



## Programme de cotutelles de thèse entre l'université Libanaise et le réseau UT-INSA

**Intitulé du sujet de thèse :** Architecture de contrôle/commande robuste et sûre pour systèmes multi-véhicules distribués sous fortes contraintes dynamiques

### Directeur(s) de thèse

- Lounis Adouane, Professeur, laboratoire Heudiasyc, UMR CNRS 7253, UTC (lounis.adouane@hds.utc.fr)
- Reine Talj, Chargée de Recherche CNRS - HDR, laboratoire Heudiasyc, UMR CNRS 7253, UTC (reine.talj@hds.utc.fr)
- Clovis Francis, Professeur, CRSI (Centre de Recherche Scientifique en Ingénierie), Université Libanaise - Faculté de Génie, Liban (cfrancis@ul.edu.lb)

**Mots clés :** Systèmes multi-véhicules autonomes sûrs ; architectures de contrôle/commande robuste ; prise de décision collaborative sous incertitude ; dynamique de véhicule ; optimisation énergétique ; gestion et management des risques de navigation.

Ce sujet de thèse a trait aux systèmes multi-véhicules (SMV) autonomes, qui doivent coordonner/synchroniser leurs mouvements pour naviguer d'une manière sûre et efficiente énergétiquement dans des situations complexes (e.g., navigation en convoi). Ce sujet s'intègre dans le cadre du projet IRP (International Research Project) ADONIS entre le CNRS, l'Université de technologie de Compiègne (UTC), l'Université Libanaise (UL) et le CNRS Liban. Ce projet de 5 ans, commencé en 2020, affirme et renforce la collaboration qui existe entre l'UTC et l'UL depuis de longues années. Côté UTC, cette thèse s'intègre dans le cadre du projet global sur les véhicules autonomes (VAs) du laboratoire Heudiasyc<sup>1</sup> (UMR 7253 CNRS / UTC). Il est à noter que l'Heudiasyc est porteur de deux projets d'envergure dans le cadre des Programmes d'Investissement d'Avenir ; Il s'agit du Labex MS2T (Maîtrise des Systèmes de Systèmes Technologiques) ainsi que l'Equipex Robotex (equipex-robotex.fr), le volet « Mobilité et Transport » constitue un élément important dans ces deux programmes d'envergure internationale. Cette thèse est en lien étroit avec l'axe 1 (Interaction et coopération entre systèmes) du LabEx MS2T. En plus, des validations expérimentales sont prévues sur les véhicules robotisés de la plateforme Robotex à l'Heudiasyc.

Les SMVs occupent la communauté scientifique depuis quelques décennies déjà [Adouane 16, Chapitre 6]. Ces dernières années, le monde du VA, s'est davantage emparé de cette thématique qui a un potentiel scientifique et applicatif très important. Plusieurs challenges / projets ont été lancés dans le cadre notamment du FP7 et de H2020, comme le projet [SARTRE](#) (SAfe Road TRains for the Environment), où Volvo a fait circuler cinq véhicules en convoi sur une distance de 200 kilomètres en Espagne. La particularité du convoi réalisé, est qu'il n'y avait qu'un seul conducteur. Les autres voitures étaient pilotées automatiquement. L'autre projet, qui a occupé également énormément la communauté scientifique, correspond au projet [GCDC](#) (Grand Cooperative Driving Challenge). Cet intérêt croissant des industriels et de la communauté scientifique pour ces SMV vient en premier lieu de la capacité de ces systèmes à être plus sûrs car les véhicules partagent leurs connaissances de l'environnement (voire de leur état) et agissent collectivement en conséquence [Vilca 15]. Parmi les fonctionnalités importantes des SMV on peut noter le fait de pouvoir coordonner les mouvements des VAs pour réaliser une navigation en convoi, celle-ci induit plusieurs avantages, dont : la réduction de la congestion routière (car les espaces entre les VAs pourraient être réduits même à grande vitesse) ; la réduction de la pollution (car chaque véhicule suiveur profite de l'aspiration du véhicule de devant (à l'image des cyclistes) pour réduire sa consommation de carburant/électrique) ; etc.

D'un point de vue scientifique cette thèse vise à développer une architecture de contrôle/commande pour les SMVs permettant d'avoir une cohérence de conception entre les fonctionnalités haut-niveau (prise de décision coopérative sous incertitude) et bas-niveau (contrôle robuste de la dynamique des VAs), avec une approche alliant des techniques de l'intelligence artificielle (IA) et des méthodes analytiques (issues du domaine de l'automatique non-linéaire). Il est important de noter que la littérature existante dans le domaine des VAs adresse ces deux aspects (le haut et le bas niveau) d'une manière complètement décorrélée, ce qui réduit considérablement la fiabilité et la robustesse des architectures de contrôle/commande obtenues,

<sup>1</sup> <https://www.hds.utc.fr/recherche/plateformes-technologiques/vehicules-intelligents-autonomes.html>

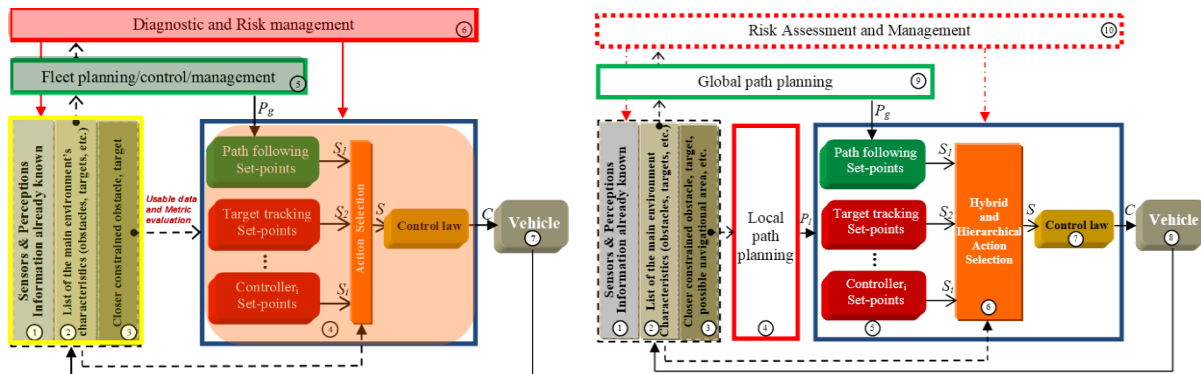


Figure 1. Exemple d'architectures multi-contrôleurs [Aduane, 16, 17] (embarquée sur chaque VI) qui peuvent servir de base de travail pour réaliser une coordination sûre et flexible de SMV.

et par la même occasion dégrade leur niveau de sûreté et d'efficacité énergétique des SMVs étudiés. Le focus de cette thèse consiste à établir d'une manière formelