, so that a maximum number of community assets are protected. However, unforeseen disruptions, such as changes in weather, vehicle breakdowns, or road closures, may happen. It is then crucial to update the initial plans and reallocate the resources in response to these unexpected changes.

### B. Wildfire Asset Protection problem

The routing of wildfire response vehicles for the protection of community assets is known as the Wildfire Asset Protection problem (WAP) [1]. It is a variant of the Team Orienteering Problem (TOP) with time windows and synchronization constraints.

Reallocation of the response vehicle rising when a disruption occurs is a dynamic variant of the WAP. It aims at giving a trade-off surface (called Pareto front) between the total protected value and the number of changes on the routes of the vehicles (deviation), thus offering a tool for IMTs to react efficiently to unexpected scenarios. Based on the static WAP, a mixed-integer programming (MIP) model was proposed [2] to generate the Pareto front of the problem using an  $\epsilon$ -constraint based method [3].

## II. PROGRESS

The dynamic WAP problem is at an early stage of research. Full optimal solutions are achieved only for small-size instances. We improved the MIP for the problem through valid inequalities and reformulations. These improvements are not detailed here, and will be the focus of an upcoming paper.

Relaxations of this new modelisation present interesting characteristics that we present in Section II-A. We used these characteristics to develop a heuristic method that embeds a relax-and-fix resolution within an  $\epsilon$ -constraint scheme.

### A. Relaxations

There are three different sets of binary variables in our model:  $\mathbf{X}$  variables representing the movement of vehicles between assets,  $\mathbf{Y}$  variables representing the protection of an asset, and  $\mathbf{Z}$  variables representing the deviation from pre-disruption assignment. We explored the relaxation to continuous variables of these sets of binary variables. We solved our model for generating the extreme point with highest



total protected value (TPV), on instances with 40 assets. We selected at random one of the vehicles for breakdown, on three separate runs for each of our ten instances. Results are presented in Table I. The first three columns "Binary Variables ?" indicate which of the three sets of variables **X**, **Y** and **Z** are relaxed. The average solve time is presented in column "Solve Time". The last column "Solution Integer ?" indicates if all variables, including those relaxed, always have an integer value in the solution.

Table I  
RELAXATIONS FOR HIGHEST TPV POINT, 40 ASSETS

Binary Variables ?			Solve Time	Solution Integer ?
<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>		
✓	✓	✓	6.76	✓
x	✓	✓	12.6	x
✓	x	✓	16.1	✓
✓	✓	x	7.14	✓
x	x	✓	16.6	x
x	✓	x	0.17	x
✓	x	x	26.6	✓
x	x	x	0.12	x

We first observed that some partial relaxations of our model always lead to an integer solution. It is always the case when the **X** variables remain binary. We can explain this behaviour by looking at the constraints of our model linking **X** and **Y** variables (respectively **X** and **Z** variables). As we try to maximize total protected value, **Y** variables will always take the highest possible value between 0 and 1. When **X** variables are forced to have their value be 0 or 1, **Y** variables are either forced to take the value 0 or allowed to take the value 1. Hence, all **Y** variables will have their value be 0 or 1 exclusively. The same logic can be applied to **Z** variables, and the minimization of deviation.

We also observed that solving the linear relaxation of the model (i.e. when all binary variables are relaxed) is on average 50 times faster than the original binary model. This is not a surprise: linear programs (LP) can be solved in polynomial time, while it is not possible for MIP. We can however note that not relaxing the **Y** variables does not degrade the solve time of the linear relaxation. When relaxing **X** and/or **Z** variables, we observed a higher solve time for our relaxed model than the original binary model.

### B. Relax-and-fix

Based on the observations presented in section II-A, we developed a relax-and-fix method to solve our problem. Relax-and-fix heuristics have been widely used for instance for lot-sizing problems [4] or lot-scheduling problems [5].

Algorithm 1 illustrates the relax-and-fix procedure that we used. The idea is to start from a model where integrality constraints on integer variables are removed. From this model that we can solve rapidly, we iteratively reintroduce integrality constraints on variables, and fix the value of part of the integer variables, until we obtain an integer solution.

We know from our previous work that the model with variables **X** and **Z** variables relaxed is solved rapidly, and that when all **X** variables are binary we always obtain an integer

---

### Algorithm 1: Relax-and-fix algorithm

---

**Data:**  $\alpha, \beta$  : parameters  
 Create the relaxation of the model;  
 Force  $\alpha$  variables to be integer;  
 Solve the relaxed model;  
**while** the solution is not integer **do**  
     Fix the value of  $\beta$  integer variables;  
     Force  $\beta$  new variables to be integer;  
     Solve the relaxed model;  
**end**

---

solution. We hence applied the relax-and-fix procedure starting on the model with **X** and **Z** variables relaxed, and iteratively reintroduce integrality constraints on **X** variables. Results are presented in section II-C.

The choice of variables whose value will be fixed or integrality constraint reintroduced in the next iteration is important. Several strategies are presented in [6]. We developed a strategy based on the specificities of our problem – details will be presented in an upcoming paper.

The relax-and-fix procedure we implemented is particularly interesting as it always leads to a feasible solution, i.e. there are no variables that lead to an infeasibility when fixed.

### C. Results

We used the relax-and-fix procedure to generate the full Pareto Front on a benchmark of instances generated following Merwe et al. instructions [1]. For each instance, we randomly select one vehicle that breakdowns as the disruption.

For instances with 50 assets, optimal Pareto fronts were generated on average in 110 seconds. Our relax-and-fix method produced Pareto fronts in 50 to 75 seconds (depending on parameters  $\alpha$  and  $\beta$ ), of great quality (more than 80% of the average 15.5 optimal points were found, as well as a few non-optimal non-dominated points).

For instances with 60 assets, optimal Pareto fronts were generated on average in 1120 seconds, while our relax-and-fix method managed to generate good approximate fronts in 200 to 300 seconds, and 60% of the average 23.5 optimal points, and five non-optimal non-dominated points.

### REFERENCES

- [1] M. Merwe, J. Minas, M. Ozlen, and J. Hearne, "A mixed integer programming approach for asset protection during escaped wildfires," *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 45, 04 2015.
- [2] M. Merwe, M. Ozlen, J. Hearne, and J. Minas, "Dynamic rerouting of vehicles during cooperative wildfire response operations," *Annals of Operations Research*, vol. 254, 07 2017.
- [3] M. Ozlen and M. Azizoglu, "Multi-objective integer programming: A general approach for generating all non-dominated solutions," *European Journal of Operational Research*, vol. 199, pp. 25–35, 11 2009.
- [4] N. Absi and W. van den Heuvel, "Worst case analysis of relax and fix heuristics for lot-sizing problems," *European Journal of Operational Research*, vol. 279, no. 2, pp. 449–458, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221719304850>
- [5] D. Ferreira, R. Morabito, and S. Rangel, "Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants," *Computers & OR*, vol. 37, pp. 684–691, 04 2010.
- [6] C. Toledo, M. Arantes, M. Hossomi, P. França, and K. Akartunali, "A relax-and-fix with fix-and-optimize heuristic applied to multi-level lot-sizing problems," *Journal of Heuristics*, vol. 21, pp. 1–31, 10 2015.

# Sûreté de fonctionnement pour les mécanismes déclaratifs, en particulier réseaux de neurones, dans la prise de décision des véhicules autonomes.

Augustin VIOT

Directeurs de thèse : Walter SCHÖN, Benjamin LUSSIER, Stéphane GÉRONIMI, Armando TACHELLA  
Équipe : SCOP

**Résumé**—Ce document présente un résumé des travaux d’une thèse CIFRE débutée le 7 janvier 2019 et portant sur la sûreté de fonctionnement des réseaux de neurones pour la décision du véhicule autonome. Il présente l’état de l’art et la classification des méthodes de sûreté de fonctionnement pour les réseaux de neurones, et spécifiquement les méthodes de vérification formelle et les verrous associés.

## I. INTRODUCTION

Le développement d’un véhicule autonome nécessitera certainement l’utilisation de techniques d’intelligence artificielle, tant dans la partie perception, que dans la partie décision. Parmi ces techniques, les réseaux de neurones semblent prometteurs par leurs performances observées dans les domaines d’application non critiques. Cependant, leur utilisation dans des applications critiques est aujourd’hui impossible. Ceci est causé par l’incapacité des méthodes de développement actuelles à donner des garanties de sécurité. Le travail de la thèse consiste à établir des méthodes ou techniques de validation qui permettraient de certifier un bon fonctionnement des réseaux de neurones, ou d’améliorer la confiance en leur fonctionnement. La thèse se limitera à la partie décision du véhicule autonome.

## II. RÉSEAUX DE NEURONES

Les réseaux de neurones sont des structures de neurones artificiels, généralement organisées en couches, chaque neurone produisant une sortie calculée à l’aide d’une entrée, d’un poids, d’un biais, et d’une fonction d’activation. Tous les réseaux de neurones sont en pratique des fonctions mathématiques, affectant une sortie  $y$  à une entrée  $x$  ( $x$  et  $y$  étant des vecteurs). Un des travaux de cette thèse, décrit dans [1], a consisté à l’élaboration d’une représentation en sous-composants (structure, données d’apprentissage, processus) des réseaux de neurones en phase de développement. En s’appuyant sur cette classification, nous avons également proposé une décomposition des fautes, et une description de leurs impacts sur les erreurs et défaillances des réseaux de neurones adaptées aux erreurs reconnues dans la communauté de l’apprentissage automatique. Les réseaux de neurones démontrent de grandes performances pour des problématiques liées au véhicule autonome (perception, décision, ...) mais leur utilisation est limitée par leur manque de sûreté de fonctionnement. En effet, leur complexité rend difficile leur

validation formelle, et leur contexte d’exécution très large (voire infini) limite les tests que l’on peut leur appliquer. Ainsi, un réseau de neurones entraîné à réaliser une fonction de conduite autonome pourra produire des erreurs, même dans un domaine d’exploitation pour lequel il a été entraîné, lorsque par exemple se produisent des situations qui n’ont pas été considérées ou qui n’ont pas fait partie du jeu d’entraînement.

## III. CONFIANCE ET UTILISABILITÉ DE LA VÉRIFICATION FORMELLE DES RÉSEAUX DE NEURONES

A l’issue de la deuxième année de thèse, nous avons choisi d’orienter la thèse sur l’amélioration de la confiance et l’utilisabilité de la vérification formelle (approche prévention des fautes) pour les réseaux de neurones. Dans cette section, nous allons introduire la vérification formelle pour les réseaux de neurones, et présenter les travaux effectués pendant la thèse sur ce sujet.

### A. Définition

La vérification formelle de réseaux de neurones est la démonstration formelle d’une propriété établissant dans la plus grande partie des cas une relation entre des entrées et sorties, sur un domaine d’entrée spécifique. Pour y parvenir, plusieurs stratégies sont actuellement développées telles que le calcul exact de l’espace de sortie de la fonction du réseau de neurones, l’estimation de l’espace de sortie, la recherche d’un contre-exemple d’une propriété, la validation ou réfutation d’une propriété.

### B. Verrous

Les méthodes de vérification sont confrontées à plusieurs problèmes. Le premier d’entre eux est l’adaptation à des réseaux de neurones de grande taille. En effet, les méthodes étudiées ne sont pour le moment applicables qu’à des réseaux de taille limitée (de quelques centaines à plusieurs milliers de neurones). On peut également citer la complexité de mise en œuvre de ces méthodes (il n’existe pas d’outil de vérification facilement utilisable actuellement, bien que plusieurs outils aient été mis à disposition), et la spécificité des méthodes (chaque méthode est généralement dédiée à un type de réseau de neurones avec une fonction d’activation donnée). Enfin, il n’existe aucune méthode de conception permettant, pour une



propriété de sécurité donnée, de savoir comment l’exprimer et la valider formellement. Il est même probable que certaines propriétés de sécurité ne puissent pas être exprimées selon une forme permettant de les valider formellement sur un réseau de neurones. Nous avons également identifié un autre problème, présenté dans [1], concernant l’utilisation de la vérification formelle sur des réseaux erronés. Dans le cas où un réseau de neurones aurait une représentation erronée de ses connaissances, généralement des relations entre les différentes entrées qui mèneraient à une représentation incorrecte du problème à résoudre, la vérification formelle pourrait conduire à garantir des propriétés, alors que ces propriétés ne seraient pas valides dans une application réelle. Nous avons réalisé une expérience, décrite dans [1], qui détaille un exemple théorique et propose dans ses perspectives un exemple pratique de cette situation.

#### IV. TRAVAUX EN COURS

Les travaux en cours portent sur la confiance dans la vérification formelle des réseaux de neurones.

##### A. Fonction ACC modélisée par un réseau de neurones

Nous avons développé un réseau de neurones modélisant une fonction de conduite autonome de type ACC (Adaptive Cruise Control). Cette fonction de conduite autonome correspond à un contrôle longitudinal de la voiture. Elle calcule quelle doit être l’accélération du véhicule pour adapter sa vitesse à une vitesse de consigne entrée par l’utilisateur tout en gardant une distance de sécurité avec d’autres voitures présentes devant le véhicule.

##### B. Simulateur et vérification formelle

Nous comptons utiliser la simulation pour valider la fonction réalisée par le réseau de neurones grâce à l’utilisation d’un simulateur (figure 1). Nous avons établi une liste de scénarios couvrant plusieurs situations en faisant varier les vitesses initiales, vitesses de consignes, la présence d’un véhicule cible, la distance entre l’ego véhicule et le véhicule cible.



FIG. 1: Simulateur de conduite

Un autre objectif de notre expérience, est de procéder à la vérification formelle de réseaux de neurones modélisant la fonction ACC, dans le but de prouver qu’ils respectent certaines propriétés de sécurité. Cette vérification formelle a été réalisée sur un réseau de neurones nominal, et se fera dans un deuxième temps sur un réseau de neurones erroné.

##### C. Injection de fautes et mécanisme de diversification

Nous allons développer un mécanisme de diversification mathématique, pour augmenter la confiance dans le réseau de neurones et dans sa vérification formelle notamment en répondant au dernier problème soulevé dans III-B. La validation de ce mécanisme de diversification mathématique sera faite en injectant des fautes dans le réseau de neurones modélisant la fonction ACC, produisant un réseau de neurones erroné. Les fautes doivent être illustratives ou représentatives du développement d’une fonction de conduite autonome, mais tout de même permettre au réseau de neurones de passer l’étape de la vérification formelle. La figure 2 montre un scénario défaillant où la fonction ne respecte pas la propriété de sécurité sur la distance à maintenir entre les véhicules : la distance  $D$  est inférieure à certains moments à la distance de sécurité  $D_s$ . La faute injectée correspond à des données apprises sur un véhicule qui a des capacités de freinage et d’accélération différentes de celui sur lequel tourne le réseau de neurones.

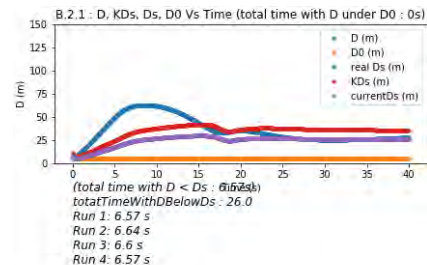


FIG. 2: Scénario avec défaillance

#### V. PLANNING

Voici notre planning provisoire pour ces différentes tâches (actuellement au 30ème mois de notre thèse) :

- injection de deux fautes, déjà identifiées, sur le réseau de neurones erroné
- vérification formelle des réseaux de neurones erronés
- implémentation du mécanisme de diversification mathématique
- rédaction de la thèse
- rédaction en cours d’un article international à la conférence FASE

#### VI. CONCLUSION

Les méthodes de sûreté de fonctionnement actuelles (développées pour des logiciels en programmation impérative) présentent toutes des faiblesses pour garantir le bon fonctionnement d’un réseau de neurones dans une application critique. Nous avons soulevé un nouveau verrou sur l’utilisation de la vérification formelle pour les réseaux de neurones et proposons une méthode permettant de le lever.

#### RÉFÉRENCES

- [1] A. Viot, B. Lussier, W. Schön, S. Geronimi, and A. Tacchella, “Erroneous models in neural networks and their threats for formal verification,” in *Congrès Lambda Mu 22*, “*Les risques au coeur des transitions*”, ser. Congrès Lambda Mu 22, “*Les risques au coeur des transitions*”, actes complets, Le Havre, France, Oct. 2020, p. 596. [Online]. Available : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03144913>

# Contribution to robust network optimization

Chenghao Wang

Directeurs de thèse : Fabio D’Andreagiovanni & Dritan Nace

Équipe : SCOP

**Abstract**—This Ph.D. Thesis has been focused on proposing new optimization modeling and algorithmic approaches for dealing with real-world network optimization problems arising in the transportation and telecommunications field. Since the focus has been on real-world applications, a relevant aspect that we have taken into account has been represented by data uncertainty, i.e. the fact that the value of a subset of input data of the problem is not exactly known when the problem is solved. In order to deal with such data uncertainty, we have also investigated the development of new modeling and algorithmic robust optimization approaches, which aim at identifying solutions that maintain their feasibility and optimality even when input data are subject to deviations in value.

## I. OBJECTIVE AND CONTEXT

This Ph.D. Thesis is focused on proposing new optimization modeling and algorithmic approaches for dealing with real-world network optimization problems arising in the transportation and telecommunications fields. Since the focus has been on real-world applications, a relevant aspect that has been taken into account is data uncertainty, i.e. the fact that the value of a subset of input data of the problem is not exactly known when the problem is solved.

More precisely, in the context of transportation problems, it was considered the flight level assignment problem, which arises in air traffic management. It aims at establishing the flight levels of a set of aircraft in order to improve the total assignment revenue, to reduce the total number of flight conflicts and also the total en-route delay. In this context, we proposed a new chance-constrained optimization problem and iterative constraint-generation heuristic which is based on both analytical and sampling methods.

Besides transportation problems, this Thesis has also focused on the optimal design of 5<sup>th</sup> generation of wireless networks (5G) considering Superfluid and virtual architectures. Specifically, the 5G Superfluid architecture is based on atomic virtual entities called Reusable Functional Block (RFB). We investigated the problem of minimizing the total installation costs of a 5G Superfluid network (composed of virtual entities and realized over a physical network) while guaranteeing constraint on user coverage, downlink traffic performance and technical constraints on RFBs of different nature. To solve this hard problem, we proposed a Benders decomposition approach.

Results of computational tests executed considering realistic problem instances have shown the validity of all the new optimization modeling and algorithmic approaches proposed in this Thesis for the transportation and telecommunications problems sketched above.

## II. PROGRESS OF WORK

### A. Robust Flight Level Assignment Problem

Given a set of flights, a set of waypoints, a set of flight levels, and each flight has a set of feasible levels to assign and the associated profit of assignment. The robust-FLA [6] seeks for assigning the flights to an appropriate level with an overall maximum assignment profit and high protection of minimum potential conflicts under the uncertainties of departure time of flights. The robust counterpart is formulated under Chance-Constrained Programming formulation to maximize overall assignment profit.

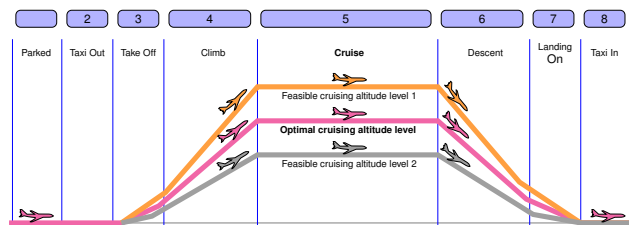


Fig. 1. The mission of a flight

1) *A fast heuristic to measure the probability of feasibility of robust solution:* An approximation framework solving robust-FLA was proposed in [7]. The main idea behind is to solve the sub-assignment problem for each level according to their loads. Fix the assigned flights and increase the admissible cost for unassigned and the associated flights by the solution obtained from the aforementioned specific assignment problem. Repeat the above procedure iteratively until the obtained solution is robust. To make sure that the solution is robust and feasible, we iteratively construct a subset of flights by inserting the flight which is most violated and fixing the uncertain induced costs of associated constraint to their worst-case value until the probability of feasibility of the obtained solution is not less than  $1 - \epsilon$ . To solve the problem of probability feasibility estimation, we propose a fast heuristic algorithm by approximating the uncertain induced cost into a Gaussian Mixture Model (GMM) via a modified Expectation–Maximization (EM) algorithm and merging them into a single GMM via the K-means algorithm.

2) *A column generation approach:* A column generation approach is set up for solving the robust-FLA by considering the specific robust-FLA for a set of candidate flights at level  $l$  given an acceptable admissible cost for each concerned flight as a subproblem. We solve the specified robust-FLA by the aforementioned approach. Having different robust assignments of several sets of candidate flights for each level, the restricted constraint is then to assure that each flight assigned at most one flight level and the overall assignment is maximized. We propose a heuristic method to generate such a set of eligible

flights for each level having a positive reduced cost added into the master problem.

### B. Resource Allocation in 5G Superfluid Wireless Networks

Given a set of 5G candidate nodes, a set of RFB modules, a set of users, RFB-based resource allocation problem pursues to minimizing the deployment cost of the 5G networks within the protection of user coverage and minimum traffic guarantee. RFB concept is a generation of Network Virtual Function entity, which is proposed in 5G Superfluid architecture [3]. More specifically, it performs specific tasks, and can be mapped into different software and hardware execution environments in order to support allocation and deallocation on the 5G nodes and can also be arbitrarily decomposed in other RFBs, thus realizing less complex and/or recursive network functions. From a logical point of view, each 5G node is able to host one Resource Radio Head RFB (RRH-RFB) (providing the physical signal to users), one Base Band Unit RFB (BBU-RFB) (exchanging an amount of IP traffic with the MEC-RFB and a baseband signal with the RRH-RFB), and one Mobile/Multi-access Edge Computing RFB (MEC-RFB) (providing computation functionalities).

1) *An efficient compact formulation and its Benders decomposition:* The problem solved in [4] can be seen as composed of three indispensable parts: A) User assignment problem (i.e., assign the user to an appropriate 5G node); B) RRH-RFB location problem (i.e., locate compatible RRH-RFB in the 5G node serving users, that means traffic capacity providing by installed RRH-RFB should not less than the total traffic demand from served users); C) RFB Chain construction problem (i.e., construct a complete RFB chain (which requires one RRH-RFB, one BBU-RFB, and one MEC-RFB) including their location decision to provide entire network service for users). The original problem proposed in [4] is reformulated as an arc-flow formulation (present in [5]) which breaks down the high combinatory exhibited in the location problem of RFB modules, i.e., RRH-RFB location problem and RFB chain construction problem. It makes the involved problem simplified, possible to be solved without a restricted condition on RAM memory, and drastically costless on computational time compared to the one in [4]. Furthermore, the model proposed in [5] can be decomposed into the RFB allocation problem as a master problem and the User-RRH-RFB assignments problem as the slave problem. Several Benders feasibility cuts are proposed to feed back from slave problem to master problem in a Benders decomposition framework.

2) *Branch-and-Benders-Cut approach:* The main idea behind is to solve the RFB chain location problem as a master problem hereby using a branch-and-cut approach. For each node solution during branching, if it is not integer-feasible, a greedy-based heuristic method is applied to obtain an integer-feasible solution (an upper bound of master problem found, the associated bounding-cut is added). Then we check the feasibility of the slave problem made up of associated user assignment problems. If the subproblem is proven infeasible, then a feasible cut is generated and added into the master problem to help the solver prune the node efficiently until the optimal solution found.

### III. PROSPECTS

As ongoing work, we are studying the generation of the application used to solve the robust-FLA problem. Also, we are extending the computational tests to larger set of instances and attempting at strengthening the performance of the algorithm, investigating tuning strategies for setting the parameters at the basis of the various solution approaches. The aim is to include such new results in the journal versions of the conference papers that have been published. Furthermore, as future work, we intend to investigate the identification of other class of valid inequalities in the context of 5G Superfluid networks, better catching resource interactions between RFBs of different nature, with the aim of improving the convergence of our Benders decomposition solution approach. A more realistic user-case also the data uncertainty of the traffic and user mobility to apply the robust optimization approach proposed in robust-FLA will be considered in future work.

The expected date of the thesis defense is predicted normally by September 2021.

### IV. PUBLICATIONS

[Abstract] Fundo A., Leger J., Nace D., Wang C. (2020) Dealing with uncertainty in ATM - the Flight Level Assignment problem. In ROADEF 2020.

Bauschert T., D'Andreagiovanni F., Kassler A., Wang C. (2019) A Heuristic for Green and Robust 5G Virtual Network Function Placement. In EVOSTAR 2019.

Wang C., D'Andreagiovanni F., Nace D. (2019) Solving a resource allocation problem in RFB-based 5G wireless networks. In BALKANCOM 2019.

Fundo, A., Nace, D., Wang, C. (2018) A Heuristic Approach for the Robust Flight Level Assignment Problem. In BELIEF 2018.

### REFERENCES

- [1] Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J.L., Bouten, N., De Turck, F. and Boutaba, R., 2015. Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 18(1), pp.236-262.
- [2] Barakabitze, A.A., Ahmad, A., Mijumbi, R. and Hines, A., 2020. 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges. *Computer Networks*, 167, p.106984.
- [3] Bianchi, G., Biton, E., Blefari-Melazzi, N., Borges, I., Chiaraviglio, L., de la Cruz Ramos, P., ... Niculescu, D. (2016). Superfluidity: a flexible functional architecture for 5G networks. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, 27(9), 1178-1186.
- [4] Chiaraviglio, L., D'Andreagiovanni, F., Sidoretti, G., Blefari-Melazzi, N., Salsano, S. (2018, February). Optimal design of 5G superfluid networks: Problem formulation and solutions. In 2018 21st Conference on Innovation in Clouds, Internet and Networks and Workshops (ICIN) (pp. 1-8). IEEE.
- [5] Wang, C., D'andreagiovanni, F. and Nace, D., 2019, June. Solving a resource allocation problem in RFB-based 5G wireless networks.
- [6] Fundo, A., Nace, D. and Wang, C., 2018, September. A Heuristic Approach for the Robust Flight Level Assignment Problem. In International Conference on Belief Functions (pp. 86-94). Springer, Cham.
- [7] Klopfenstein, O. and Nace, D., 2008. The robust flight level assignment problem.

EQUIPE SyRI

# Landing of a fixed wing unmanned aerial vehicle in a limited area

Armando ALATORRE

Thesis advisors: Pedro CASTILLO, Rogelio LOZANO

Team : SyRI

**Abstract**—This document summarizes the research work made during the first year of my Ph.D. The thesis project consists of developing a control scheme to reduce the kinetic energy of a fixed-wing drone for landing in a limited area. The work made in this period contains three parts: a) the study of the non-linear motion equations of a fixed-wing drone. b) The development of a control strategy to reduce the kinetic energy of a fixed-wing drone during its flight. c) And the design of a control strategy based on Lie derivatives to tracking a moving target.

## I. INTRODUCTION

This project is a cotutelle thesis, between the Heudiasyc laboratory at the Université de Technologie de Compiègne in France and the CINVESTAV in Mexico. This research work is supported by MESR and CONACYT.

The thesis objective is to develop a control scheme to reduce the kinetic energy of a fixed-wing drone with a classical configuration when landing in a limited area.

The challenge is focused on the airspeed reduction to decrease the kinetic energy, avoiding the loss of controllability when the angle of attack achieves the critical point or stall.

The work made in the first year contains three parts:

- The study of the fixed-wing drone motion equations.
- The development of a control scheme to reduce the vehicle's kinetic energy during the flight.
- The design of a control strategy for a fixed-wing drone converges to the position of a moving target.

## II. LONGITUDINAL NON-LINEAR MOTION EQUATIONS

Nonlinear motion equations of a fixed-wing drone were studied. However, in the first year, we only focus on the longitudinal subsystem motion equations, that can be described as follows,

$$\dot{X} = u \cos \theta + w \sin \theta \quad (1)$$

$$\dot{Z} = u \sin \theta - w \cos \theta \quad (2)$$

$$\dot{u} = -qw - g \sin \theta + \frac{\rho V_a^2 S}{2m} A_u + \frac{\rho S_h C_h}{2m} P_u, \quad (3)$$

$$\dot{w} = qu + g \cos \theta + \frac{\rho V_a^2 S}{2m} A_w, \quad (4)$$

$$\dot{\theta} = q, \quad (5)$$

$$\dot{q} = \frac{\rho V_a^2 S c}{2J_y} M_q, \quad (6)$$

$(X, Z)$  describing the vehicle's positions in the inertial frame.  $(u, w)$  representing the linear velocities in the body frame.

The pitch angle and its angular velocity are denoted as  $\theta$  and  $q$ , respectively.  $m$  is the vehicle's mass and  $J_y$  the axis-y inertial element.  $V_a$  denotes the airspeed and  $\alpha$  the angle of attack.  $(A_u, A_w)$  depicts the aerodynamic forces,  $P_u$  defines the propulsion force, and  $M_q$  the pitch moment.

$$A_u = \left[ C_X(\alpha) + C_{X_q}(\alpha) \frac{cq}{2V_a} + C_{X_{\delta_e}}(\alpha) \delta_e \right], \quad (7)$$

$$P_u = [(k_r \delta_t)^2 - V_a^2], \quad (8)$$

$$A_w = \left[ C_Z(\alpha) + C_{Z_q}(\alpha) \frac{cq}{2V_a} + C_{Z_{\delta_e}}(\alpha) \delta_e \right], \quad (9)$$

$$M_q = \left[ C_{m_0} + C_{m_\alpha} \alpha + C_{m_q} \frac{c}{2V_a} q + C_{m_{\delta_e}} \delta_e \right]. \quad (10)$$

The control inputs involve the elevator ( $\delta_e$ ) and engine ( $\delta_t$ ).  $(C_X, C_Z, C_m)$  represent coefficients related with the lift, drag, and pitch moment, more details in [1].

## III. AIRSPEED REDUCTION STRATEGY AND FLIGHT RECUPERATION

The aim of this strategy is to reduce the airspeed in a minimum phase when the vehicle achieves its critical point. The strategy considers three flight regimes as depicted in Figure 1.

In the cruise flight regime, the fixed-wing drone is in a cruise flight keeping a desired altitude ( $Z_d$ ) and a constant airspeed. A positive function with respect to the altitude error  $e_Z = Z - Z_d$ , is proposed for carrying out the Lyapunov analysis, where the desired pitch angle can be determined as:

$$\theta_d = \frac{w + \dot{Z}_d - (Z - Z_d)}{u}. \quad (11)$$

Thus, the goal will be to apply a controller such that  $\theta \rightarrow \theta_d$ , that will imply  $e_Z \rightarrow 0$  and then  $Z \rightarrow Z_d$ .

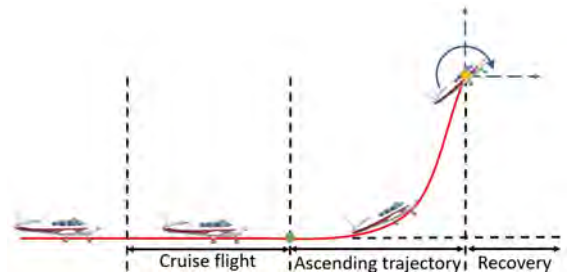


Fig. 1. Flight profile of the velocity reduction strategy for a fixed-wing vehicle.

The pitch dynamics is stabilized using the following controller:

$$\delta_e = \frac{1}{C_{m\delta_e}} \left[ - \left( C_{m0} + C_{m\alpha} \alpha + C_{m_q} \frac{c}{2V_a} q \right) + \frac{2J_y}{\rho V_a^2 S b} \tau_\theta \right], \quad (12)$$

where  $\rho$  depicts the air density,  $c$  describes the wing's chord,  $S$  denotes the surface area, and  $b$  the wingspan.

Finally, the dynamic behavior  $\tau_\theta$  is described as:

$$\tau_\theta = k_{\theta_p}(\theta - \theta_d) + k_{\theta_d}(\dot{\theta} - \dot{\theta}_d), \quad (13)$$

where  $k_{\theta_p}$  and  $k_{\theta_d}$  are positive gains.

The ascending flight is based on a phugoid trajectory, describing a tangential angle of a cycloid, which is defined as:

$$\theta_{d_p}(t) = \tan^{-1} \left( \frac{\sin t}{1 + \cos t} \right). \quad (14)$$

At this stage, (14) is used in (13) for the ascending tracking. Besides, at this time the engine control is zero. Observe that, this strategy increases the angle of attack until its critical point.

When the critical point is reached, the recovery stage generates a moment to lead down to reduce the angle of attack. The strategy performs an airspeed regulation based on desired path angle with a constant  $\delta_t$ . The Lyapunov analysis is then developed with respect to  $e_u = u - u_d$ , for determining the desired pitch angle in the recovery phase:

$$\theta_{d_r} = \frac{1}{g} \left[ \frac{\rho V_a^2 S C_X(\alpha)}{2m} + \frac{\rho S_h C_h [(k_r \delta_t)^2 - V_a^2]}{2m} + e_u \right], \quad (15)$$

where  $S_h$  is the propeller area and  $C_h$  the propeller aerodynamic coefficient.

This strategy was validated in simulations, the minimum airspeed reached was  $4 \text{ m/s}$  and the vehicle achieved the critical point defined in  $23.56^\circ$ . More details about these results in [2].

#### IV. DYNAMIC PATH FOLLOWING

The goal consists of developing a controller for a fixed-wing vehicle to track a mobile target  $(x_T, z_T)$ , navigating in straight line with a constant velocity, see Figure 2.

The desired trajectory to track is defined as:

$$x_d = x_T - (l_T - l) \cos \left( \frac{12\pi}{180} \right) \quad (16)$$

$$z_d = z_T + (l_T - l) \sin \left( \frac{12\pi}{180} \right). \quad (17)$$

This trajectory describes a descending slope, achieving the target's position in a defined distance ( $l_T$ ). The parameter  $l$  depicts target path length. The strategy is developed considering the drone kinetic model with some auxiliary dynamics with respect to  $l$  [3].

The kinetic model is described as,

$$\dot{\zeta} = \mathbf{f}(\zeta) + \mathbf{g}\mathbf{u}, \quad (18)$$

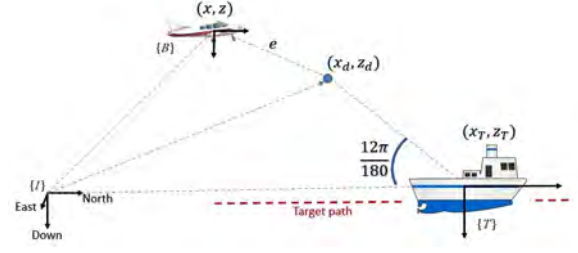


Fig. 2. Scenario to develop the moving path following, using as a mobile target a boat.

where  $\zeta = [x, z, \gamma, l_1, l_2]^T$  represents the state vector,

$$\mathbf{f}(\zeta) = \begin{bmatrix} V \cos \gamma \\ -V \sin \gamma \\ 0 \\ l_2 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{g} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} v \\ \sigma \end{bmatrix}. \quad (19)$$

The tracking error is defined as  $\mathbf{e} = [x, z]^T - [x_d, z_d]^T$ , therefore,

$$\dot{\mathbf{e}} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \zeta} \dot{\zeta} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \zeta} (\mathbf{f}(\zeta) + \mathbf{g}\mathbf{u}) = \mathbf{L}_f \mathbf{e}, \quad (20)$$

where  $\mathbf{L}_f \mathbf{e} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \zeta} \mathbf{f}(\zeta)$ ,  $\mathbf{L}_g \mathbf{e} = \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial \zeta} \mathbf{g} = \bar{\mathbf{0}}_{2 \times 2}$ , are defined as Lie derivatives. The derivative of (20) becomes:

$$\ddot{\mathbf{e}} = \mathbf{L}_g \mathbf{L}_f \mathbf{e} \mathbf{u}. \quad (21)$$

Therefore the following controller can be proposed:

$$\mathbf{u} = (\mathbf{L}_g \mathbf{L}_f \mathbf{e})^{-1} [-\mathbf{c}_1 \mathbf{e} - \mathbf{c}_2 \dot{\mathbf{e}}], \quad (22)$$

where  $\mathbf{c}_1$  and  $\mathbf{c}_2$  are positive constant matrices. Introducing the control law (22) into (21), it follows that

$$\ddot{\mathbf{e}} = -\mathbf{c}_1 \mathbf{e} - \mathbf{c}_2 \dot{\mathbf{e}}. \quad (23)$$

The stability of the system is proved using the Lyapunov analysis, ensuring that  $(\mathbf{L}_g \mathbf{L}_f \mathbf{e})^{-1}$  is non-singular, if considering small initial conditions in  $\mathbf{e}$  and  $\dot{\mathbf{e}}$ .

We are preparing a journal article with these results.

#### CONCLUSIONS

During the first year, the design of a control scheme to reduce the airspeed was accomplished. In addition, some challenges are achieved to reduce the airspeed based on trajectory tracking, and to avoid the loss of controllability in the stall point. Moreover, a trajectory tracking control was also developed. In this trajectory the fixed-wing drone follows a boat.

#### REFERENCES

- [1] R. W. Beard and T. W. McLain. *Small unmanned aircraft: Theory and practice*. Princeton university press, 2012.
- [2] A. Alatorre., P. Castillo, and R. Lozano. (2021). *Least Airspeed Reduction Strategy & Flight Recuperation of a Fixed-Wing Drone*. In 2021 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). IEEE.
- [3] J. Yang, C. Liu, M. Coombes, Y. Yan, and W.-H. Chen, "Optimal path following for small fixed-wing uavs under winds disturbances," IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020.



# Prise de décision sûre et robuste pour les véhicules autonomes en milieu urbain hautement dynamique et contraint

Kévin BELLINGARD

Directeur de thèse : Lounis ADOUANE

Responsable scientifique en entreprise : Fabrice PEYRIN (Sherpa Engineering)

Équipe : SyRI

**Résumé**—Cette thèse a pour but d’investiguer la sûreté des décisions prises par les véhicules intelligents (VI) lors des phases de délégation complète de conduite dans des environnements urbains hautement dynamiques et contraints. Dans ce contexte, le véhicule peut faire face à de multiples obstacles qui peuvent être statiques ou dynamiques, mais également à des situations et des environnements complexes (e.g., passage d’intersections ou de ronds-points denses, existence ou pas de passage piétons), et des incertitudes (e.g., nombre de voies de navigation, position et vitesses des véhicules autour).

## I. INTRODUCTION

La navigation en milieu urbain nécessite une prise de décision adaptée pour chaque situation qui se présente devant le véhicule autonome. Il peut paraître difficile d’énumérer tous les cas et de leurs associer une décision en raison des contraintes multiples et dynamiques associées à un environnement urbain dense. La configuration de la route doit également être prise en compte où chaque voie de navigation ou intersection peut paraître singulière. Pour cette dernière contrainte, plusieurs points de difficultés ont été identifiés et mis en exergue par des « cas d’usages » par SHERPA Engineering [1]. Cette thèse, réalisée dans le cadre d’un contrat CIFRE, doit répondre à ces différents cas d’usages. En d’autres termes, le VI doit pouvoir naviguer d’un point A à un point B tout en garantissant la sécurité de la décision prise et en tenant compte de l’incertitude sur l’existence ou sur la position d’éventuels obstacles ou encore sur l’incertitude de la configuration de la route.

Ce papier est organisé de la façon suivante : la Section II présente les outils qui vont être utilisés pour aider à la prise de décision en milieu urbain. La Section III expose les outils développés pour la navigation autonome en milieu urbain avec une première publication à une conférence internationale et la Section IV présente l’outil logiciel retenu pour mettre en évidence les travaux effectués autour du véhicule autonome.

## II. DIRECTIONS ENVISAGÉES

### A. La prise de décision

La prise de décision nécessite de tenir compte de l’incertitude de perception et de localisation des obstacles environnants. Le réseau Bayésien, développé dans [2] pour la prise de décision dans un environnement autoroutier, permet d’inclure ces incertitudes dans le système d’inférence. Ce réseau doit cependant être amélioré afin d’être adapté au milieu urbain en tenant compte des différents types d’obstacles et de l’évolution

de la configuration de la route sur le trajet effectué. Pour la gestion des différents types d’obstacles, des réseaux Bayésien dynamiques sont utilisés [3] [4] et permettent de prédire le comportement et les trajectoires des obstacles environnants.

### B. Environnement urbain statique

Dans nos travaux, nous considérons dans un premier temps que la structure de la route est connue avec la définition d’une carte Haute Définition (HD). Cette carte comprend toutes les informations concernant l’environnement statique avec un découpage judicieux en segments des portions de routes et des intersections, inspiré de l’outil HERE [5]. Chaque segment contient les informations nécessaires au comportement et à la navigation que doit tenir le VI sur le segment sur lequel il se situe (e.g., le nombre de voies, les trajectoires curvilignes des différentes voies, leurs sens, la vitesse maximale). Ces informations, même si elles peuvent être complémentaires de la perception avec une vérification de la cohérence entre la carte prédéfinie et le relevé capteur [6], sont, dans le cas de mon sujet de thèse, un substitut de la perception qui n’est pas traité ici. Chaque segment doit également comporter des points de passage globaux situés aux extrémités de chaque segment et représentent les points de passage que peut ou doit emprunter le VI. Ces points peuvent être caractérisés et accordés à la structure de la route (e.g., respect d’une plage de vitesse, respect d’un angle d’emprunt). Ces paramètres peuvent varier en accord avec les contraintes liées au VI mais aussi en accord avec l’environnement urbain statique et l’environnement dynamique (e.g., feu tricolore, cédez-le-passage).

### C. Le chemin global et les chemins locaux

Le chemin global correspond à une navigation cognitive [7] qui permet de naviguer dans un environnement statique connu (i.e., une carte HD prédéfinie). Ce chemin global représente le chemin que le VI doit parcourir depuis sa position actuelle jusqu’à la position à atteindre. Ce chemin peut être défini et redéfini à l’aide de clothoïdes pour garantir la continuité de courbure tout le long de la trajectoire [8] en passant par les différents points globaux. Le meilleur itinéraire est déterminé en considérant les intersections comme des nœuds et sont placés sous forme d’un graphe. Chaque nœud ou segment est associé à un coût rapporté à sa longueur. Le meilleur itinéraire sera celui le moins long. Ce chemin permet avant tout de déterminer la succession de points globaux à emprunter. Les

chemins locaux correspondent à la navigation réactive du VI sur un segment comportant des obstacles dynamiques. Suivant les points globaux empruntés en entrée de segment et ceux à atteindre, le VI doit accomplir un ou plusieurs changements de voies en accord avec l’environnement dynamique. Les évitements et les changements de voies se font à l’aide de la méthode des cycles-limites [7]. Cette méthode peut également être associée à des clothoïdes pour garder la flexibilité des trajectoires basées sur des cycles-limites, et avoir une continuité de courbure sur le segment afin de disposer d’une conduite fluide.

### III. TRAVAUX EFFECTUÉS

Ces travaux ont donné lieu à la rédaction d’un article, accepté [9] où la stratégie développée est une première brique qui permettra au VI de naviguer dans un milieu urbain en tenant compte de sa dynamique et de ses contraintes. On cherche ici à déterminer si le VI a la capacité de maintenir une distance temporelle de sécurité avec les obstacles environnants et si oui, appliquer un profil de vitesse approprié sur le chemin préalablement définie. Le scénario présenté sur la Fig.1 est le scénario retenu pour mettre en évidence l’efficacité de l’approche proposée qui consiste à surveiller et anticiper l’évolution du profil de l’inter-distance entre deux véhicules. Le VI (Ego) souhaite dépasser un obstacle plus lent (Obstacle 1). Une fois que la décision de dépasser est prise, un second obstacle (Obstacle 2) sur la voie de gauche accélère. Afin d’éviter de remettre en question la décision d’évitement et d’abandonner la manoeuvre, une estimation de l’évolution de l’inter-distance est faite sur la durée de la manoeuvre d’évitement et un profil de vitesse est appliqué, ou non suivant les capacités effectives du VI, pour maintenir une distance temporelle minimale de sécurité tout au long de la manoeuvre. Cette stratégie peut être couplée avec une autre stratégie qui elle, impose une décélération acceptable à ce même obstacle lors de l’évitement/changement de voie [10]. Ces stratégies, couplées, pourront permettre au VI de rester sûr dans un environnement urbain dense. Le cas d’un évitement sur deux voies de circulation sert à mettre en évidence le bon fonctionnement de cette stratégie mais il peut également être étendu à une insertion sur un rond-point par exemple.

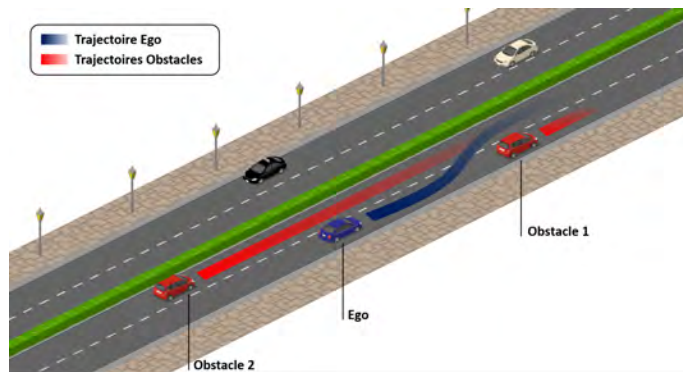


Fig. 1. Scénario utilisé pour mettre en évidence les travaux effectués.

### IV. OUTIL LOGICIEL

L’outil de simulation est une étape intermédiaire qui doit mettre en valeur le travail effectué autour du véhicule autonome dans un environnement urbain qui comprend les « cas d’usages » identifiés. Plusieurs logiciels de modélisation 3D ont été comparés et l’outil retenu est une co-simulation Matlab/Simulink avec Unreal Engine [11] pour sa flexibilité d’utilisation avec sa gestion de l’infrastructure statique et des éléments dynamiques poussés (e.g., ajout de vulnérables et de véhicules obstacles dynamiques, création d’une infrastructure correspondant aux cas d’usages,...).

### V. CONCLUSION

Mon sujet de thèse s’inscrit dans le domaine de la navigation sûre et autonome et se concentre sur la généricité de la partie décisionnelle en milieu urbain. Le VI doit pouvoir prendre des décisions sûres et robustes dans une circulation dense avec des obstacles divers tout en respectant le code de la route. Ce papier présente un résumé des principaux points abordés depuis le début de ma thèse (en novembre 2020) et les premiers éléments mis en place pour une navigation plus sûre en milieu urbain.

### RECONNAISSANCES

Ces travaux ont été sponsorisés par Sherpa Engineering et l’ANRT (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche).

### RÉFÉRENCES

- [1] <https://www.sherpa-eng.com/>.
- [2] D. Iberraken, “Safe Trajectories and Sequential Bayesian Decision-Making Architecture for Reliable Autonomous Vehicle Navigation,” Ph.D. dissertation, Université Clermont Auvergne, 2020. [Online]. Available : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03158717>
- [3] L. Sun, W. Zhan, D. Wang, and M. Tomizuka, “Interactive prediction for multiple, heterogeneous traffic participants with multi-agent hybrid dynamic bayesian network;” in *2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 2019, pp. 1025–1031.
- [4] J. Schulz, C. Hubmann, J. Löchner, and D. Burschka, “Interaction-aware probabilistic behavior prediction in urban environments,” in *2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2018, pp. 3999–4006.
- [5] <https://www.here.com/>.
- [6] K. Massow, B. Kwella, N. Pfeifer, F. Häusler, J. Pontow, I. Radosch, J. Hipp, F. Dölitzscher, and M. Haueis, “Deriving hd maps for highly automated driving from vehicular probe data,” in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2016, pp. 1745–1752.
- [7] L. Adouane, “Reactive versus cognitive vehicle navigation based on optimal local and global pelc;” *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 88, pp. 51–70, 2017.
- [8] J. Silva and V. Grassi, “Clothoid-based global path planning for autonomous vehicles in urban scenarios,” 05 2018, pp. 4312–4318.
- [9] K. Bellingard, L. Adouane, and F. Peyrin, “Safe overtaking maneuver for autonomous vehicle under risky situations based on adaptive velocity profile;” in *IEEE 24th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2021.
- [10] C. Wang, Q. Sun, Z. Li, and H. Zhang, “Human-like lane change decision model for autonomous vehicles that considers the risk perception of drivers in mixed traffic;” *Sensors*, vol. 20, p. 2259, 04 2020.
- [11] <https://www.unrealengine.com/en-US/>.

# Quand et Comment Toucher un Humain ? Un Modèle de Décision pour un Agent Touchant

Fabien BOUCAUD

Directrices de thèse : Indira THOUVENIN, Catherine PELACHAUD

Équipe : SyRI

**Résumé**—Là où le toucher est un sens primordial au développement cognitif et social de l'individu et un puissant moyen de communication émotionnelle, il reste très marginal dans les modalités d'interaction entre humains et agents conversationnels animés (ACA) virtuels et entre utilisateurs et environnements immersifs. Les travaux présentés ici visent à munir un ACA autonome de capacités tactiles pour interagir avec un humain dans un environnement immersif.

## I. INTRODUCTION

Le toucher est un canal de communication très efficace pour la communication des émotions [1] et permet de faciliter le développement d'une relation entre la personne qui touche et celle qui est touchée. Dans la réalité virtuelle, le domaine de l'haptique permet d'améliorer d'autant plus les sentiments de présence et d'immersion dans l'environnement [2].

De leur côté, les agents conversationnels animés (ACA), sont munis de plus en plus de capacités verbales et non-verbales pour interagir entre eux ou avec des humains d'une manière sociale. Ils peuvent communiquer via la parole, la prosodie, les gestes, les expressions faciales,... et mettre toutes ces modalités à profit pour générer de l'entente (du *rapport* en anglais) dans des interactions de courte durées [3]. Pourtant, le toucher est une modalité qui est encore absente du panel d'expressivité des ACAs. Nous pensons que donner la capacité de toucher et être touché à un ACA va améliorer sa capacité à développer un lien relationnel et exprimer ses émotions avec un humain. Nous proposons un framework général pour un ACA touchant et "tangible" en environnement immersif, et en particulier un modèle de décision prenant les spécificités du toucher en compte.

## II. ARCHITECTURE POUR UN AGENT TOUCHANT

La figure 1 représente le framework général de notre modèle qui permet à un agent virtuel de toucher et être touché par un humain. Pour qu'il soit autonome, un agent conversationnel animé a besoin de capacités de perception, de décision et de réalisation de son comportement.

### A. Module de perception

En environnement immersif, le toucher ne va pas de soi comme l'agent apparaît a priori intangible. Nous avons donc mis en place la perception du toucher grâce à de grands colliders dédiés à une zone entière du corps (dos, avant-bras, haut du bras, tête) et l'utilisation de coordonnées spatiales

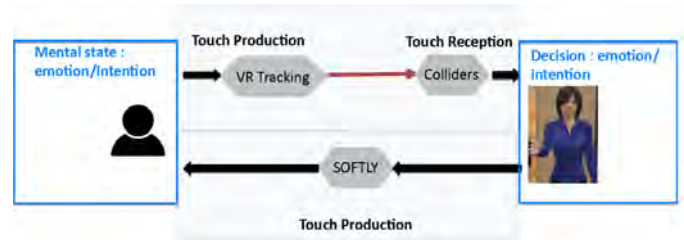


Fig. 1. Framework général

locales afin de déterminer où et quand a lieu un toucher sur le corps de l'agent, pour combien de temps et avec quelle vélocité. Pour avoir une idée, même imprécise, du niveau de pression exercé sur l'agent malgré son intangibilité, on estime à quel point l'utilisateur traverse le corps de l'agent via une métaphore d'interaction basée sur le principe du god-object.

Le module contient également des algorithmes de détection du regard de l'humain (direction estimée de la tête) et de sa position par rapport à l'environnement en termes proxémiques (espaces public, social, personnel ou intime).

### B. Modèle de décision

Pour la décision, nous avons choisi d'utiliser le modèle computationnel d'émotions FATiMA [4] qui permet de générer et gérer un état émotionnel pour l'agent via un processus d'évaluation cognitive (*appraisal*) tout en étant déjà validé, open-source et facilement modifiable en termes de code. Nous nous concentrons sur les trois types d'inputs issus du module de perception (informations de toucher, de direction du regard et de position dans l'espace) ainsi que les actions de l'humain directement liées à la progression du scénario d'interaction.

1) *Etats internes*: Le toucher est un sens intime dont l'interprétation et l'acceptabilité dépendent de la relation entre la personne touchée et la personne touchant. [5] La question du consentement et de l'acceptabilité d'un toucher sont donc essentielles à modéliser. Pour ce faire, nous utilisons la notion d'entente (ou *rapport* en anglais).

On définit l'entente comme "mutual attentiveness, positivity and coordination" [6]. Pour évaluer l'entente entre l'agent et l'humain, l'agent estime donc d'abord le niveau d'attention de l'humain à travers sa position et la direction de son regard, et estime la positivité à travers l'estimation de l'état émotionnel de l'humain par l'intermédiaire des informations de toucher et des choix de l'humain dans le scénario d'interaction. La

mesure d'entente permet ensuite, avec la mesure statique de sa réceptivité au toucher générale, estimée à travers un questionnaire validé donné à l'humain en amont de l'interaction, de déterminer quand toucher de façon acceptable.

Les informations de toucher et de direction du regard/proxémique sont donc interprétées par les règles du modèle de sorte à mettre à jour les états internes de l'agent (émotions, connaissances sur l'humain et l'environnement, évaluation du niveau de la relation). A partir de ces états internes, les règles de décision déterminent quelle sera la prochaine étape d'interaction par rapport au scénario interactif et quelle intention communicative adopter pour cette étape. Cette intention communicative est ensuite spécifiée en comportements précis du point de vue verbal et non-verbal, selon que l'humain est réceptif ou non au toucher et si le toucher est utile à l'intention communicative choisie.

L'état émotionnel de l'humain est modélisé à partir des notions de valence et d'arousal, en nous basant sur le modèle dimensionnel d'émotions Valence-Arousal. Plus d'informations sur la façon dont toutes ces valeurs sont calculées sont disponibles dans [7] et [8].

2) *Processus de décision*: Une fois les états internes de l'agent mis à jour, une décision peut être déclenchée par le modèle. Cette décision est prise en fonction des règles que nous avons définies, reposant sur un processus relevant de la programmation logique. Une règle prend typiquement une forme similaire à la suivante :

```
Speak(Step1, Step1, GetAttention, Agent)
Conditions:
1. Has(Floor) = SELF
2. Attentiveness(Human) < 4
3. Mood(Human) >= 3
```

Ici on détermine d'abord l'intention communicative que l'agent va chercher à exprimer, en fonction du niveau d'attention de l'humain et de son état émotionnel. L'agent détermine ensuite la modalité qu'il va utiliser à travers une règle du type :

```
Modality(Touch)
Conditions:
1. Current(CI) = GetAttention
2. Rapport(Human) < 50
3. StaticTouchAvoidance(Human) != High
```

Plusieurs exemplaires d'une même règle existent qui spécifient les différentes conditions possibles dans lesquelles un toucher peut être réalisé selon les états internes de l'agent. Plus de détails sur l'implémentation du modèle de décision sont discutés dans [8].

### C. SOFTLY et Animations de l'agent

Pour ce qui est de la réalisation du comportement de l'agent, nous utilisons la plateforme GRETA développée à l'ISIR pour les animations de l'agent et avons développé un dispositif haptique pour le toucher. L'interface haptique SOFTLY est un manchon constitué d'une grille de 4x2 voice coils que nous avons développé. Les voice coils permettent d'utiliser de plus larges panels de fréquences que les moteurs vibrants classiques et ainsi proposer des "textures" tactiles plus intéressantes.

A partir de ce manchon, nous avons préparé différents patterns haptiques utilisant différents types de fréquences et de formes d'ondes pour approcher quatre types de toucher que nous avons identifié comme intéressants pour leurs possibilités d'expression d'émotions [1] : le coup, le tapotement, la caresse et le toucher statique simple.

### EVALUATIONS ET RÉSULTATS

Une première expérience préliminaire a montré l'intérêt et la faisabilité du système du point de vue des inputs et outputs, sans le modèle de décision [9] [10]. Plus récemment, [8] détaille une simulation de cas d'utilisation du modèle de décision qui a montré comment, avec des valeurs de départ et choix différents de l'humain dans un scénario d'interaction, le modèle est capable de prendre des décisions cohérentes concernant l'utilisation du toucher.

Une expérience online avec des sujets humains est en cours de préparation et s'intéressera à comment des observateurs humains évaluent le niveau de rapport d'une situation selon les actions de l'agent et à quel point ils considèrent que les décisions de toucher de l'agent sont cohérentes et acceptables compte-tenu de la situation. De même, des expériences de perception complémentaires sont en cours de réalisation pour la validation de SOFTLY.

### RÉFÉRENCES

- [1] M. J. Hertenstein, R. Holmes, M. McCullough, and D. Keltner, "The communication of emotion via touch," *Emotion*, vol. 9, no. 4, pp. 566–573, 2009.
- [2] G. Garcia-Valle, M. Ferre, J. Brenosa, and D. Vargas, "Evaluation of Presence in Virtual Environments : Haptic Vest and User's Haptic Skills," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 7224–7233, 2018.
- [3] G. M. Lucas, A. Rizzo, J. Gratch, S. Scherer, G. Stratou, J. Boberg, and L.-P. Morency, "Reporting Mental Health Symptoms : Breaking Down Barriers to Care with Virtual Human Interviewers," *Front. Robot. AI*, vol. 4, 2017.
- [4] J. Dias, S. Mascarenhas, and A. Paiva, "FAtiMA Modular : Towards an Agent Architecture with a Generic Appraisal Framework," in *Emotion Modeling : Towards Pragmatic Computational Models of Affective Processes*, ser. Lecture Notes in Computer Science, T. Bosse, J. Broekens, J. Dias, and J. van der Zwaan, Eds., Cham, 2014, pp. 44–56.
- [5] J. T. Suvilehto, E. Glerean, R. I. M. Dunbar, R. Hari, and L. Nummenmaa, "Topography of social touching depends on emotional bonds between humans," *Proc Natl Acad Sci USA*, vol. 112, no. 45, pp. 13 811–13 816, Nov. 2015.
- [6] L. Tickle-Degnen and R. Rosenthal, "The Nature of Rapport and Its Nonverbal Correlates," *Psychological Inquiry*, vol. 1, no. 4, pp. 285–293, Oct. 1990.
- [7] F. Boucaud, I. Thouvenin, and C. Pelachaud, "Quand et Comment Toucher un Humain ? Un Modèle de Décision pour un Agent Touchant," in *Workshop sur les Affects, Compagnons artificiels et Interactions (WACAI 2020)*. Saint Pierre d'Oléron, France : CNRS, Université Toulouse Jean Jaurès, Université de Bordeaux, Jun. 2020.
- [8] F. Boucaud, C. Pelachaud, and I. Thouvenin, "Decision Model for a Virtual Agent that can Touch and be Touched," in *Proceedings of the 20th International Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*. Richland, SC : International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, May 2021, pp. 232–241.
- [9] F. Boucaud, Q. Taffiani, C. Pelachaud, and I. Thouvenin, "Vers une prise en compte du toucher social dans les interactions humain-agent en environnement virtuel immersif," in *Journées de la Réalité Virtuelle*, Evry, France, Oct. 2018.
- [10] —, "Social Touch in Human-agent Interactions in an Immersive Virtual Environment ;," in *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Computer Vision, Imaging and Computer Graphics Theory and Applications*. Prague, Czech Republic : SCITEPRESS - Science and Technology Publications, 2019, pp. 129–136.

# Multimodal perception of vulnerable road users for autonomous driving in urban environments

Vincent BREBION

Directeurs de thèse : Franck DAVOINE, Julien MOREAU

Équipe : SyRI

**Abstract**—Urban areas are complex driving environments where vehicles and personal mobility devices (pedestrians, cyclists, ...) often operate close to each other. Autonomous driving in these environments represents a challenge, due to the highly unpredictable behaviour of these vulnerable users. The objective of the thesis is therefore to develop multimodal perception systems to improve their detection and avoid any collision by means of computer vision, multi-sensor fusion, and machine learning.

## I. INTRODUCTION

Autonomous driving in open, uncontrolled environments calls for deep understanding abilities from the self-driving vehicle, to make it able to navigate safely. This understanding process requires the detection and recognition of potential obstacles. The use of perception sensors allows for such capabilities, especially powered by the recent rise of machine-learning-based methods, reaching never-achieved-before heights in recognition tasks.

Most of the results from the literature, however, were achieved in favorable conditions (adequate lighting and weather, clearly visible objects), which only represent a fraction of the real-life situations a driver is confronted with. Recent studies have particularly shown the limits of these approaches in more complex conditions (at dawn/dusk, during rain/snow, when the vulnerable user is partially occluded by another object or very close to the ego-vehicle, ...), raising multiple safety questions [1], [2].

In parallel, the navigation in urban environments has been deeply changing over the past few years, with the rise of soft mobility solutions (bicycles, scooters, skateboards, rollerblades, hoverboards, ...). While they allow for more flexible movements in urban areas, they especially put their user at risk in case of a collision with a traditional vehicle. This risk is further amplified by the erratic behaviour these users may have: slaloming between cars, alternating between the use of the road and the sidewalks, not respecting the road markings, navigating close to the other vehicles, etc.

As an answer to these issues, the objective of the thesis is to reinforce the detection of these vulnerable users in difficult visual conditions typical in urban environments. To reach it, two complementary approaches are going to be used:

- the arrival of novel sensors (e.g. event-based cameras) and the improvement of others (e.g. lidars, thermal cameras) open new perception capacities, even in complex lighting and/or weather conditions; using them for detection tasks

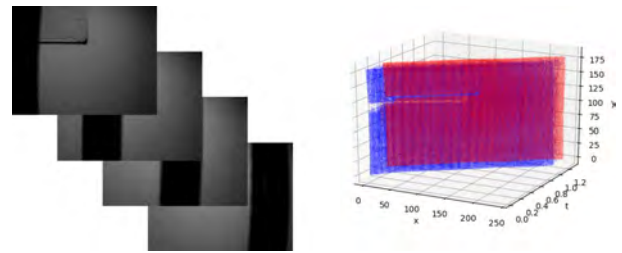


Fig. 1. Traditional images (left) vs events (right), for a simple “pen moving from left to right in front of the camera” sequence. Events are plotted in 3D along the  $x$ ,  $y$ , and  $t$  axes, and each dot represents an event (blue ones denote an increase of lighting for the corresponding pixel at the given time, red ones a decrease)

in such situations therefore appears as an interesting baseline to explore;

- the use of multi-sensor fusion techniques, allowing for safety, redundancy, and better and more stable detection results, also appears as an important component, and an environment-aware framework should be employed to dynamically select the best sensors to use based on the current lighting and weather conditions.

## II. INITIAL ORIENTATION OF THE THESIS

While event-based sensors do not represent the only central component that are planned to be used for improving the detection of vulnerable users, their recency and their ever-growing rise in popularity makes them highly attractive in the field of computer vision as of today. Furthermore, while these sensors were limited to low-resolutions in the past, new high-definition ones have started to emerge in 2020 [3], opening new usage perspectives. As such, and thanks to the collaboration with Prophesee, which are one of the main manufacturers of event-based sensors, we were given the opportunity to have access to one of their high-resolution prototypes, and thus, the chance of being among the first to publish with such cameras arose.

The focus for this first year of PhD thesis was therefore set on these cameras, and in particular on their use for computing optical flow. This issue indeed constitutes a central problem in the field of computer vision, and it is a key enabler for other applications, including especially the object detection and recognition issues.

## III. EVENT-BASED OPTICAL FLOW

In opposition to “conventional” frame-based cameras, which accumulate light during short periods of time to create dense



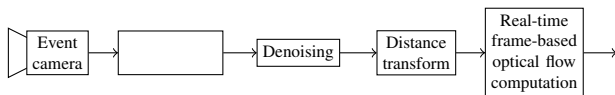


Fig. 2. Our optical flow computation architecture, able to run in real-time with low- and high-resolution event cameras. Blocks are run in parallel.

images, event cameras produce only small packets of information (called events), which report asynchronously and independently per pixel the changes of light in the observed visual scene (see Fig. 1). By doing so, they represent a great paradigm shift in the field of computer vision, opening new ways of sensing the world. This shift, however, implies that state-of-the-art computer vision methods developed over the past decades for traditional cameras can not be directly employed with event-based sensors.

For that reason, two main visions on how to approach events can be distinguished in the literature. On one hand, multiple researchers argue that, due to their highly specific characteristics, events should be used as is, and that new methods for solving computer vision issues should be developed. On the other hand, many authors point out the already existing literature for approaches using frame-based sensors, and that being able to reuse them by recreating frame-like structures from events could allow for the use of these cameras in real-life applications in a near future.

Our goal being a use with autonomous vehicles, we therefore settled for the second option, which appeared as more realistic for a short-term real-life application, and allowed us to reuse a state-of-the-art method for computing optical flow.

Thus, as part of the thesis, we developed a real-time framework, allowing for the computation of optical flow with both low- and high-resolution event-based sensors. This framework uses a pipeline architecture, composed of four main blocks, and is presented in Fig. 2. The first three blocks are respectively tasked with event accumulation over short temporal windows, denoising, and smart densification, allowing for final dense “images” (specifically designed to be used for optical flow computation) to be created from the events. These images are then used as the input to a proven, state-of-the-art real-time frame-based optical flow library [4], allowing us to obtain our final optical flow results.

While the real-time constraint limited us in the complexity of the pipeline, we still were able to achieve optical flow results close to the non-real-time state of the art for low-definition event cameras, and were also able to show the correctness of our results for complex high-definition recordings. Furthermore, our framework is capable of frame rates of 250Hz and 77Hz for resolutions of 346×260 and 1280×720 respectively, thus enabling its use in a real-life context. We present in Fig. 3 visual results from a high-definition urban sequence. More complete video results for various sequences are also available if the reader is interested: see <https://youtube.com/playlist?list=PLLL0eWAd6OXBRXli-tB1NREdhBEIAxisD>.

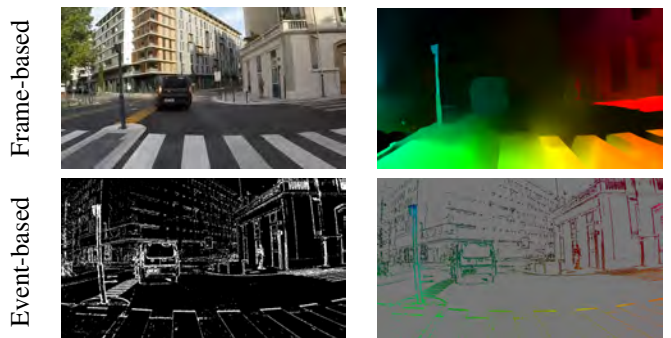


Fig. 3. Optical flow results, for a urban sequence (dataset kindly provided by Prophesee). Top row: reference RGB image, and optical flow reference computed from this image using a state-of-the-art optical flow network, RAFT [5]. Bottom row: events received from the event-based sensor and accumulated over a short temporal window (white pixels), and our optical flow results from them (zones in gray represent pixels for which no event was received, and therefore no flow was computed). Notice especially how our optical flow results are visually close to the frame-based reference.

#### IV. PUBLICATION

As part of this work, a publication titled “Real-Time Optical Flow for Low- and High-Resolution Event Cameras” is being prepared, and is planned to be submitted to IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems before the end of July 2021. Our own datasets involving high-definition event camera are also planned to be made available on Heudiasyc’s platform (<https://datasets.hds.utc.fr>).

#### V. CONCLUSION AND FUTURE WORK

As of today, this work on real-time optical flow computation using event-based cameras is near completion. Once finished, the focus will be set to bibliographic work, to determine the future orientation of the thesis, and the work which will be carried out in the next two years.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work is supported by the Hauts-de-France Region (through the ALRC program) and SIVALab (Renault-UTC-CNRS).

#### REFERENCES

- [1] B. A. T. Brown and E. Laurier, “The trouble with autopilots: Assisted and autonomous driving on the social road,” *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017.
- [2] T. S. Combs, L. S. Sandt, M. P. Clamann, and N. McDonald, “Automated vehicles and pedestrian safety: Exploring the promise and limits of pedestrian detection,” *American journal of preventive medicine*, vol. 56 1, pp. 1–7, 2019.
- [3] T. Finateu, A. Niwa, D. Matolin, K. Tsuchimoto, A. Mascheroni, É. Reynaud, P. Mostafalu, F. T. Brady, L. Chotard, F. LeGoff, H. Takahashi, H. Wakabayashi, Y. Oike, and C. Posch, “A 1280×720 back-illuminated stacked temporal contrast event-based vision sensor with 4.86µm pixels, 1.066GEPS readout, programmable event-rate controller and compressive data-formatting pipeline,” *IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC)*, pp. 112–114, 2020.
- [4] J. Adarve and R. Mahony, “A filter formulation for computing real time optical flow,” *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 1, pp. 1192–1199, 2016.
- [5] Z. Teed and J. Deng, “RAFT: Recurrent all-pairs field transforms for optical flow,” in *ECCV*, 2020, pp. 402–419.



# Multi-Sensor Data Fusion for Lane Detection applied to autonomous vehicle

Federico CAMARDA

Directeurs de thèse : Véronique Cherfaoui, Franck Davoine, Bruno Durand  
Équipe : SyRI

**Résumé**—Lane detection plays a crucial role in any autonomous driving system. Currently commercialized vehicles offer lane keeping assistance via integrated solutions, deployed for road markings detection, which individually do not ensure adequate performance for high levels of automated driving. This doctoral thesis focuses on data fusion approaches for lane boundaries estimation using smart sensors and map-providers.

## I. INTRODUCTION

Perception is an essential stage in the development of autonomous driving systems. It precedes and lays the basis for path planning and decision making. In this key phase, the goal is to pursue two main outcomes : an overview of other users in the driving scene and a solid representation of the surrounding environment. The latter is tackled in this work and it is addressed as a lane boundaries estimation problem. Hereinafter, the term "lane boundary" equivalently identifies lane markings, barriers and any other road element relevant to the partition of the roadway into lanes. A reliable and accurate characterization of the roadway and its lanes would enormously benefit a lane-based navigation and positively support further tasks such as lane assignment of other vehicles, prediction of their future paths and smooth lateral control. To achieve this, it is proposed in this work to exploit multiple sources of smart sensor data, in an attempt to face the problem in challenging conditions, e.g. poor lane markings quality or unfavorable weather.

For this doctoral thesis, started in July 2018, the time has been evenly allocated between Heudiasyc laboratory and Renault's Technocentre. Within a CIFRE agreement, the two partners co-funded this project while cooperating in the SIVALab joint laboratory.

## II. PROPOSED SOLUTION

### A. Smart sensor model

Independently of the sensor nature, their measurements are detections of lane boundaries in the driving scene. Measures  $M_i \in \mathbf{z}_t^{\text{Sens}}$  at each delivery are represented in the body frame (frame  $F_M$ , with origin located at the middle of the rear axis of the car) and modeled with polynomial curves, as follows :

$$M_i = [c_0, c_1, c_2, c_3, x_{min}, x_{max}, {}^M \Sigma_P, M_{type}] \in \mathbf{z}_t^{\text{Sens}} \quad (1)$$

where the continuous description of the measurement is :

$$P(x) = c_0 + c_1x + c_2x^2 + c_3x^3, x \in [x_{min}, x_{max}] \quad (2)$$

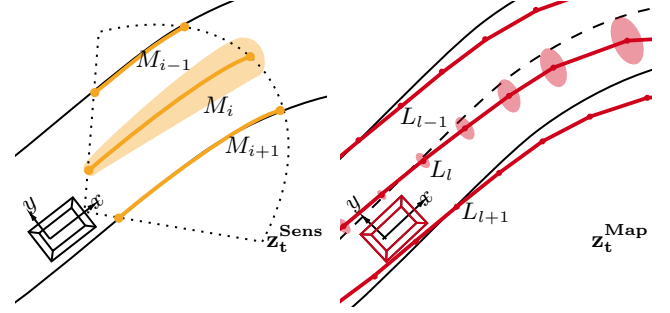


Fig. 1. On the left, smart sensor model : detections of lane boundaries and corresponding "envelope" of uncertainty are shown in light orange. On the right, map-provider model : lane boundaries are shown in red with ellipses of uncertainty.

The measurement uncertainty is given by the covariance matrix  ${}^M \Sigma_P$  with respect to each parameter (Fig. 1).

We introduce road feature  $F_j$  and its covariance matrix  ${}^M \Sigma_F$  to describe the distribution of position and orientation of the measurements at a specific point along its length, for a given  $x_j \in [x_{min}, x_{max}]$  :

$$F_j = \begin{bmatrix} x_j \\ P(x_j) \\ \arctan(P'(x_j)) \end{bmatrix}, {}^M \Sigma_F = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_j}{\partial M_i} \end{bmatrix} {}^M \Sigma_P \begin{bmatrix} \frac{\partial F_j}{\partial M_i} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

### B. Map-provider model

The idea is to consider the localization module (or map-provider) just as another smart sensor. Let  ${}^M L_l \in \mathbf{z}_t^{\text{Map}}$  be the lane boundaries in the sensor delivery supplied by the map-provider, defined as follows :

$${}^M L_l = [{}^M \mathbf{X}_{i=1..N_i}, \text{Var}({}^M \mathbf{X}_{i=1..N_i}), L_{type}] \quad (4)$$

As shown in Fig. 1, each map element  ${}^M L_l$  is a finite collection of landmark points and orientations  ${}^M \mathbf{X}_i = [{}^M x_i, {}^M y_i, {}^M h_i]$ .

The same information can be conveniently presented in form of road features, as follows :

$$F_i = \begin{bmatrix} {}^M x_i \\ {}^M y_i \\ {}^M h_i \end{bmatrix}, {}^M \Sigma_F = \text{Var}({}^M \mathbf{X}_i) \quad (5)$$

### C. Lane boundaries association

Both HD-maps and smart sensors provide type information for each presented lane element. This classification allows for an initial screening before looking for a correspondent in the sensor delivery per each of the map features, through orthogonal projections onto polynomial measurements.

Successful projections of  $F_j \in L$  appoints to a corresponding road feature  $p_{\perp}(F_j)$  sampled along the measure  $M$  at  $(x_{\perp}, y_{\perp})$ . The Mahalanobis distance of the two is computed and participates in a dissimilarity metric between sensor measure and map-provided lane boundary. A distance matrix built on these values allows the use of a Global Neighbour (GNN) algorithm to finalize the association.

### D. Lane boundaries tracking and fusion

A set of features  $F_j$  defines a tracked lane boundary and allows to cumulatively refine the estimation of its attributes, enabling data fusion from multiple smart sensors. For each initialized feature  $F_j$ , a filtering process is carried on using a traditional Kalman filter. Ultimately, a clothoid spline representation is attained interpolating the curve between two consecutive features by means of a specific algorithm [1].

## III. EXPERIMENTAL RESULTS

### A. Setup

The presented approaches are implemented in a proprietary environment for ADAS design. An interface example of the platform is reported in Fig. 3. Data fusion algorithms are here designed and tested, replaying recordings of data obtained on different prototype vehicles, where they can finally be exported for on-board testing.

The deployed vehicle for our experiments (an ad-hoc configured Renault Espace) is equipped for the perception of its surroundings with :

- 1) a Smart FrontCam, 30Hz, FoV :  $53^{\circ} \times 120 m$
- 2) a Smart AVM (4 cameras), 20Hz, FoV :  $360^{\circ} \times 20 m$

Another specific unit handles the localization of the vehicle. It implements particle-based localization algorithms applied within a remotely provided HD-map, using a commercial positioning system. Sensor output and map data have been recorded for testing, driving the prototype vehicle on the French A86 (Créteil-Versailles).

### B. Results

The lane boundaries association method has been tested and successfully deployed for the detection of sensor false positives, as shown in Fig. 2.

A prior qualitative analysis of the fusion result has been done through the development platform output interface (Fig. 3) and with the aid of context cameras, confirming the soundness of the result on highway scenarios. Moreover, the distribution of the lateral error of the estimation w.r.t. the lane-level ground truth has been studied and it confirms the smoothing effect of the fusion process. Details of the evaluation are presented in [2], accepted article for the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2020.

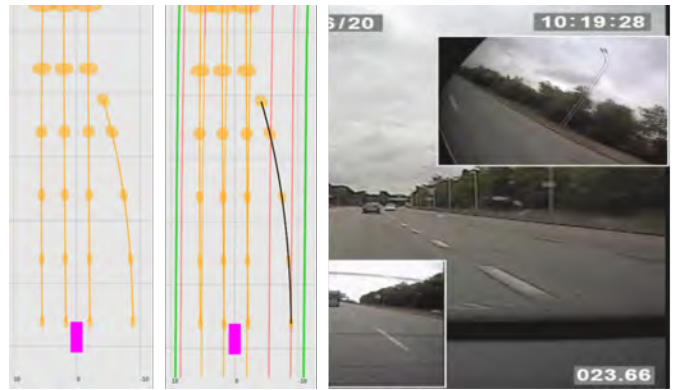


Fig. 2. Left : orange FrontCam measurements are displayed in a bird-eye view. Center : map-provided lane boundaries (red and green lines) are associated to the measurements with the exception of one (highlighted in black). Right : the context cameras confirm the false positive detection.



Fig. 3. On the left, tracking results (blue) and measurements (orange for FrontCam, brown for AVM) are displayed in a bird-eye view. On the right, the context cameras.

## IV. CONCLUSION

In this thesis, we proposed a map-aided method for probabilistic lane boundaries association and false positives detection in smart sensor measurements. A multi-sensor tracking approach for generic lane boundaries is here also introduced, as one of the major contributions of this work. Although the experimental fusion of two smart sensors reported only a slight improvement in the overall estimation, the solution confirmed its validity and coherency w.r.t. the lane-level ground truth.

## RÉFÉRENCES

- [1] E. Bertolazzi and M. Frego, “G1 fitting with clothoids,” *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, vol. 38, no. 5, pp. 881–897, Mar. 2015.
- [2] Federico Camarda, Franck Davoine, Veronique Cherfaoui, Bruno Durand. Multisensor Tracking of Lane Boundaries based on Smart Sensor Fusion. IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2020), Oct 2020, Las Vegas, United States.

# Planification de trajectoire pour véhicule autonome en milieu urbain

Thibaud DUHAUTBOUT

Directeurs de thèse : Reine TALJ, Véronique CHERFAOUI, François AIOUN\*, Franck GUILLEMARD\*

Équipe : SyRI – \* Stellantis

**Résumé**—Dans le cadre de cette thèse en partenariat avec Stellantis, nous avons mis en place une méthode de planification de trajectoire locale pour véhicule autonome, testée en simulation sur des scénarios urbains présentant des obstacles mobiles et des occultations.

## I. INTRODUCTION

Le véhicule autonome est un challenge scientifique et technique complexe, faisant intervenir de nombreux domaines différents. Dans cette thèse, on s'intéresse à la planification de trajectoire dans des conditions urbaines souvent complexes avec d'autres véhicules, des cyclistes et des piétons, ou dans des situations à visibilité réduite.

La section II présente les objectifs de la thèse et les différentes contraintes que nous avons été amenés à considérer. La section III résume les principaux travaux menés, et la section IV en détaille quelques résultats. La section V présente une conclusion et quelques perspectives.

## II. OBJECTIF DE LA THÈSE

L'objectif de la thèse est de mettre au point une méthode de planification de trajectoire permettant la navigation autonome en milieu urbain. Cet environnement est complexe et présente un certain nombre de particularités qu'il faut prendre en compte. En milieu urbain, un véhicule autonome doit notamment partager la route avec d'autres véhicules, des cyclistes ou des piétons, dont le comportement ne peut pas être prédit avec certitude. Il doit également naviguer de façon sûre, efficace et confortable en respectant les nombreuses règles du code de la route, qui doivent être interprétées en fonction de la situation de conduite. Les réseaux routiers sont denses avec des organisations diverses, comme les carrefours à feux ou les ronds-points, qui disposent de règles spécifiques. Enfin, le champ de vision du véhicule peut être limité en raison des bâtiments par exemple, ce qui nécessite des approches prudentes dans les endroits à faible visibilité comme des carrefours ou des virages serrés. Pour gérer cette complexité, la tâche de navigation doit être décomposée en plusieurs modules selon une architecture à définir.

## III. TRAVAUX EFFECTUÉS

Nos travaux se sont concentrés sur la planification d'une trajectoire locale. Nos contributions principales sont la définition d'une architecture permettant d'organiser les différents modules de planification, ainsi que la conception d'une méthode entièrement algorithmique pour générer un ensemble de

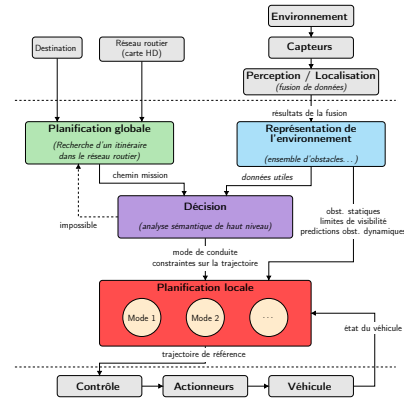


Fig. 1. Architecture globale du système de navigation autonome

trajectoires candidates, chaque trajectoire étant adaptée de façon générique aux différentes contraintes de l'environnement.

### A. Architecture générique

L'architecture tactique sur laquelle nous avons basé nos travaux a été définie à partir des résultats du DARPA Urban Challenge [1], est présentée sur la Figure 1. On y retrouve les trois niveaux de planification très souvent rencontrés dans la littérature : planification globale, prise de décision et planification locale. La planification globale permet de générer un itinéraire dans le réseau routier de la position initiale jusqu'à la destination. La décision effectue une analyse de haut niveau de la situation de conduite pour identifier les voies prioritaires, définir la voie à suivre et l'espace navigable et extraire la vitesse légale à respecter. La planification locale doit alors déterminer une trajectoire pour suivre l'itinéraire en intégrant ces contraintes et en s'adaptant aux autres véhicules.

### B. Génération des trajectoires et sélection

Pour générer les trajectoires, on s'inspire de la méthode des tentacules parallèles décrite dans [2]. Cette méthode est exploitée en environnement statique, et ne propose initialement pas de planification de vitesse.

Dans un premier temps, un ensemble de chemins parallèles écartés latéralement du centre de la voie sont générés pour représenter différents déplacements possibles. Une courbe polynomiale est utilisée pour réaliser la transition en respectant certaines contraintes de continuité pour avoir des chemins réalisables par le véhicule. La courbe est discrétisée, ce qui permet de pouvoir choisir un autre type de courbe sans

remettre en cause les étapes suivantes qui sont effectuées de façon générique sur un ensemble de points.

Ensuite, un profil de vitesse est construit sur chaque chemin généré afin de permettre l'évolution du véhicule selon l'itinéraire. Les contraintes de vitesse liées à la réglementation ainsi qu'au confort sont ajoutées sur chaque point du chemin. L'encombrement du véhicule sur chaque position est comparé aux obstacles statiques. En cas de superposition des polygones correspondants, une contrainte de vitesse nulle est placée en amont de la position courante pour arrêter le véhicule devant l'obstacle avec une certaine marge de manœuvre. Une fois que ces contraintes statiques sont imposées, le profil de vitesse est lissé sur le chemin pour anticiper les ralentissements et prévoir les accélérations. Une trajectoire temporelle est alors extraite et comparée avec les prédictions de déplacement des autres véhicules, également représentées sous forme de polygones. En cas de superposition, un point d'arrêt est inséré en amont et la nouvelle trajectoire correspondante est calculée.

Enfin, la dernière étape consiste à sélectionner la meilleure trajectoire à partir de l'ensemble des trajectoires construites précédemment. Cette sélection se fait en attribuant un coût à chaque trajectoire candidate, calculé en évaluant la sécurité et le confort. Les trajectoires qui ne permettent pas l'arrêt avant les obstacles ou qui dépassent l'accélération latérale maximale admissible sont retirées de l'ensemble candidat. Ceci permet de choisir la trajectoire la plus sûre et la plus confortable. Dans les situations critiques, la trajectoire correspondant à la meilleure adaptation réalisable est renvoyée.

### C. Oclusions et incertitudes

Actuellement, la méthode prend en compte les oclusions quand il s'agit de planifier un chemin en dehors de la zone de visibilité. Dans ce cas, un point d'arrêt est inséré à la frontière de visibilité afin d'ajuster la vitesse de sorte à garantir la possibilité de s'arrêter au cas où un obstacle serait masqué par un bâtiment par exemple. Les travaux en cours visent à prendre en compte les véhicules potentiellement masqués dans le cadre des carrefours par exemple, de façon à induire une approche prudente et une vitesse plus faible à l'approche de ces zones dangereuses en fonction de la visibilité.

D'autres travaux en cours étudient également l'intégration des incertitudes de perception et de prédiction dans la méthode afin d'étudier sa robustesse à ces données incertaines.

## IV. RÉSULTATS

La méthode a été testée en co-simulation Matlab/Simulink avec le simulateur SCANer Studio, sur des scénarios générés représentant des situations urbaines. La Figure 2 présente un exemple de résultat obtenu en boucle fermée sur une situation de dépassement. Ici, l'égo-véhicule se déporte afin de dépasser un obstacle statique, puis il détecte d'autres véhicules en face. Il se rabat donc sur la voie de droite pour ralentir devant l'obstacle statique jusqu'à ce que la voie de gauche soit libre.

La Figure 3 présente le résultat de l'insertion dans un rond-point avec un véhicule déjà engagé auquel il faut céder la priorité. Sur ce scénario, l'égo-véhicule ralentit pour laisser passer le véhicule puis s'insère et stabilise sa vitesse pour respecter la contrainte de confort latéral, fixée à  $\pm 3m \cdot s^{-2}$ .

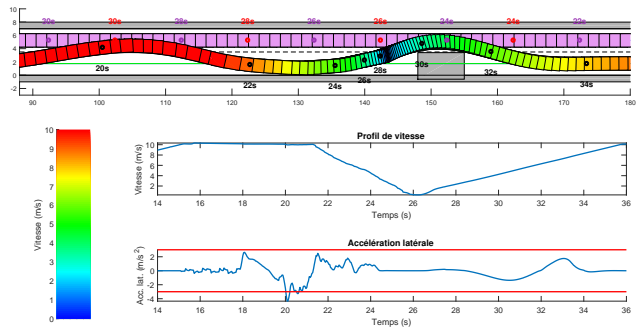


Fig. 2. Résultats obtenus sur une situation de dépassement, avec deux obstacles dynamiques (mauve) en face. La vitesse de l'égo-véhicule est représentée par la rampe de couleurs. La position de chaque véhicule à des temps précis est indiquée pour illustrer l'ordre de croisement.

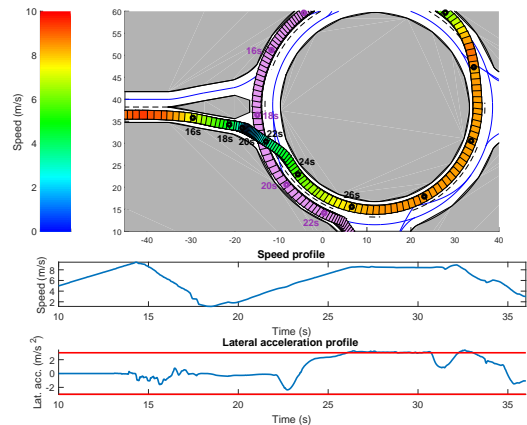


Fig. 3. Résultats obtenus sur une situation d'insertion dans un rond-point avec un véhicule circulant sur l'anneau extérieur

## V. CONCLUSIONS ET TRAVAUX FUTURS

Les résultats présentés montrent que notre méthode de planification permet au véhicule autonome d'adopter un comportement adapté face à son environnement en ajustant son chemin et sa vitesse. Des brevets ont été soumis et un article de journal est en cours de préparation pour exposer la méthode et les résultats avec plus de détails.

Les travaux actuellement engagés concernent l'étude de la robustesse de la méthode aux incertitudes de perception et aux oclusions pouvant masquer des obstacles prioritaires. Par la suite, des simulations sous SCANer Studio dans un environnement urbain réaliste seront effectuées afin d'évaluer la méthode. Les principaux indicateurs étudiés seront ceux liés au confort (accélérations latérales et longitudinales), à la sécurité du véhicule et des passagers (évitement de collisions et adaptation de la vitesse aux situations), ainsi qu'au temps de calcul nécessaire à la planification.

## RÉFÉRENCES

- [1] M. Buehler, Ed., *The DARPA Urban Challenge : Autonomous Vehicles in City Traffic*, ser. Springer Tracts in Advanced Robotics. Berlin : Springer, 2009, no. Vol. 56, oCLC : 492237604.
- [2] K. Chu, M. Lee, and M. Sunwoo, "Local Path Planning for Off-Road Autonomous Driving With Avoidance of Static Obstacles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1599–1616, Dec. 2012.



# Localisation coopérative de véhicules autonomes aidée par carte avec étude d'intégrité

Maxime ESCOURROU

Directeurs de thèse : Joelle AL HAGE, Philippe BONNIFAIT

Équipe : SyRI

**Résumé**—La localisation basée sur les systèmes GNSS (Global Navigation Satellite System) est moins précise en ville à cause des bâtiments. Cette thèse s'attache à proposer une solution de localisation utilisant des Lidars et une carte des bâtiments connue a priori avec incertitude. La correction et la mise à jour de la carte se feront de façon coopérative entre les véhicules. On étudiera également comment la coopération permet d'améliorer la précision.

## I. INTRODUCTION

Pour la conduite autonome, il est primordial de pouvoir se localiser le plus précisément possible dans son environnement. Pour cela, les données de plusieurs capteurs sont fusionnées pour arriver à une estimation de pose avec une précision adaptée à la tâche de navigation. Cette nécessité de localisation précise est d'autant plus importante en milieu urbain qu'il y a des besoins importants qui dépendent de la localisation : rester sur une chaussée parfois étroite, s'arrêter à une intersection (stop, feux de circulation, etc.), distinguer un piéton sur un trottoir d'un piéton sur la chaussée, etc. Cependant, le GNSS, une des principales sources de localisation absolue, est beaucoup moins performant en milieu urbain. En effet, les hauts bâtiments génèrent des multi-trajets et des NLOS (Non-line of sight), perturbant la localisation.

Cette thèse a pour objectif de produire une autre source de localisation absolue, qui pourra être fusionnée avec les mesures GNSS, afin d'améliorer la localisation en milieu urbain. Pour accomplir ceci, les mêmes bâtiments qui dégradent les mesures GNSS seront utilisés pour se localiser. L'idée consiste à les détecter à l'aide d'un lidar 3D et les associer à une carte de l'environnement (illustré figure 1). L'utilisation de la localisation coopérative entre les véhicules à l'aide des mesures indirectes (observation des bâtiments) sera étudiée pour l'amélioration de la localisation et pour la mise à jour de la carte. De même, la mise à jour automatique de la carte lors de différents passages et son partage aux autres véhicules seront étudiés.

## II. ÉTAT DE L'ART

Une étude de l'état de l'art a été effectuée sur une liste d'approches possibles pour les différents problèmes de la thèse, à savoir la gestion de la carte, la localisation par rapport à la carte et la fusion de données pour la localisation coopérative de façon décentralisée.

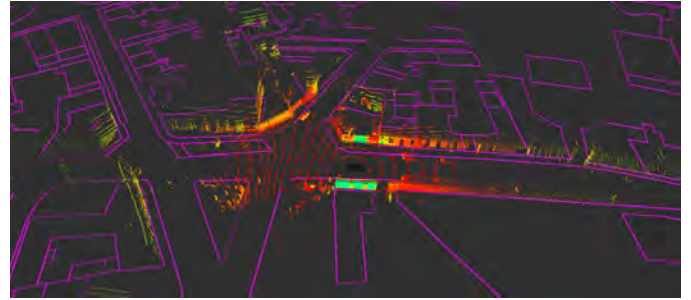


Fig. 1. Illustration de la mise en correspondance d'un nuage de point lidar avec une carte 2D.

### A. Gestion de la carte

Premièrement, la compréhension des différents systèmes de référence terrestre est importante. L'article [1] présente clairement les différents systèmes et la manière dont ils sont définis.

En terme de carte, il y a plusieurs approches possibles. Tout d'abord, il y a les grilles d'occupation 2D avec [2] qui caractérisent l'accessibilité de chaque cellule et donc la présence d'obstacles ou [3] qui utilisent une grille 2D pour prédire les observations possibles par le lidar (via le calcul de l'espace visible). On retrouve aussi des grilles 2.5D tels que RoadDNA [4], [5] développé par TomTom qui comporte deux grilles verticales de chaque côté de la route représentant la distance de l'obstacle le plus proche. Il existe aussi des grilles probabilistes telles que [6] qui associent des distributions de probabilité aux cellules. Il y a aussi les cartes sous forme de collection d'amers qui sont observés par le véhicule pour se localiser [7]–[9].

### B. Localisation

Pour se localiser en se basant sur la carte, nous pouvons retrouver des méthodes issues du SLAM (Simultaneous Localization And Mapping), dont [10] présente une vue d'ensemble. L'Iterative Closest Point (ICP) [11] est utilisé, entre autres, dans le cadre du "pose-graph" : il permet de trouver la transformation entre deux scans, c'est à dire entre deux nœuds de type pose dans le graphe. Pour cela, il résout un problème des moindres carrés basé sur la distance point à point entre les éléments des deux scans.

Une autre solution pour se localiser est la NDT (Normal Distributions Transform) [12], [13] qui est basée sur le découpage de l'espace en grille, où chaque cellule se voit attribuer

une distribution normale représentant la distribution des points du 1<sup>er</sup> nuage dans cette même cellule. Il suffit ensuite de maximiser la vraisemblance globale, qui est la somme des vraisemblances de chaque point du 2<sup>nd</sup> nuage dans leur cellule associée.

### C. Fusion de données décentralisée

Il existe plusieurs méthodes de fusion de données décentralisée, qui n'ont pas le même objectif. L'un des problèmes principaux qui apparaît avec ces méthodes est l'incertitude des données qui consiste en la réutilisation de la même information. [14] présentent une méthode qui permet d'estimer l'état global d'un système multi-robot. Le *Channel Filter* [14] consiste à maintenir à jour l'information commune entre deux nœuds pour la soustraire lors de la fusion et éviter de l'utiliser deux fois.

D'autres algorithmes ont pour but d'estimer l'état d'un seul nœud en utilisant des mesures venant des autres. Le split Covariance Intersection (SCI) [15] permet d'estimer l'état en séparant les parties indépendantes et dépendantes, et combinant un filtre à intersection de covariance avec l'optimalité d'un filtre de Kalman lorsque les bruits sont indépendants. Cependant, ce filtre conduit à une solution pessimiste. Une implémentation de l'EKF (Extended Kalman Filter) en reprenant la forme du Schmidt-Kalman Filter est présentée dans [16]. La méthode permet de gérer les intercovariances dans le cadre de plusieurs robots dont les communications sont limitées. Cela consiste à décomposer la matrice d'intercovariance en deux parties :  $P_{ij} = \sigma_{ij} (\sigma_{ji})^T$  qui seront chacune conservée par un robot. Chaque robot met ensuite à jour sa partie à chaque étape de prédiction et de correction, en n'utilisant que des produits afin de pouvoir reconstituer, lors de la prochaine interaction, la matrice d'intercovariance à jour. Afin de rendre ceci possible, il faut utiliser des équations un peu différentes d'un Kalman classique pour la mise à jour des intercovariances avec les robots non-observés.

### III. DÉVELOPPEMENTS ET TESTS

Nous avons commencé à développer des méthodes de l'état de l'art, en commençant par celle de [16]. Pour les tests, un simulateur multi-robot a été développé en utilisant ROS.

L'algorithme de Luft et al. [16] a été comparé avec un Filtre de Kalman Étendu (EKF) centralisé. Ils donnent des résultats très proches en terme d'erreur absolue de localisation. En terme de covariance, les deux sont assez proches, bien que l'EKF soit plus optimiste que l'autre. Cependant, les deux sont sur-confiants puisque 100% des données sont dans l'intervalle de confiance à 99%, mais ces grandes covariances apparaissent essentiellement durant les longs moments de prédiction seules (basée sur l'odométrie). Bien qu'en simulation, ces résultats sont encourageants sur l'utilisation de cette méthode, car peu de communications sont nécessaires et donc il y a moins de contraintes liées aux systèmes décentralisés (synchronisation, exclusion mutuelles, arbre couvrant, etc.) comme on pourrait avoir, par exemple, dans un filtre informationnel décentralisé [14].

### IV. PUBLICATION

Une publication [17] est actuellement soumise à l'ECMR 2021 portant sur les travaux préparatoires à la thèse effectués lors du stage de fin de master. Il s'agit de travaux sur la localisation en milieu urbain basée sur un Lidar et des cartes cadastrales extraites d'OpenStreetMap, en utilisant la NDT.

### V. PERSPECTIVES

La suite du travail de thèse va se concentrer sur le développement de méthodes de localisation et de gestion de carte. Le développement de la localisation coopérative et de la mise à jour de la carte se déroulera sur l'année qui arrive, accompagné d'expériences sur données réelles.

### RÉFÉRENCES

- [1] F. Duquenne, "Les systèmes de référence terrestre et leurs réalisations Cas des territoires français," p. 9, 2018.
- [2] H. Oleynikova, A. Millane, Z. Taylor, E. Galceran, J. Nieto, and R. Siegwart, "Signed Distance Fields : A Natural Representation for Both Mapping and Planning," p. 6 p., 2016.
- [3] J. S. Berrio, S. Worrall, M. Shan, and E. Nebot, "Long-term map maintenance pipeline for autonomous vehicles," *arXiv e-prints*, vol. 2008, p. arXiv :2008.12449, Aug. 2020.
- [4] G. Hilbrandie, R.-P. Schäfer, P. Mieth, I. M. Atkinson, M. Wolf, and B. Rutten, "Method of processing positioning data," US Patent US9 297 664B2, Mar., 2016.
- [5] L. Li, M. Yang, C. Wang, and B. Wang, "Road DNA based localization for autonomous vehicles," in *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Jun. 2016, pp. 883–888.
- [6] L. Gao, G. Battistelli, and L. Chisci, "Random-Finite-Set-Based Distributed Multirobot SLAM," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 36, no. 6, pp. 1758–1777, Dec. 2020.
- [7] L. Delobel, "Agrégation d'information pour la localisation d'un robot mobile sur une carte imparfaite," Ph.D. dissertation, May 2018.
- [8] R. Dube, D. Dugas, E. Stumm, J. Nieto, R. Siegwart, and C. Cadena, "SegMatch : Segment based place recognition in 3D point clouds," in *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, May 2017, pp. 5266–5272.
- [9] S. Thrun and Y. Liu, "Multi-robot SLAM with Sparse Extended Information Filters," in *Robotics Research. The Eleventh International Symposium*. Springer, 2005, pp. 254–266.
- [10] G. Bresson, Z. Alsayed, L. Yu, and S. Glaser, "Simultaneous Localization and Mapping : A Survey of Current Trends in Autonomous Driving," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 2, no. 3, pp. 194–220, Sep. 2017.
- [11] E. Mendes, P. Koch, and S. Lacroix, "ICP-based pose-graph SLAM," in *2016 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR)*. IEEE, Oct. 2016, pp. 195–200.
- [12] P. Biber and W. Strasser, "The normal distributions transform : a new approach to laser scan matching," in *Proceedings 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2003)*, vol. 3, Oct. 2003, pp. 2743–2748 vol.3.
- [13] E. Javanmardi, Y. Gu, M. Javanmardi, and S. Kamijo, "Autonomous vehicle self-localization based on abstract map and multi-channel LiDAR in urban area," *IATSS Research*, vol. 43, no. 1, pp. 1–13, Apr. 2019.
- [14] H. Durrant-Whyte, "Introduction to Decentralised Data Fusion," p. 194, Sep. 2002.
- [15] A. Lima, P. Bonnifait, V. Cherfaoui, and J. A. Hage, "Data Fusion with Split Covariance Intersection for Cooperative Perception," p. 7, 2021.
- [16] L. Luft, T. Schubert, S. Roumeliotis, and W. Burgard, "Recursive Decentralized Collaborative Localization for Sparsely Communicating Robots," *Robotics : science and systems*, 2016.
- [17] M. Escourrou, J. A. Hage, and P. Bonnifait, "NDT Localization with 2D Vector Maps and Filtered LiDAR Scans," p. 6.



# Human-machine cooperative control: transition management between manual/auto mode for the semi-autonomous vehicle

HAMDAN Ali

Phd Supervisors : TALJ Reine (CNRS Researcher, HDR), and CHERFAOUI Véronique (Professor)

Team : SyRI

**Abstract**—This report summarizes the work of the second year of my PhD. The thesis aims to develop a shared lateral control between the driver and automated system for the lane keeping purpose. The objective of this shared control is to ensure road safety and enhance driving performance.

## I. INTRODUCTION

Safety is an important criterion that should be realized while driving on the road. Road accidents are caused by the human’s errors in most cases. According to National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) statistics, these errors lead to 90% of road accidents [1]. In a critical situation, when the driver is tired, distracted, the integration of an Advanced Driving Assistance System (ADAS) helps him to prevent this dangerous situation. There are many examples of ADAS systems, like ESP, ABS, and lane keeping assist systems. These systems ensure safety and performance of driving tasks. However, these systems have a limitation in functionality. Hence, full autonomous vehicles are taking an important attention in the researches and automotive industry. But, the realization and commercialization of these autonomous systems need more time for many reasons: high cost of hardware and software, safety on the road, robustness of the system. Thus, a shared cooperative control is necessary to compensate the gap between manual driving (level 0/1 and 2) and autonomous driving (level 5) [2]. This new aspect of control in the automotive field aims to reduce the workload of the driver. In addition, interaction between the human and the autonomous system that keeps the driver in the loop, should compensate the limits and problems of autonomous systems and improve driving safety.

Many advanced studies have been presented in the literature to investigate shared control between driver and an automated system. In fact, these studies differ in the way how to manage the control authority between the two agents. A shared lateral control is presented in [3], [4] to illustrate the authority of driving between the driver and the automatic system. A decision making algorithm using a weighting function related to the lateral error was used to manage this authority and switch between them. Similar approach is presented in [5] to realize the control authority through a blending parameter varying between [0;1], adjusted manually or automatically depending on the driver’s attention and situation. An Assistance steer-by-wire system is presented in [6], where the fusion of two steering inputs is performed considering the availability of the driver via monitoring system.

All these interesting studies have motivated us to develop a shared control for the lane keeping objective using Steer-by-wire system. Thus, in our present work, a new shared lateral control is developed to manage the control authority between the driver and the autonomous system in order to reduce the conflict and promote road safety. The novelty of this work is illustrated in the computation of the fusion parameter. A Fuzzy Logic Controller (FLC) associated to a situation-based Analysis Block are used to determine the fusion parameter according to many dynamics criteria such as: the lateral deviation error, the conflict steering angle and the driver’s confidence. The proposed approach is tested for different case studies to demonstrate the effectiveness of this method to ensure safety and improve driving performance.

## II. SHARED STEERING ARCHITECTURE

The block diagram of the shared control is given in the Fig. 1. The main components are: the Driver Model, the Autonomous System, and finally the shared lateral control is detailed in Section III. The proposed human driver model for the lane keeping purpose in [7], [8] is used to represent the human’s behavior in the loop. This model is based on the hypothesis that the driver uses the visual information to anticipate the upcoming road changing, and the vehicle state’s information (velocity, position, heading...) to position the vehicle on the road (Anticipatory and Compensatory action). The autonomous system consists of longitudinal and lateral controllers based on the super-twisting sliding mode (STSM)

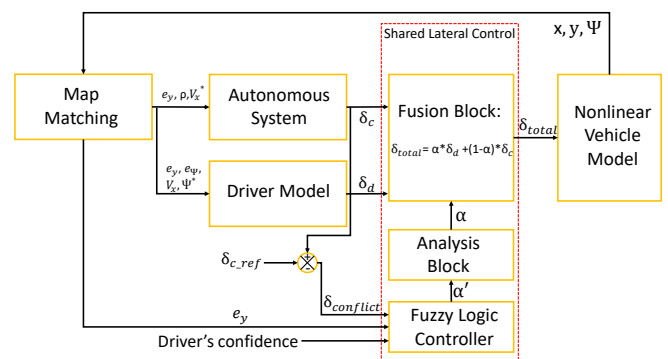


Fig. 1. Structure of the shared lateral control.

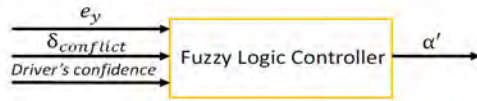


Fig. 2. The structure of fuzzy logic controller.

algorithm, to realize a path following at the desired velocity.

### III. DESIGN OF SHARED LATERAL CONTROL

This section provides a brief description of the proposed shared lateral control (see Fig. 1).

#### A. Shared Lateral Control Authority

The shared control authority between the driver and the autonomous system is performed by using the blended shared control [5] which allows the fusion of two inputs from each agent. The familiar form of blending shared control is the blending using weight parameter (see. [9], [10]). The total blending control input is given as:

$$\delta_{total} = \alpha * \delta_d + (1 - \alpha) * \delta_c, \quad (1)$$

where  $\delta_{total}$ ,  $\delta_d$  and  $\delta_c$  are the total control input, inputs of human driver and automated system respectively.  $\alpha$  is the fusion parameter calculated based on Fuzzy Logic Controller and a situation-based analysis block (Fig. 1).  $\alpha$  is bounded in [0,1].

#### B. Fuzzy Logic Controller (FLC) and Analysis block

An intermediate fusion parameter  $\alpha'$  is determined by a fuzzy logic controller (FLC) as in Fig. 1. The situation-based analysis block analyzes the driving situation and gives the final value of fusion parameter  $\alpha$  in order to promote driving safety and avoid dangerous situations. The fuzzy logic structure is given by the Fig. 2. The lateral error  $e_y$ , the conflict steering angle  $\delta_{conflict}$  and the driver's confidence are applied to the fuzzy logic controller (FLC) as inputs, and the fuzzy parameter  $\alpha'$  is the output. To determine the fuzzy controller output  $\alpha'$  for the given fuzzy controller inputs  $e_y$ ,  $\delta_{conflict}$  and the driver's confidence, the decision matrix of the linguistic control rules is used. There are 18 rules (in total) where 15 are determined in the FLC to give the value  $\alpha'$ , and the 3 remaining rules are defined in the analysis block (see Fig. 1). So, the analysis block receives  $\alpha'$  and modifies it if necessary, depending on the driving situation. The final output of the analysis block is  $\alpha$ . The goal of using the analysis block with the FLC is to cover all the possibilities of driving situations that can occur while driving on the road.

### IV. VALIDATION OF THE APPROACH

The developed shared lateral control is validated on Matlab/Simulink with a complete nonlinear model of the vehicle, validated on "SCANeR Studio" (OKtal) simulator. A control authority decision is generated by the FLC and the analysis block in order to determine the leader of vehicle's control for different case studies. A result for a case study is addressed below to show the shared control authority between the two

agents. For the Fig. 3, an error is injected between 40s and 70s on the automated system. The human is the supervisor of the scene who compensates the error that occurred in the behavior of the autonomous system.

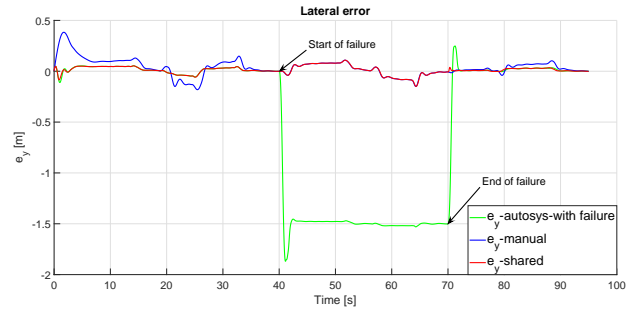


Fig. 3. The lateral error

### V. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In the second year of the thesis, a shared lateral control has been developed to improve the system's performance and enhance driving safety. This cooperative control is done by using blended shared control, where a fuzzy logic controller and a situation-based analysis block are developed to determine the decision making authority. The proposed shared control is validated in Matlab/Simulink with a complete nonlinear model of the vehicle, validated on "SCANeR Studio" (OKtal) simulator. In the future work, we will consider other criteria to prove the effectiveness of the decision making process.

### REFERENCES

- [1] R. Rajamani, *Vehicle Dynamics and Control*. Springer, 2012.
- [2] F. M. Favarò, N. Nader, S. O. Eurich, M. Tripp, and N. Varadaraju, "Examining accident reports involving autonomous vehicles in california," *PLoS one*, vol. 12, no. 9, p. e0184952, 2017.
- [3] C. Sentouh, S. Debernard, J.-C. Poptieul, and F. Vanderhaegen, "Toward a shared lateral control between driver and steering assist controller," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 43, no. 13, pp. 404–409, 2010.
- [4] B. Soualmi, C. Sentouh, J.-C. Poptieul, and S. Debernard, "Fuzzy takagi-sugeno lq controller for a shared control of vehicle," in *2011 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. IEEE, 2011, pp. 956–961.
- [5] F. Borroni and M. Tanelli, "A weighting approach to the shared-control of lateral vehicle dynamics," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 9, pp. 305–310, 2018.
- [6] G. Perozzi, C. Sentouh, J. Floris, and J.-C. Poptieul, "On nonlinear control for lane keeping assist system in steer-by-wire road wheeled vehicles," 07 2020.
- [7] L. Saleh, P. Chevrel, F. Mars, J.-F. Lafay, and F. Claveau, "Human-like cybernetic driver model for lane keeping," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 44, no. 1, pp. 4368–4373, 2011.
- [8] F. Mars, L. Saleh, P. Chevrel, F. Claveau, and J.-F. Lafay, "Modeling the visual and motor control of steering with an eye to shared-control automation," in *Proceedings of the human factors and ergonomics society annual meeting*, vol. 55, no. 1. SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, 2011, pp. 1422–1426.
- [9] A. Li, Y. Chen, W.-C. Lin, and X. Du, "Shared steering control of tire blowout for ground vehicles," in *2020 American Control Conference (ACC)*. IEEE, 2020, pp. 4862–4867.
- [10] M. Li, H. Cao, X. Song, Y. Huang, J. Wang, and Z. Huang, "Shared control driver assistance system based on driving intention and situation assessment," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 11, pp. 4982–4994, 2018.

# Integrity of Cooperative Perception for Autonomous Navigation

Antoine LIMA

Directeurs de thèse : Véronique CHERFAOUI, Philippe BONNIFAIT

Équipe : SyRI

**Abstract**—Despite significant advancement over recent years, safety of perception in autonomous vehicles remains an open problem. Machine learning brought reliable object detection to low-cost sensors but a complete and real-time representation of the driving scene remains a challenge, in part due to limited sensor coverage. The objective of this thesis is to study the integration of perceptive information communicated by other road participants, in a problem referred to as cooperative perception.

## I. INTRODUCTION

In order to navigate safely, an autonomous vehicle must perceive its surroundings and react to it. Sensors and algorithms have reached a point where detections are correct a vast majority of the time, but missed detections can result in terrible accidents. While still amounting to less than human-caused accidents, these accidents prevent further deployment of autonomous vehicle as they fall under the manufacturer responsibility. These rare failures can generally be traced back to misleading information (a reflection blinding a sensor, a mis-detection, ...) that could be prevented by a better representation of *uncertainties* about the scene. In addition, the basis for a reliable perception system is redundancy and complementarity. It is used to compare different points of view and combine modalities, (e.g: camera and LiDAR), such that a detection can be confirmed, completed or dismissed by other sensors. This can lead to requiring many sensors embedded on a single vehicle, which can result in systems that are too expensive for large-scale deployment. The main objective of this thesis is to leverage the upcoming inter-vehicular network in order to limit the number of required sensors by incorporating perception from other agents in a safe manner. After an introduction to the field of Cooperative Perception (CP) in Section II, a summary of our work on the fusion aspect is presented in Section III. Modelisation of object existence is the second problem studied in this second year and is detailed in Section IV.

## II. COOPERATIVE PERCEPTION

Sharing perceptive information provides many advantages, the ability to see further than traditional sensors, currently limited below 150 – 200 meters or the ability to see beyond obstacles (truck, wall). A possible use for this technology is to consider communicating participants as *deported sensors*. However, integrating information from others is a difficult task

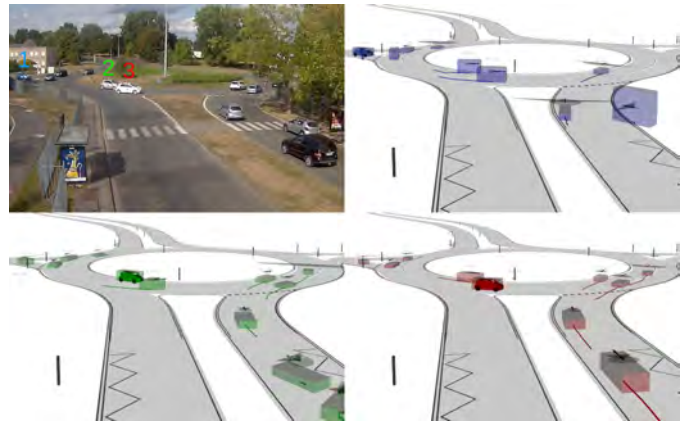


Fig. 1. View of the scene from an infrastructure camera and cyber views of different vehicles. Tracked cars and signs are represented by Oriented Bounding Boxes (OBB) colored in blue for vehicle 1, green for 2 and red for 3. Behind are the surface of the road and signs from an HD map.

that requires temporal alignment, spatial alignment, assessing the precision and trustworthiness of others and avoiding the propagation of misleading information.

The basis for these tasks are Local Dynamic Maps (LDM), representations of the environment that can for example be a list of objects in the form of their position  $x$  and  $y$ , heading  $\theta$  and speed  $v$ . Additional information is also often associated, such as their covariance  $\mathbf{P}$  that describes the uncertainties on their state, a classification  $c$ , dimensions as length  $l$ , width  $w$  and height  $h$ , the degree to which they are believed to exist  $e$  and an arbitrary set of characteristics  $z$  (registration plate, light status, ...):

$$o = \left\{ \mathbf{x} = [x, y, \theta, v]^T, \mathbf{P}, l, w, h, e, c, z \right\} \quad (1)$$

An example of LDM is given in Figure 1. The idea of CP is that agents, enabled vehicles or infrastructure, perceive their environment and store the fusion of on-board sensors in their own LDM. In a second time, agents exchange their LDM via wireless communication (either Wi-Fi 802.11p or 5G) and fuse received maps in a Cooperative Dynamic Map (CDM). This CDM can then be used by a navigation and decision-making algorithm in place of the local map.

## III. FUSION

Fusing a map with sensors usually relies on simple operations: predict tracked objects, associate incoming observations

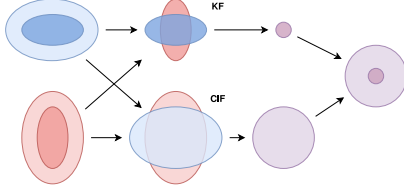


Fig. 2. Fusion of two estimates using Split Covariance Intersection.

with them and update accordingly. A Kalman Filter (KF) is usually used for the prediction and update steps, while an assignment algorithm such as an Hungarian algorithm based on a cost matrix is used for the association. However, the KF assumes independence between observation noises and estimation errors, which is not the case with CP as LDMs from others have already been tracked and their correlation with the CLM is unknown. This can result in estimates becoming overly confident and providing misleading information. To overcome this issue, a Covariance Intersection Filter (CIF) can be used instead of the KF. Its idea is to calculate the smallest intersection between the two estimate covariances, which is resilient to unknown correlation but pessimistic in practice. To avoid unnecessary pessimism when estimates are *partially* dependent, a solution is use the Split Covariance Intersection Filter (SCIF) [1], that combines a KF with a CIF by splitting the covariance into two components. The *dependent* component is predicted and updated by a CIF, and the *independent* component by a KF. Let  $\mathbf{x}$  and  $\mathbf{P}_d + \mathbf{P}_i$  be the state and covariance of a track and  $\mathbf{y}$  and  $\mathbf{R}_d + \mathbf{R}_i$  the observation with its covariance:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{x}^+ &= \mathbf{F}\mathbf{x} \\
 \mathbf{P}_d^+ &= \mathbf{F}\mathbf{P}_d\mathbf{F}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}_d\mathbf{G}^T \\
 \mathbf{P}_i^+ &= \mathbf{F}\mathbf{P}_i\mathbf{F}^T + \mathbf{G}\mathbf{Q}_i\mathbf{G}^T \\
 \mathbf{P}^+ &= \frac{\mathbf{P}_d^+}{\omega} + \mathbf{P}_i^+ \\
 \mathbf{R} &= \frac{\mathbf{R}_d^+}{1-\omega} + \mathbf{R}_i^+ \\
 \mathbf{K} &= \mathbf{P}^+\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{P}^+\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \\
 \mathbf{x} &= \mathbf{x}^+ + \mathbf{K}(\mathbf{y} - \mathbf{H}\mathbf{x}^+) \\
 \mathbf{P} &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{P}^+ (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})^T + \mathbf{K}\mathbf{R}\mathbf{K}^T \\
 \mathbf{P}_i &= (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})\mathbf{P}_i^+ (\mathbf{I} - \mathbf{K}\mathbf{H})^T + \mathbf{K}\mathbf{R}_i\mathbf{K}^T \\
 \mathbf{P}_d &= \mathbf{P} - \mathbf{P}_i
 \end{aligned} \tag{2}$$

with  $\omega$  a weighting factor obtained by minimizing the determinant or trace of resulting covariance matrix.  $\mathbf{F}$ ,  $\mathbf{G}$  and  $\mathbf{H}$  are matrices that describe the evolution and observation models supposed linear here for simplification.

As studied in [2], the covariance matrix of the *dependent evolution noise*  $\mathbf{Q}_d$  plays a fundamental role in the consistency of the fusion, but lacks physical interpretation. Where the matrix  $\mathbf{Q}_i$  of the *independent evolution noise*, inherited from the KF, corresponds to model-introduced errors,  $\mathbf{Q}_d$  is used to model the part of the estimation error that has an unknown degree of correlation with other agents in the CDM. More generally, it is used to handle *track-to-track* fusion and can be applied within a single agent to fuse its own sensors as well.

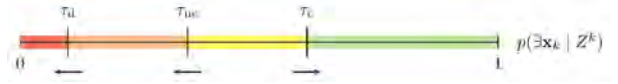


Fig. 3. Object existence stages in track management.

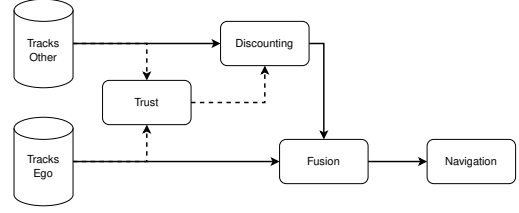


Fig. 4. Organization of trust discounting.

#### IV. OBJECT EXISTENCE

The previous section has addressed the spatial aspect of uncertainty in CP. Another aspect of a robust fusion system is the estimation of object existence, a quantification of how likely a track is to correspond to a real and relevant object. This quantity is used to manage the lifetime of tracks, confirming, unconfirming and removing a track based on thresholds, as illustrated in Figure 3 with  $\tau_c$ ,  $\tau_{uc}$  and  $\tau_d$  respectively. It is also an important information to provide to a navigation system as it can be used by the decision system in real-time.

Existence is generally modeled as a probability that increases when an observation is associated and decreases with time. This process, summarized in [3] involves multiple variables such as birth, clutter, detection and persistence probabilities. We are currently studying the use of belief functions on this problem in order to accurately model unknown, in particular at birth. This representation can also help integrating the trust in sensors and agents. Indeed, we want to apply concepts from the *misbehavior detection* field [4] to estimate a trust belief in order to increase the spatial uncertainty or discount the existence beliefs of objects sent by a distrusted participant, as illustrated in Figure 4.

#### V. CONCLUSION & PERSPECTIVES

In this second year, a solid understanding of underlying fusion algorithms have been built. It will serve as the basis for further research on existence estimation and on trust estimation for cooperative data fusion.

#### ACKNOWLEDGMENT

*This work is being carried out within SIVALab, a shared laboratory between Renault and Heudiasyc (UTC/CNRS).*

#### REFERENCES

- [1] H. Li, F. Nashashibi, and M. Yang, "Split Covariance Intersection Filter: Theory and Its Application to Vehicle Localization," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013.
- [2] A. Lima, P. Bonnifait, V. Cherfaoui, and J. Al Hage, "Data Fusion with Split Covariance Intersection for Cooperative Perception," in *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference*, 2021.
- [3] M. Aeberhard, "Object-level fusion for surround environment perception in automated driving applications," Ph.D. dissertation, 2017.
- [4] M. Ambrosin, L. L. Yang, X. Liu, M. R. Sastry, and I. J. Alvarez, "Design of a Misbehavior Detection System for Objects Based Shared Perception V2X Applications," in *IEEE Intelligent Transportation Systems*, 2019.



# State Observers Study and Development Based on Environmental Perception and Machine Learning Techniques

MURTA Bernardo

Directeur de thèse : Alessandro Victorino  
Équipe : SyRI

**Abstract**—Typical vehicle control systems are based on estimates of low-cost sensors embedded in the vehicle along with other readings accessed by these sensors. However, some parameters are not trivial to obtain and require vehicle models and mathematical approaches to be estimated. This work proposes a hybrid observer by adopting both model-based methods, such as those based on Kalman Filters, and data-driven estimators for better predictions of the vehicle sideslip angle.

## I. INTRODUCTION

Vehicle control systems along with Electronic Stability Control ESC are based on estimates and readings of low-cost sensors embedded in the vehicle, such as speed encoders and accelerometers, and different variables related to vehicle dynamics can be derived from combinations of the signals obtained by these sensors. But accessing some dynamics parameters results in a low accuracy due to the uncertainties of the sensor measurements and also to imprecise mathematical models that evaluate the dynamics of the tire [1]. Although, the modeling of the system is nonlinear, especially if abrupt maneuvers are considered in real model. Hence, the use of extended Kalman filter (EKF) as state observers for nonlinear systems has been widely discussed. [2-4]. Obtaining these parameters directly is considerably costly and their estimation by model-based methods are inaccurate due to the non-linearity of the system and dynamic variations that are not predicted by these methods. One solution is the use of data-driven estimation approaches, in particular artificial neural networks (ANN), to assist in the prediction of vehicle dynamic states that cannot be obtained directly or in a conventional way.

The sideslip angle determines the displacement direction of the vehicle's center of gravity (CG), which most possibly will not follow the desired trajectory, crucial for the correct work of mobile robots and autonomous vehicles. In this context, many dynamics control systems needs to monitor the sideslip angle in the closed loop controller, in order to improve stability [5-6].

This work aims to evaluate sideslip angle using both estimates accessed by an EKF observer and a Neural Network approach. Later, the estimation obtained by the data-driven method is set as a prediction value for the filter to create a hybrid observer. For this, severe driving conditions will be explored, in which it is expected to reach the limit of vehicle stability and sliding control.

## II. MODELLING PRELIMINARIES

### A. Vehicle Modelling

When considering the vehicle body dynamics, it can be simplified assuming separately longitudinal, lateral and vertical dynamics. The model which evaluates the sideslip angles is

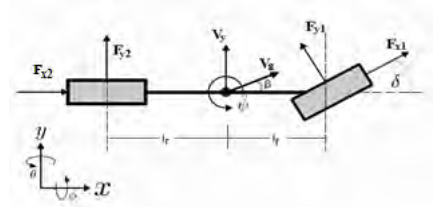


Fig. 1. Bicycle Model of a vehicle

known as the single-track model, or just as the bicycle model, and it considers both right and left wheels as one. The formulation for this model can be found in [1], with respect to Fig. 1. In this model,  $F_{x1,x2,y1,y2}$  represents longitudinal and lateral forces, for both front and rear wheels,  $V_{g,y}$  are the travel and lateral speeds,  $\beta$  is the sideslip angle,  $\delta$  is the steering angle,  $l_f$  and  $l_r$  are the distance between both wheels and the center of gravity CG.

### B. Extended Kalman Filter-Based Estimations

The dynamics of a system can be represented as state variables and is an essential concept to describe the behavior of a system, either linear or nonlinear. In such representations, data related to the past observations is used to predict its future behavior. The EKF modeling is described as

*System Definition*

$$X_k = f(X_{k-1}, U_k) + w_k \quad (1)$$

$$Y_k = h(X_k) + v_k \quad (2)$$

*Initial State*

$$\bar{X}_0 = E[X_0], P_0 = E[(X_0 - \bar{X}_0)(X_0 - \bar{X}_0)^T] \quad (3)$$

*Time Update*

$$\bar{X}_{k|k-1} = f(\bar{X}_{k-1|k-1}, U_k) \quad (4)$$

$$P_{k|k-1} = A_k P_{k-1|k-1} A_k^T + Q \quad (5)$$

*Measurement Update*

$$K_k = P_{k|k-1} H^T [H P_{k|k-1} H^T + R]^{-1} \quad (6)$$

$$\bar{X}_{k|k} = \bar{X}_{k|k-1} + K_k [Y_k - h(\bar{X}_{k|k-1})] \quad (7)$$

$$P_{k|k} = [I - K_k H] P_{k|k-1} \quad (8)$$

where the  $f(\cdot)$  and  $h(\cdot)$  represents the state evolution and observation vectors.  $X_k$  and  $U_k$  are the system states and systems inputs, respectively.  $Y_k$  are the observed variables.  $w_k$  and  $v_k$  are the disturbance and noise and are referred as the filter tuning covariance matrices.  $A_k$  and  $H_k$  are the process and

measurements Jacobian matrices at step  $k$ . At the Time Update stage, the physical or analytical model for the system is used to predict the system states. A covariance matrix  $P_{k|k-1}$  is calculated using the process covariance  $Q$  and the Jacobian matrix  $A$ . Then, at the measurement update, the state's prediction is corrected by using the system's measurements adding a gain  $K_k$  (known as the filter gain) and a covariance of the next step  $P_{k|k}$  is calculated.

### C. Neural Network-based Estimations

Neural networks (NN) are model-less approximators, which means that they are capable of perform well without any prior information from the system's modeling. Moreover, the method can be done either by relating known examples or without any knowledge about the outputs during training. The basic description of this algorithm is

$$\hat{Y}_k = f(\hat{U}_k, \hat{Z}_k) \quad (9)$$

$$S_j = \sum w_{ij} a_j + b_j \quad (10)$$

where  $\hat{Y}_k$  is the output of the network,  $\hat{U}_k$  are the inputs and  $\hat{Z}_k$  are the systems parameters, and the simple structure that forms the network are called neurons. They form different layers, named input layer, hidden layers, and output layer. A series of simple operations are performed in order to train different weights  $w_{ij}$  that describe the influence of each neuron on the output. The feedforward NN are trained previously with experimental data.

## III. METHODS

In this work, we aimed to build an observer capable of accessing the vehicle sideslip angle by means of three different approaches: model-based, data-driven and hybrid modeling. For the model-based method, the vehicle was firstly described as a bicycle model, and the space state vector, as well as the system inputs for the EKF algorithm were considered, respectively,  $X = [\psi, \beta, V_g]^T$  and  $U_k = [\delta, F_{x1}, F_{x2}, F_{y1}, F_{y2}]^T$ . The system is considered fully observable, and the measured vector is  $Y_k = [\psi, \beta, V_g]^T$ , obtained by a simulation software IPG Carmaker® performing virtual tests maneuvers. The measured sideslip angle was obtained considering the system stable and with  $\dot{\beta} = 0$  at the CG.

For the data-driven method [7], we recorded from the simulation software a set of test maneuvers, varying the tests speed from 60km/h to 110km/h, and the road friction coefficient from 0.6, 0.8 and 1.0. We performed tests procedures such as Slalom tests, Double Lane changes and Sine with Dwell were to build a dataset able to cover a wide range of operating conditions of the vehicle. From the bicycle modeling equations [1], five variables were defined as inputs to describe the NN

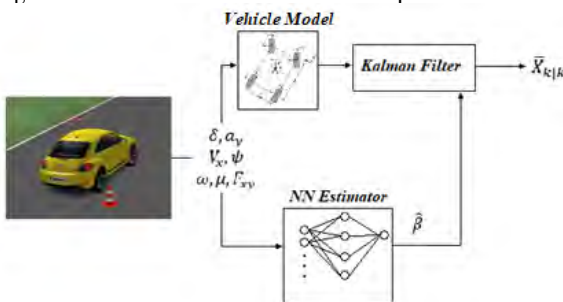


Fig.2. Proposed hybrid observer for obtaining the sideslip angle

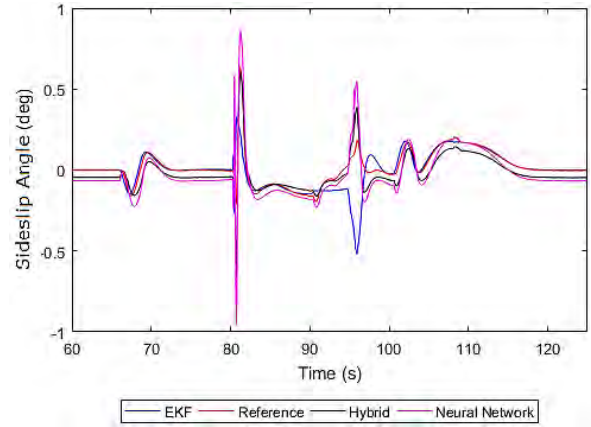


Fig.3. EKF, NN, Hybrid methods estimations and Reference values for the sideslip angle.

structure for the sideslip angle estimation: steering angle  $\delta$ , longitudinal velocity  $V_x$ , lateral acceleration  $a_y$ , the yaw rate  $\dot{\psi}$  and the friction coefficient  $\mu$ .

Comparing the results obtained by the model-based EKF method and the neural network separately, it is straightforward to believe that both methods could work well together, in a hybrid approach. For this reason, as showed in Fig. 2, the sideslip angle estimations from the neural network approach are used as the measurement state, in the EKF algorithm.

## IV. OBSERVER VALIDATION RESULTS

It can be seen in Fig. 3 that the hybrid observer proposed was able to produce better estimates for sideslip angle that both EKF and NN estimations with lower errors. The output value for the sideslip angle measured by the simulation software was set as reference value. Thus, the proposed approach seems to be a promising method to obtain estimates of sideslip angle. Furthermore, results can be optimized by an effective tuning of the covariance matrices  $Q$  and  $R$  of the EKF algorithm [8].

## References

- [1] Doumiati M, Charara A, Victorino A, Lechner D, 2012. Vehicle dynamics estimation using Kalman filtering.
- [2] Jin, X., Yin, G., 2015. Estimation of lateral tire-road forces and sideslip angle for electric vehicles using interacting multiple model filter approach. J. Franklin Inst. 352, 686–707.
- [3] Cordeiro, R.A., Ribeiro, A.M., Azinheira, J.R., Victorino, A.C., Ferreira, P.A.V., De Paiva, E.C., Bueno, S.S., 2017. Road grades and tire forces estimation using two-stage extended Kalman filter in a delayed interconnected cascade structure. IEEE Intell. Veh. Symp. Proc. 115–120.
- [4] Hong, S., Lee, C., Borrelli, F., Hedrick, J.K., 2015. A novel approach for vehicle inertial parameter identification using a dual kalman filter. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 16, 151–161.
- [5] Tchamna, R. and Youn, I. Yaw rate and side-slip control considering vehicle longitudinal dynamics Int.J Automot. Technol. (2013) 14:53.
- [6] A. Alatorre, A. Victorino, A. Charara Sideslip estimation algorithm comparison between Euler angles and quaternion approaches with black box vehicle model, IEEE 15th International Workshop on Advanced Motion Control (AMC 2018). Tokyo, Japan 2018.
- [7] B. Murta Junqueira, A. Correa Victorino and J. G. Coelho Baêta, "A Model-less Approach for Estimating Vehicles Sideslip Angle by a Neural Network Concept," 2021 IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), 2021, pp. 1-6
- [8] B. Murta Junqueira, A. Correa Victorino and J. G. Coelho Baêta "Vehicle Sideslip Angle Estimation Based on Extended Kalman Filter and Neural Network Hybrid Observer " [unpublished]



# Shared navigation in a cybernetic multi-agent autonomous system

Hugo POUSSEUR

Directeurs de thèse : Alessandro VICTORINO, Hiroshi FUJIMOTO

Équipe : SyRI

**Abstract—In a basic approach, the autonomous system drives the vehicle alone with human supervision. In our approach, the human and the system drive at the same time and a subsystem merges their commands. Inspired by the human-machine cohabitation, this solution allows to combine the precision of the machine and the intelligence and adaptability of the human/autonomous system.**

## I. CONTEXT

This thesis is under the joint supervision of France and Japan. I am supervised by two thesis directors, Alessandro Victorino from the Heudiasyc laboratory in the department of computer engineering and Hiroshi Fujimoto from the university of Tokyo, in the department of advanced energy. The thesis is financed by the research direction of the UTC in co-financing with Japan.

## II. SUBJECT AND PLANNING

### A. Subject

The objective of the thesis is to share the navigation inside a vehicle between a human and automatic system then extend this sharing to a group of vehicles.

Initially, the study framework is located inside the vehicle in particularity on how merge commands between human and auto system. Since a few years, the research is more and more important about the cohabitation between the human and the auto system inside a vehicle. These researches are mainly based on haptic communication, allowing to inform the driver if his behavior is good or not. In our research, we try to remove this communication and to implement a process allowing to merge, directly, the commands of human and automatic system. This local sharing would allow to improve the safety, using the robot's precision with the human's intelligence and adaptation capacity.

In a second step, we want to extend this fusion to a group of vehicles. At this scale, the fusion allows to optimize the movement of the vehicle and to improve the safety of each vehicle, by avoiding collisions between them and the environment. This fusion would be used when the movement of a vehicle is constrained by another vehicle and in particular at traffic circles and junctions. We can consider the group of vehicles as a multi-agent system, which allows us to apply the theory of multi-agent systems.

### B. Planning

In this first year of the thesis, the work consists in exploring the subject and to realize a state of the art.

This exploration starts with an analysis of the previous works of theses supervised by Alessandro VICTORINO. The realization of the bibliography allows to better understand the subject. In particular the concepts of autonomous system (navigation, visual servoing [1]) and shared navigation (human behavior analysis, belief function [2], cooperative game theory). In addition, this bibliography refers to research already conducted in relation to the subject.

This literature review allows us to position ourselves on the subject and to define the problematic. And thus to refocus our research axis.

## III. CURRENT STATE

As explained above, this first year allowed me to appropriate the subject and to make a review of the literature related to the subject. Initially, I focused my review on the concept of autonomous system and extended this study to the shared navigation.

### A. Works contributions

During the reading session of previous theses, I tried to add contributions, adapting these works with new concepts.

1) *Lane detection*: In previous works, the lane detection was performed using an image preprocessing approach. Due to the evolution of the deep learning and in particularity of convolution neural network (CNN), the deep learning is increasingly used in the lane detection. The preprocessing approach works on limited situations, and it's difficult to extend the model to a new approach, whereas the deep learning model works with many situations, and it is able to adapt to new situations [3] but deep learning solutions need to be trained on a large amount of data.

Our new approach is to change the image preprocessing method by a neural network. We have decided to use an auto-encoder model that is able to segment an image. The model is followed by another auto-encoder whose purpose is to correct and reduce the noise of the segmentation. The final model has been trained on the CuLane dataset. Once the segmentation is done, a regression is applied to each cluster. The Figure 1 shows the different stages of the lanes detection.

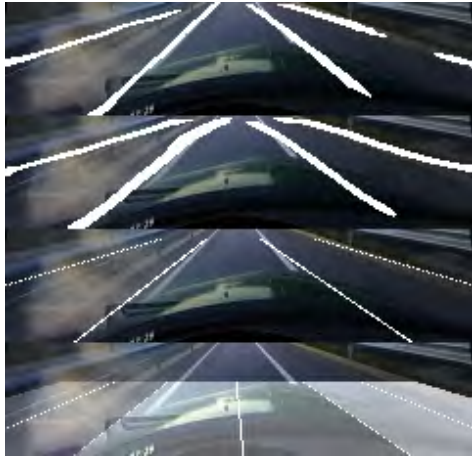


Fig. 1. Lane detection using our deep-learning solution, the first image shows the segmentation of each line, the second image shows the segmentation correction, the third image shows the regression on each cluster and the last image shows the segmentation of each lane from the regression.

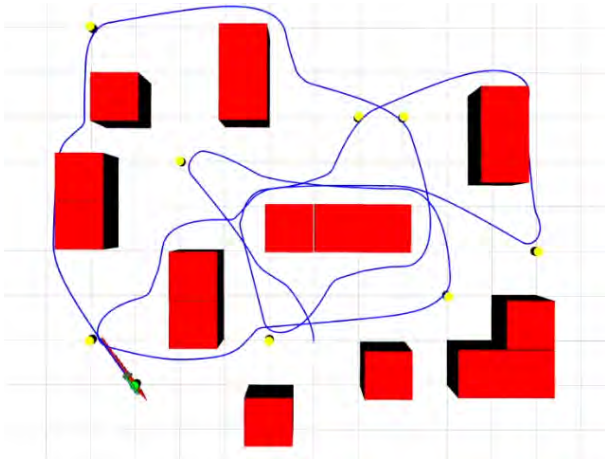


Fig. 2. Path realized by the robot using our gradient descent solution.

2) *Gradient descent apply to DWA*: The navigation local is performed using the dynamic window approach (DWA) [4]. This method is classified as an online collision avoidance strategy, that means this strategy is based on the current states of the robot (i.e. current dynamics of the robot, velocity and acceleration). This method takes into consideration physic limitations of the robot, maximum acceleration/deceleration and defines the optimal linear and angular velocity. The optimum solution at a given time,  $(v_t^*, w_t^*)$ , is defined by DWA, by evaluating many solutions individually, this method is costly in terms of execution time.

In our approach, instead of defining an objective function we define a loss function,  $L$ . Therefore, the optimal solution is the command that minimizes this function,  $(v_t^*, w_t^*) = \text{argmin}(L(v, w))$ . If the function is convex, the minium global can be achieved by gradient descent instead of the exhaustive optimization procedure of the previous work. The Figure 2 shows a path realized by a robot using our method (red cubes represent obstacles, yellow cylinders represent objectives and the blue line represents the path realized by the robot).

The goal of our solution is to reduce the execution time and

improve the accuracy of the solution. Indeed, the evolution of the traditional brute force method to gradient descent allows to reduce the complexity of the algorithm.

In order to validate the solution, we have tested the new approach on a basic robotic situation. We are implementing our solution to autonomous car driving. In this situation the goal isn't to go towards a target but to be in the center of the lane.

3) *Autonomous system implementation in simulation*: The implementation of the concepts of autonomous system, was an opportunity to take in hand the material of the laboratory, and more particularly SCANer studio (driving simulation software). This implementation will serve as a support to verify our next research.

## B. Supervision

This first year of thesis, was the opportunity to work and supervise master students. Marcone Ferreira, a Brazilian MsC student on the dissertation "Autonomous vehicle navigation based in a hybrid methodology : model based and machine learning based" defended on 24th May 2021, and Ahmad Shoud, a student doing an internship in the Heudiasyc laboratory, on "Automatic conflict management for robotic navigation". I participated in the supervision of these students in their integration of their work.

## C. Papers contributions

Currently, we have submitted a paper to the "IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics" conference. The paper deals with shared navigation with the new lane detection method (section III-A1). With, Marcone Ferreira, we will submit an article talking about shared navigation. A new one article with the gradient descent approach described above (section III-A2) will be submitted.

## IV. NEXT OBJECTIVES

The next objectives are to refocus our research on shared navigation and to further explore the following concepts :

- human behavior analysis, in order to predict human behavior in the near future allowing to understand human intention ;
- belief function, adding a notion of trust to the commands made by the human and the autonomous system ;
- fusion methods, merging commands from human and autonomous system ;

Workshops in Japan and Germany are planned over the next year.

## REFERENCE

- [1] B. Espiau, F. Chaumette, and P. Rives, "A new approach to visual servoing in robotics," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 8, no. 3, pp. 313–326, 1992.
- [2] M. Beynon, B. Curry, and P. Morgan, "The Dempster-Shafer theory of evidence : an alternative approach to multicriteria decision modelling," *Omega*, vol. 28, no. 1, pp. 37–50, 2000.
- [3] Y. Lyu, L. Bai, and X. Huang, "Road segmentation using CNN and distributed LSTM," *arXiv*, 2018.
- [4] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 23–33, 1997.

# Trajectory planning and control in the context of autonomous multi-vehicle cooperative maneuvers

Abdallah SAID

Directeurs de thèse : Reine TALJ, Clovis FRANCIS, Hassan SHRAIM (Co-tutelle with Lebanese University)

Équipe : SyRI

**Résumé**—This work aims at developing a local trajectory planning algorithm. Its purpose is to find the optimal trajectory to follow a global reference trajectory while avoiding obstacles, fixed or moving, in a smooth and comfortable way, within the constraints of road driving. The work presented in this report shows the development of the trajectory planning algorithm and optimization study of the weighting coefficient of the cost function used for choosing the best trajectory.

## I. INTRODUCTION

For nearly two decades, autonomous vehicles have been an important area of academic and industrial research that aims at improving vehicle’s safety and passenger’s comfort. Various competitions have been organized around the autonomous vehicle : The *DARPA* challenges in the United States (2004, 2005, 2007), the Korean competitions for autonomous vehicles, the European *GCDC* competitions (2013, 2016), and many others. Autonomous driving can be divided into different stages : perception of the environment, localization, trajectory planning, and vehicle control. This paper presents the work done on a local trajectory planning algorithm for autonomous navigation. The planning algorithm must generate a smooth and safe trajectory based on several criteria. Furthermore, these criteria are normally described by a cost and combined together in a weighted function cost. The selection of the weighting coefficient for each cost is usually complicated and may be scenarios dependant. Thus, an optimization study to choose an optimal range of weights is performed and presented.

In the following section, we will present the work done on the planning aspect, its simulations results and the optimization study of weighting coefficient. The research work presented is part of a project launched by the *Heudiasyc* laboratory on systems control applied to several interacting autonomous vehicles. This work is closely related to the future investment projects, the *Labex MS2T* and the *Robotex Equipex*, of the *Heudiasyc* laboratory.

## II. THESIS PROGRESSION

This section aims at presenting two parts : The first subsection is devoted to present the development of the trajectory planning algorithm. The second subsection presents an optimization study of the weighting coefficient of the optimal trajectory cost function.

### A. Trajectory Planning

Our path planning algorithm must provide the optimal path from a set of paths that helps the vehicle to track a

reference trajectory while avoiding static and mobile obstacles and ensuring the safety and comfort of passengers. Different trajectory planning approaches have been developed for the navigation of autonomous vehicles [1], [2]. The bibliographic study allowed us to choose the reactive approach proposed by [3] to ensure autonomous navigation in an uncertain context. Several improvements are proposed taking into consideration road driving conditions. The navigation strategy is composed of several stages. The entire procedure of the path planning is shown in Fig. 1. First, the planning algorithm generates a finite number of candidates, each of which has a distinct lateral offset from the reference path to cover the entire width of the road (see Fig. 2). Secondly, an obstacle detection procedure is carried out. We generate a classification area formed by the footprint of the vehicle along the path candidate. Once the first obstacle is detected, the free distance traveled on the path to reach the obstacle is called collision distance  $d_{obs}$ . The next step is to classify each path, according to the collision distance and the safe stop distance, into three classes : non, partially or fully navigable path. Thirdly, the navigable paths are evaluated according to various criteria including smoothness, safety, consistency with the initial state of the vehicle and tracking of the reference trajectory. Once these criteria are estimated by a cost and combined in a weighted cost function, the best desired path is either the optimal one, with minimal cost, if there are executable and navigable paths, or, if there are none, the path who has the greatest distance to the obstacle with

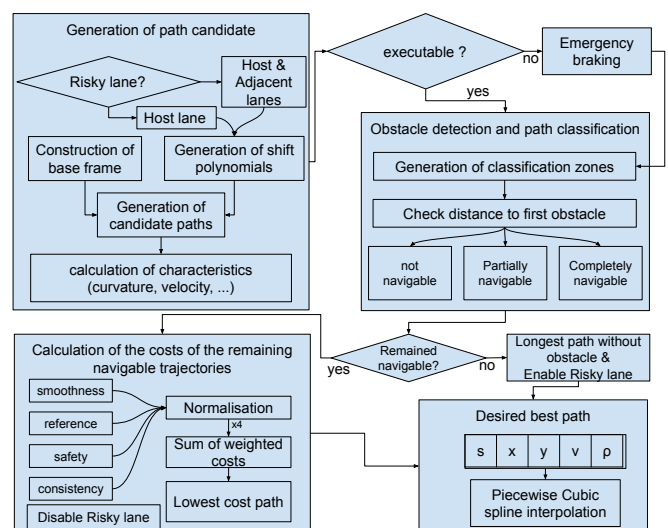


Fig. 1: Path planning diagram

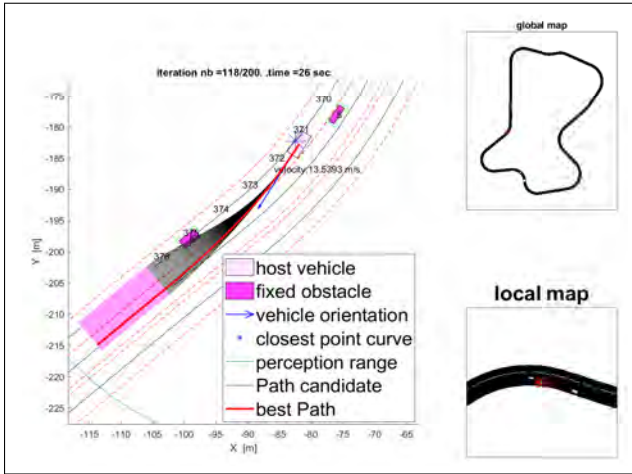


Fig. 2: Trajectory planning : simulation environment

braking action. The desired path is represented by a series of points defined by the curvilinear abscissa, x and y coordinates, velocity and curvature.

### B. Simulation results

To validate our planning algorithm, it was simulated in *MATLAB* by taking into account the vehicle's dynamics [4]. To show the flexibility and the safety aspects of the presented approach, it was applied to a fairly realistic scenario. We present in Fig. 3 a single challenging test scenario, instead of several simple scenarios. The vehicle starts traveling along the road center. It passes through a tight passage to avoid static obstacles in a straight road then accelerates to reach the desired speed. When entering the curvy road, the vehicle encounters a fixed obstacle blocking the host lane and a mobile obstacle on the other lane in opposite direction, so the planning algorithm slows down the vehicle, leaving the way for the moving obstacle. Then, the vehicle is accelerated to pass the fixed obstacle. At  $t = 18s$ , we see an overtaking of a mobile obstacle ( $v_{obs} = 25km/h$ ), shown in the boxes. During this maneuver, the planner respects the security distance and selects

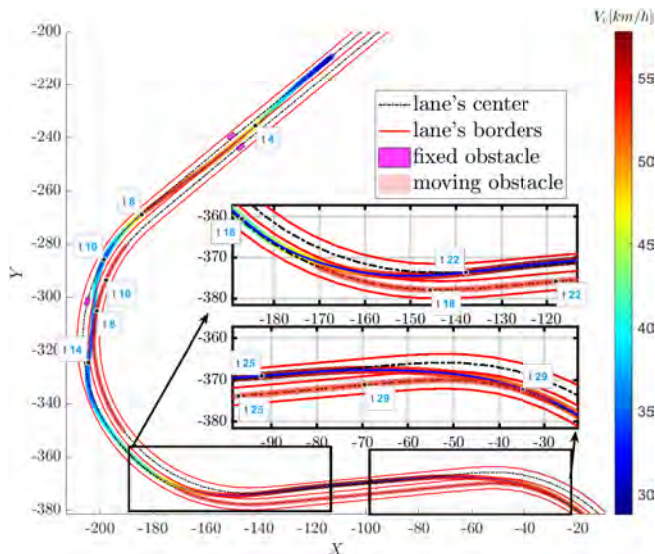


Fig. 3: Simulation results : trajectories and vehicle's speed

a smooth and comfortable path to overtake the mobile obstacle and then return to the host lane.

### C. optimization of weighting coefficient

As mentioned in section II-A, the selected trajectory is the best among several candidate trajectories, evaluated according to different criteria where each one is described by a cost function. The global cost function is a combination of several individual costs functions which we seek to minimize in order to determine the optimal trajectory from the several candidate trajectories generated by the planning algorithm. Our goal is to find the optimal weighting coefficients range for the cost function of the planning algorithm. First, we propose any scenario with or without fixed or moving obstacles. Second, we generate  $n$  random combinations of weighting coefficients, each one bounded between two values ( $0 \leq l_b \leq C \leq u_b \leq 1$ ). Then, we run the planning algorithm  $n$  times. The  $n$  vehicle's trajectories obtained are considered as complete if the algorithm manages to reach the end of the proposed scenario without stopping or colliding with any obstacle.

The planning algorithm is tested with a variety of scenarios, with different combinations of weights. We can conclude that the planning algorithm is robust to the variation of the cost weighting, which represents a significant advantage for encountering scenarios.

This study shows the role of each cost in the choice of the optimal trajectory in the whole and leads us to choose a range for each coefficient.

## III. CONCLUSION AND PERSPECTIVES

In this summary, we have presented the state of progress of this thesis work concerning local trajectory planning and the planning architecture. A validation of the proposed algorithm on SCANer studio simulator is in progress. In the future, we intend to develop a cooperation algorithm for certain driving maneuvers, and to validate the trajectory planning approach on a real experimental vehicle in Heudiasyc laboratory.

### ACKNOWLEDGMENT

This work is co-financed by a half ministerial allocation and a scholarship from the Lebanese University. It started in October 2018, and for 3 years.

### RÉFÉRENCES

- [1] Katrakazas, Christos, et al. "Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving : State-of-the-art and future research directions." *Transportation Research Part C : Emerging Technologies* 60 (2015) : 416-442.
- [2] Paden, Brian, et al. "A survey of motion planning and control techniques for self-driving urban vehicles." *IEEE Transactions on intelligent vehicles* 1.1 (2016) : 33-55.
- [3] CHU, Keonyup, LEE, Minchae, et SUNWOO, Myoungcho. Local path planning for off-road autonomous driving with avoidance of static obstacles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2012, vol. 13, no 4, p. 1599-1616.
- [4] Chebly, A., Talj, R., Charara, A. Coupled longitudinal and lateral control for an autonomous vehicle dynamics modeled using a robotics formalism. *IFAC-PapersOnLine*, 50 (1) : 12526-12532, 2017. In 20th IFAC World Congress.



# Robust and Safe Control Architecture for Distributed Multi-Vehicle Systems Under Dynamic Constraints

Lyes SAIDI

Directeurs de thèse : Lounis ADOUANE, Reine TALJ-KFOURY

Équipe : SyRI

**Abstract—Cooperative navigation and formation control of Multi-Vehicle systems (MVs) can be auspicious concepts to deal with nowadays mobility issues. This thesis aims at developing a robust bidirectional link between the cooperative decision-making layer and the action level of MVs control architecture, to guarantee a safe and reliable navigation in uncertain and dynamic environments.**

## I. INTRODUCTION

According to [1], 85% of on-road accidents are due to human errors. Taking these alarming statistics into account, the automotive industry has set itself a mission to reduce the accident number by addressing human errors. One way to eliminate the large majority of human errors is by automating the driving task.

The goal of Autonomous Vehicle (AV) is to reach and exceed the driver safety judgement and reliability on risk assessment and management. Classical control architecture was proposed to manage the driving task autonomously, where Perception links the AV with its environment, understanding layer and decision-making manage the driving task and its complexity, and action controls the vehicle dynamics.

One of the most interesting research topics corresponds to autonomous navigation of a group of vehicles known as MVs. In fact, a number of situations require motion coordination (e.g., intersections, on-ramp merging, etc.). The advantages of MVs are several: accident reduction, improved passengers comfort, reducing road congestion, better energy efficiency among other advantages. Nonetheless, some challenging problems need to be solved to ensure safe and robust MVs navigation.

In addition to the introduction, this paper is organized into three main sections: Section II addresses the challenges and objectives of our work, Section III proposes an overview of the state of the art of our challenges, and Section IV annotates our ongoing works and research directions.

## II. CHALLENGES AND OBJECTIVES

### A. Decision making under-uncertainties

AVs are game changing in terms of solving nowadays navigation issues. However, they require us to build a control software capable of coping with multiple sources of uncertainty, that are either preexisting or introduced as a result of

processing. Such uncertainties can come from many sources that can be local or distant (e.g., AV own perception or perception communicated by the peer-to-peer communication). The effects of this uncertainty are even present when we address not one vehicle, but a group of vehicles. Consequently, uncertainties need to be taken into account when building the AV's decision-making module (cf. Section III-A).

### B. Cooperative navigation for challenging scenarios

The aim of motion coordination between AVs is to ensure the zero-collision requirement even in the most conflictual scenarios. We can cite intersection crossing problem (cf. Section III-B2) or merging on-ramp represented in Figure 1 (cf. Section III-B1), where the coordination of the vehicles is performed while concurrently crossing intersections/merging on-ramp. It should enable vehicles to give each other the right-of-way, while possibly minimizing the average delay experienced by vehicles in waiting.

### C. MVs navigation in formation

Autonomous vehicle formation control is an important part of the traffic management because of several benefits such as improving on-road safety, increasing traffic flow and reducing energy consumption. Having a safe and reliable formation control method permits to reduce the in-between distance among the vehicles (cf. Section III-B3), which acts directly on traffic penetration and the aerodynamic drag to improve energy consumption.

## III. STATE OF THE ART

### A. Overview of the uncertainty assessment

Two classes of uncertainty assessment can be distinguished through the literature. The first class of uncertainty assessment use the model-based methods, where a deep understanding of the system behavior is required to describe analytically with the use of mathematical models the evolution of uncertainty. Bayesian networks are used to model the road users' intentions and decide on the overtaking maneuver on highway in [2].

Instead of modeling the system behavior under several assumptions and conditions. The data-driven methodology extracts relevant information by interpreting the data structure and its statistical features, in order to build the most reliable



possible trajectories. An interval-based/data-driven safety verification technique is used in [3] to enhance the reliability of the analytical models used for the autonomous navigation.

### B. A review on the cooperative navigation of MVs

By *coordination*, we refer to the decision-making aimed at orchestrating vehicle's actions to achieve an individual or common goal.

The problem of coordinating the movements of Connected and Automated Vehicles (CAVs) in on-road environment is a very global one, including heterogeneous scenarios from cruise and merging management on highway (e.g., platooning, cooperative merging on-ramps on highway, etc.), to urban scenarios, like cooperative signalized/non-signalized intersection crossing. In the following, we propose an overview of closely related topics to the problem of cooperative navigation of MVs.

1) *Cooperative on-ramp merging on highway*: Traffic Optimization framework under an analytical closed-form solution can be used to reduce the trajectories overlapping as in [4] in order to perform the merging safely and avoid bottleneck at the merging zone. [5] proposed an approach to map a virtual vehicle into the highway main lane before the actual merging happens, allowing the vehicle to perform safe and smooth merging maneuver.

Considerable energy efficiency improvement can be obtained with cooperative on-ramp merging according to [6].

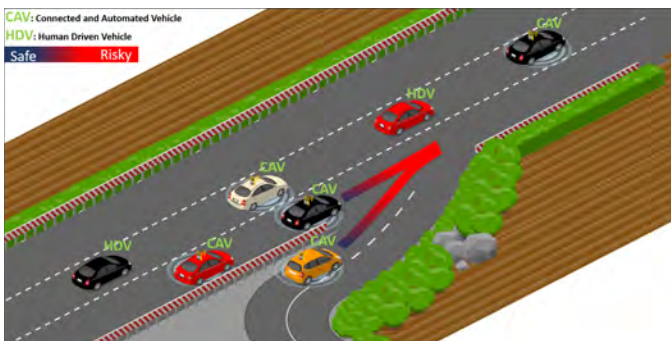


Fig. 1. Cooperative on-ramp merging on highway

2) *Cooperative intersection crossing on urban area*: Increasing the throughput at an intersection is one desired goal to reduce traffic congestion, in addition to zero-collision requirement. Centralized approaches based on optimization can be founded in [7], where authors focus on finding an optimization function that involves travel time. Minimizing the overlapping space is one solution proposed in [8].

Improvement in terms of energy efficiency is a major benefit of cooperation at intersection. In [9] linear optimization was used to formalize the intersection problem.

3) *Overview of MVs navigation in formation*: An auspicious tool for formation creation and formation control is the Cooperative Adaptive Cruise Control (CACC). CAV shares its own parameters with other CAVs without any centralization. Consequently, CACC takes advantage from the Vehicle-to-vehicle (V2V) communication to allow CAVs to form platoons

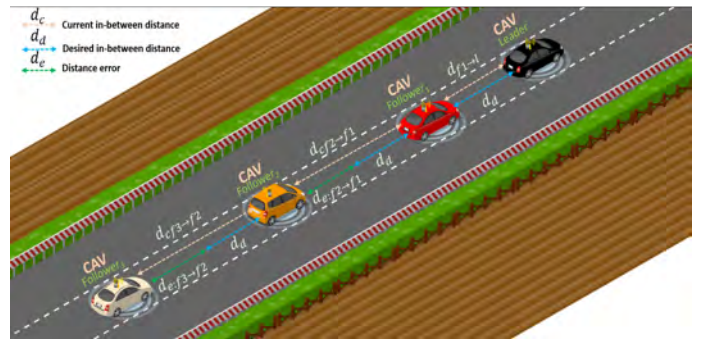


Fig. 2. Cooperative adaptive cruise control

and be driven at harmonized speed by reducing error  $d_e$  between the desired distance/time headway  $d_d$  and the actual in-between distance  $dc(.) \rightarrow (.)$  (cf. Figure 2). Reducing in-between distance/headway permits to increase the traffic flow, while harmonized speed improves the energy efficiency.

### IV. ONGOING WORKS AND RESEARCH DIRECTIONS

Currently, a bibliographic report is underwriting. The possibility to produce an up-to-date and comprehensive survey is under discussion.

In the next few months, we will explore several research directions to tackle our objectives and challenges (cf. Section II). A method based on the virtual structure approach for formation control will be studied to deal with the cooperative on-ramp merging on highway. Uncertainty assessment will be added later to the decision-making layer of our proposed control architecture. Maneuver negotiation is one cornerstone in our work, a conceptual idea based on auction-negotiation is being discussed.

### REFERENCES

- [1] W. Wierwille, R. Hanowski, J. Hanley *et al.*, "Identification and evaluation of driver errors: Overview and recommendation," *Technical report*, 2002.
- [2] D. Iberraken, "Safe Trajectories and Sequential Bayesian Decision-Making Architecture for Reliable Autonomous Vehicle Navigation," Theses, Université Clermont Auvergne, Oct. 2020. [Online]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-03158717>
- [3] N. M. B. Lakhal, L. Adouane, O. Nasri, and J. B. H. Slama, "Interval-based/data-driven risk management for intelligent vehicles: Application to an adaptive cruise control system," pp. 239–244, 2019.
- [4] J. Rios-Torres and A. A. Malikopoulos, "Automated and cooperative vehicle merging at highway on-ramps," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 780–789, 2017.
- [5] F.-C. Chou, S. E. Shladover, and G. Bansal, "Coordinated merge control based on v2v communication," pp. 1–8, 2016.
- [6] A. Vahidi and A. Sciarretta, "Energy saving potentials of connected and automated vehicles," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 95, pp. 822–843, 2018.
- [7] J. Rios-Torres and A. A. Malikopoulos, "A survey on the coordination of connected and automated vehicles at intersections and merging at highway on-ramps," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 5, pp. 1066–1077, 2017.
- [8] J. Lee and B. Park, "Development and evaluation of a cooperative vehicle intersection control algorithm under the connected vehicles environment," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 13, no. 1, pp. 81–90, 2012.
- [9] S. A. Fayazi, A. Vahidi, and A. Luckow, "Optimal scheduling of autonomous vehicle arrivals at intelligent intersections via milp," pp. 4920–4925, 2017.

# World Model for intelligent autonomous vehicles

Corentin SANCHEZ

Directeurs de thèse : Philippe BONNIFAIT, Philippe XU, Alexandre ARMAND (Co-encadrant Renault)

Équipe : SyRI

**Résumé**—For an autonomous vehicle, situation understanding is a key capability towards safe and comfortable decision-making and navigation. Information is provided by multiple sources. Prior information about the road topology and traffic laws are given by a High Definition map while the perception system provides the description of the space and of road entities. In complex situations (e.g urban areas), the road user behaviors are governed by strong interactions with the others. In such situations, reliable situation understanding is mandatory to avoid inappropriate decisions. Nevertheless, situation understanding is a complex task that requires access to a consistent and non-misleading representation of the vehicle surroundings. That is why the notion of world model is introduced. This article briefly presents the functions of such a module as well as a spatial information representation called Lane Grid Map.

## I. INTRODUCTION

In order to make decisions, an autonomous vehicle has to be aware of its surrounding environment through its perception using several types of sensors. Once data is collected, it has to be processed and understood in order to make decisions. Therefore, a module stands between the Perception module and the Decision Making (DM) one. This module, called World Model (WM), gathers all types of information and fuses it with prior knowledge, such as the road structure or the traffic laws, in order to infer knowledge.

## II. WORLD MODEL SYSTEM IN AUTONOMOUS DRIVING SOFTWARE ARCHITECTURE

The software architecture can be summarized as follows (Fig. 1). A Perception module which processes data from embedded sensors as well as data exchanged through V2X communications. A Localization module, which can infer its position on the road using a GNSS receiver and a map. A WM module, which is in charge of the situation understanding. A DM module, which plans a global path, the behavior of the vehicle and the local trajectory.

The WM is a system which has several tasks to fulfill. It has to store information related to the surrounding scene. A digital map of the road layout and traffic laws are stored in a database as prior information. On top of that, uncertainty of information given by the perception module, the localization module and the map database have to be handled. That is why integrity of the WM is a prospective topic. The WM output cannot provide misleading situation understanding.

### A. WM levels

Any information coming from the Perception module updates the state of the WM. As presented in [1], the WM has several layers of abstraction. The WM module levels interact with the DM module at the corresponding levels.

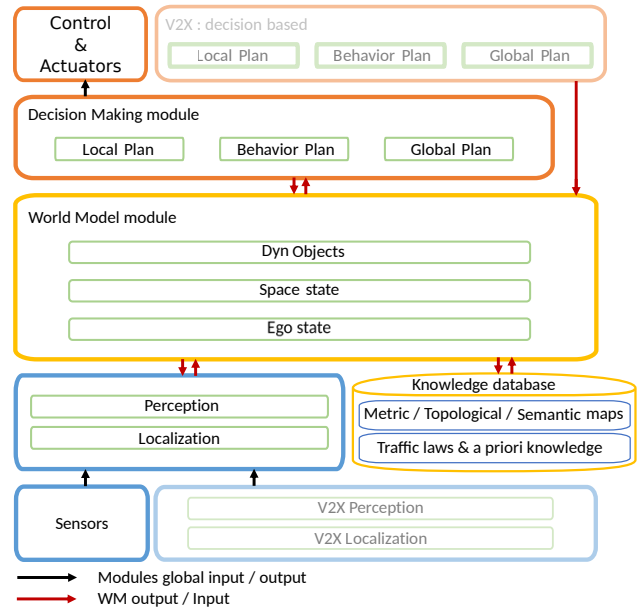


Fig. 1. Modules of the autonomous vehicle

1) *Strategic level of abstraction (high level)*: This level has the duty to compute and infer high-level information. At this level an Interaction Graph is built based on the principles described in [2]. Nodes represent lanes of interest for the autonomous vehicle and vertices model their relations. Two types of lane of interest are differentiated. The primary order lanes are directly in interaction with the ego vehicle intended path. These lanes are the ones for which the vehicle needs to have information, typically whether they are occupied by another road user, for decision-making. The second order encompasses lanes that have an indirect interaction with the autonomous vehicle.

2) *Tactical level of abstraction (intermediate level)*: At the tactical level, the autonomous vehicle has to convert the topological information provided at the strategic level into a metrical representation. This representation is a longitudinal discretization of the lanes of interest provided by the Interaction Graph, as presented in [2], and is called a Lane Grid Map (LGM). The next step is to characterize each cell of the LGM using perception information from exteroceptive sensors such as cameras or LiDAR.

3) *Operational level of abstraction (low level)*: The lowest level of abstraction corresponds to a representation at the sensor level. The space characterization is classically done using grids [3] or parametric free space [4].

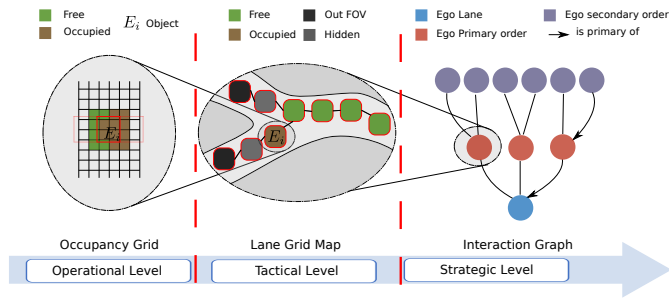


Fig. 2. Spatial information representation at each level of abstraction. The cells of the LGM are represented by the squared nodes.

### B. WM scene and situation

When information stored in the WM and the global path given by the DM module are combined, only relevant entities of the environment entities will be used for situation interpretation. Those selection and augmentation processes enable to go from a scene to a situation understanding [5]. Several layers are part of the WM. The ego vehicle information, the spatial occupancy and a list of dynamic objects are provided to decision making.

### C. WM prediction

The WM has the purpose to make prediction of the scene or the situation for a given time period. The WM should be able to infer possible futures. Given that fact, as we go up in the layers hierarchy, we go further in time exploration. Similarly, the further we are able to predict, the coarser the space resolution will be. Inversely, the closer we are looking at, the higher the space resolution will be.

## III. LANE GRID MAP

As presented in [2] and deepened in [6], an intermediate space state representation is introduced at the tactical level with the Lane Grid Map. The characterization process brings additional information for the decision making using the Interaction Graph at the Strategic level and a low level space representation from the operational level.

Static objects have an impact on the decision-making process. They are typically well represented in occupancy grids. At the opposite, dynamic objects (*e.g.*, other road users) interact with the surrounding environment. More complex information can be inferred from their presence. Two concepts presented in [2] enable to bring more information on occluded areas. The concepts of safety area and protected area are proposed. They characterize a physical space that is under occlusion for the autonomous vehicle.

To illustrate the concepts introduced previously, let us illustrate them through figure 3, extracted from real data.

1) *Protected case*: The ego-vehicle intends to enter the roundabout and has to give way to the vehicles coming from the left merging lane. This example represents a situation where the ego-vehicle should be able to take a decision even under occlusion at a give-way intersection. The purple cells highlight the protected area. Like hidden cells, in white, protected ones are not observed, but its space is physically obstructed by the presence of other road users (red rectangle).

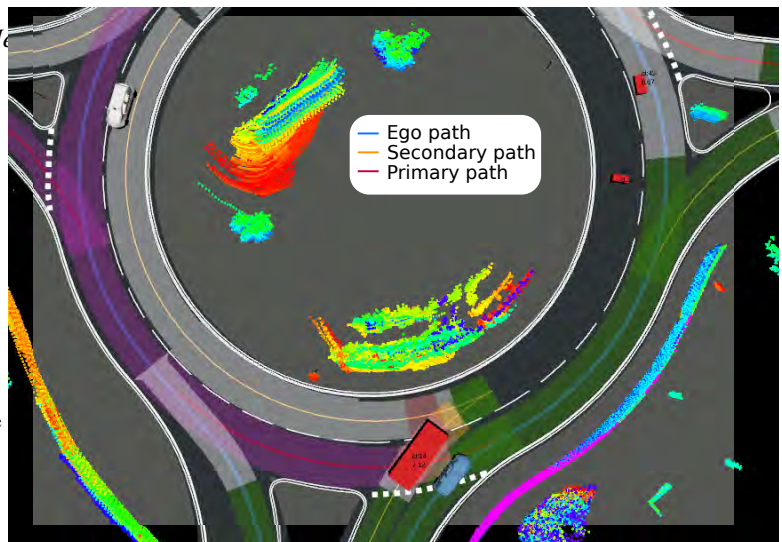


Fig. 3. A Lane Grid Map displayed in RViz. Each cell is characterized as one of the following states : Free (green), Occupied (red), Hidden (white), Safety zone (orange), Protected zone (purple). The ego vehicle (blue) follows the blue intended path.

2) *Safety case*: As mentioned previously, a safety area is defined in front of every detected object by using its estimated speed. It is assumed here that vehicles constantly keep safe inter-distance with other vehicles so they can safely perform emergency braking to avoid collision in case of dangerous situations. It means that it is likely that the immediate space in front of any vehicle is free. Like hidden cells, safety ones displayed on figure 3 are not observed, but its space is classified with a safety state because of the presence of other road users that are just behind.

## IV. INTEGRITY

The world model stores a dynamical representation of the environment. As uncertainty has to be taken into account, an integrity criterion needs to be defined in order not to have a misleading situation understanding. As presented in [6], this paper explains in detail how spatial sampling of the LGM enables to keep information integrity under a given target. Given a target integrity risk, a spatial sampling strategy is proposed, taking into account localization and perception uncertainties.

## V. PERSPECTIVES

An intermediate lane level information representation has been proposed with Lane Grid Maps. The Interaction Graph enables the autonomous vehicle to focus on relevant space parts and to look for the corresponding potential interactions. Work on prediction on LGM for a better situation understanding also needs to be deepened.

## RÉFÉRENCES

- [1] J. S. Albus, "4D/RCS : A reference model architecture for intelligent unmanned ground vehicles," in *AeroSense*, Jul. 2002, pp. 303–310.
- [2] C. Sanchez, P. Xu, A. Armand, and P. Bonnifait, "Lane level context and hidden space characterization for autonomous driving," in *IV*, 2020.
- [3] S. Hoermann et al., "Entering crossroads with blind corners. A safe strategy for autonomous vehicles," in *IV*, Jun. 2017, pp. 727–732.
- [4] M. Schreier, V. Willert, and J. Adamy, "Compact Representation of Dynamic Driving Environments for ADAS by Parametric Free Space and Dynamic Object Maps," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 17, no. 2, pp. 367–384, Feb. 2016.
- [5] S. Ulbrich et al., "Defining and Substantiating the Terms Scene, Situation, and Scenario for Automated Driving," in *IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems*, Sep. 2015, pp. 982–988.
- [6] C. Sanchez, P. Xu, A. Armand, and P. Bonnifait, "Spatial sampling and integrity in lane grid maps," in *IV*, 2021, pp. 190–196.



# Validation de retours multimodaux pour le cockpit multi-sensoriel en environnement virtuel immersif dans le cas de l'inattention du conducteur

Baptiste WOJTKOWSKI

Directeurs de thèse : Veronica TEICHRIB, Indira THOUVENIN

Équipe : SyRI

**Résumé**—Les conducteurs de véhicules autonomes ont besoin de retours adaptés à chaque situation pour reprendre le contrôle d'un véhicule en mouvement. Notre objectif est de proposer une mesure de l'attention pour adapter les retours. Nous avons proposé une expérience prouvant les intérêts de modèles adaptatifs naïfs dans la prévention d'accidents de reprise de contrôle en implémentant un modèle d'adaptation simple que nous souhaitons enrichir, complexifier et valider.

## I. INTRODUCTION

La reprise de contrôle (TO, takeover) d'un véhicule en mouvement par un humain est un moment critique : la coopération humain/machine se reconfigure en un espace de temps très court (25 secondes pour les plus longues, 2 pour les plus courtes [1]) et est aboutit parfois à une collision. La réussite d'une tâche dépend du niveau de difficulté de celle-ci de l'urgence de la situation, de l'état cognitif du conducteur, de variations intersubjectives, du niveau d'automatisation et de l'interface utilisée. La Réalité Augmentée (RA) améliore les performances de reprise de contrôle lorsqu'elle est utilisée de manière statique [2]. Notre propos est qu'il faut limiter ces retour en fonction des capacités du conducteur à un moment donné et donc de son niveau de préparation à la reprise appelé disponibilité ou *readiness* en anglais [3].

Notre objectif est de proposer un modèle fiable adaptant les retours faits à l'utilisateur en fonction de son niveau d'attention. Nous souhaitons implémenter et valider un modèle d'adaptation complexe reposant sur un modèle d'attention spécifique aux TO. Pour ce faire, il nous faut un jeu de données de TO variées obtenu en simulateur à l'aide du CAVE.

Nous avons en première année proposé un modèle d'adaptation au conducteur. Durant la deuxième année, nous avons effectué une première expérience en simulateur ayant un double objectif : collecter des données de TO et étudier l'intérêt d'une interface adaptative. Une fois ce jeu de données constitué, nous avons pour objectif de comparer différentes méthodes d'apprentissage pour retrouver les valeurs de disponibilité. Enfin, nous validerons l'intérêt d'un modèle d'adaptation complexe lors d'une expérience finale en simulateur.

## II. TRAVAUX CONNEXES

Une situation de TO est définie par un véhicule, son conducteur et son milieu. Le véhicule et son environnement avant la reprise de contrôle constituent ce que l'on appelle un scénario de conduite.

### A. Scénarios de conduite

Pour nos travaux, nous nous sommes concentrés sur l'étude de la TO non critique (8 à 20 secondes) sur autoroute. Ces TO sont déclenchées par un élément que l'automate sait ne pas pouvoir gérer mais qui peuvent être anticipés à l'avance. Plusieurs situations de ce type sont décrites dans la littérature :

- La présence d'un véhicule accidenté sur une voie
- La présence de travaux, incitant éventuellement à enfreindre les marquages permanents.
- La défaillance de certains capteurs, incapacitante pour l'automate.

Les conducteurs supposés observer la route s'engagent tout de même dans des discussions avec des passagers voire des tâches visuellement distrayantes. Ces tâches sont simulées en laboratoire en utilisant des questionnaires vocaux ou en faisant jouer les conducteurs à des applications mobiles diverses.

### B. Étude des performances d'un conducteur

L'observation de cas d'échecs est trop rare pour être directement étudiée mais elle est corrélée à la dynamique du véhicule dans les premiers instants de la TO comme des virages intempestifs pour éviter un obstacle ou freinages brutaux. On s'intéresse donc aux pics des valeurs d'accélération, de freinage et d'angle au volant dans les secondes qui suivent, ainsi qu'au temps de réaction du conducteur pour valider ou non les performances de celui-ci.

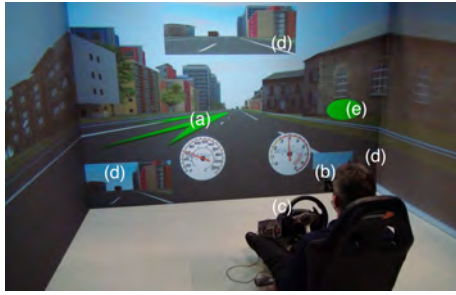
Les performances d'un utilisateur sont également jugées à l'aune de critères subjectifs de la charge mentale à l'aide de questionnaires NASA-TLX.

### C. Modélisation du conducteur

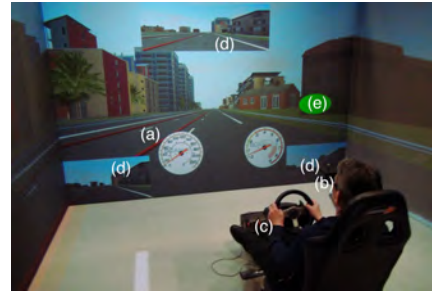
Les modélisations du conducteur cherchent à établir rapidement si celui-ci est capable de reprendre le contrôle de son véhicule. Les méthodes les plus efficaces en conduite manuelle, reposant sur la dynamique du véhicule ne s'appliquent bien entendu pas dans le cadre de l'automatisation du véhicule. Elles reposent donc usuellement sur :

- La détection du regard [4]
- La détection du corps de l'utilisateur [3]
- La détection de la tête de l'utilisateur. [3]

Les systèmes basés règles ont un intérêt de fiabilité mais de nombreuses approches tendent à proposer des modèles d'apprentissages utilisant des notamment SVM ou des LTSM.



(a) Implémentation du tapis vert



(b) Implémentation de la ligne rouge

Fig. 1: Métaphores du tapis telles qu'implémentées dans notre simulateur. (a) métaphore du tapis/ligne rouge, (b) lunettes de tracking, (c) volant et pédaliers, (d) rétroviseurs, (e) indicateur de l'état de l'automate

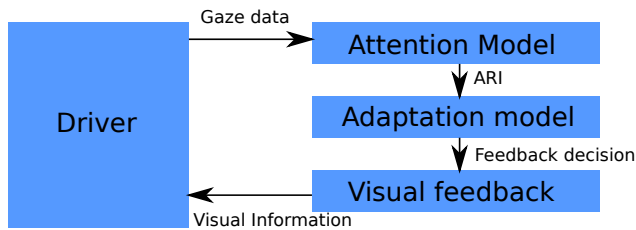


Fig. 2: Le modèle AMI

### III. PROPOSITION D'UN MODÈLE NAÏF

Nous avons d'abord proposé un modèle d'adaptation simple appelé AMI (Adaptive Model for human vehicle Interaction). Ce modèle se compose d'un modèle d'attention (cf fig. 2), un modèle d'adaptation et retour visuel :

- **Modèle d'attention** : Nous avons utilisé le modèle d'attention de Herzberger qui considère que l'attention est proportionnelle au temps de fixation de la route.
- **Retours visuels** : Nous avons implémenté dans notre simulateur des retours similaires à ceux d'Eriksson [5], la métaphore du tapis et de la ligne rouge (cf fig. 1).
- **Modèle d'adaptation** : Nous avons proposé un modèle d'adaptation basé seuil : les aides ne sont affichées que si l'utilisateur a fixé la route pendant moins de 0.6s.

### IV. EXPÉRIENCE

Dans le CAVE (cf figure 1), les sujets étaient placés face aux trois situations décrites en partie II-A. Leurs performances étaient mesurées avec une interface adaptative telle que décrite en partie II-C, ou avec une interface fixe affichant en permanence la métaphore visuelle.

Nous avons procédé à une collecte de données objectives et subjectives similaire à ce qui est décrit en partie II-B. Les résultats montrent une légère amélioration des performances ainsi qu'un meilleur ressenti lors de l'utilisation de l'interface adaptative. Les utilisateurs ont l'impression que la tâche de TO est moins demandante et ont des comportements plus prévisibles et donc moins dangereux.

### V. CONSTITUTION DU JEU DE DONNÉES

À l'issue de cette expérience, nous avons proposé une annotation du jeu de données en corrélant les comportements des

conducteurs . L'objectif est de mettre au point un algorithme permettant de résoudre un problème de régression visant à appairer des  $(x_n, y_n)$

$$x_n = (tete, pieds, mains) \quad (1)$$

$$y_n = (ORI) \quad (2)$$

avec *tete*, *pieds* et *mains* des indices sur les positions de ces parties du corps et ORI l'*Observable Readiness Index*, un indice de disponibilité de conducteur (cf, soumis).

### VI. TRAVAUX FUTURS

Nous souhaitons donc utiliser le jeu de données généré pour comparer différents modèles de prédiction des performances en étudiant notamment l'intérêt de chaînes de Markov cachées en discrétisant l'intervalle des ORI.

### REMERCIEMENTS

*Nous remercions chaleureusement le FEDER (Fond Européen de Développement Régional), la région Hauts-de-France ainsi que la chaire d'excellence pour les surfaces intelligentes dans le véhicule du futur pour leur financement) ainsi que Yohan Bouvet pour son aide technique précieuse.*

### RÉFÉRENCES

- [1] N. Merat, A. H. Jamson, F. C. Lai, M. Daly, and O. M. Carsten, "Transition to manual : Driver behaviour when resuming control from a highly automated vehicle," *Transportation Research Part F : Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 27, pp. 274–282, Nov. 2014.
- [2] S. Langlois and B. Soualmi, "Augmented reality versus classical HUD to take over from automated driving : An aid to smooth reactions and to anticipate maneuvers," in *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Nov. 2016, pp. 1571–1578, iISSN : 2153-0017.
- [3] N. Deo and M. M. Trivedi, "Looking at the Driver/Rider in Autonomous Vehicles to Predict Take-Over Readiness," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 5, no. 1, pp. 41–52, Mar. 2020.
- [4] K. Zeeb, A. Buchner, and M. Schrauf, "What determines the take-over time? An integrated model approach of driver take-over after automated driving," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 78, pp. 212–221, May 2015.
- [5] A. Eriksson, S. M. Petermeijer, M. Zimmermann, J. C. F. de Winter, K. J. Bengler, and N. A. Stanton, "Rolling Out the Red (and Green) Carpet : Supporting Driver Decision Making in Automation-to-Manual Transitions," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, vol. 49, no. 1, pp. 20–31, Feb. 2019.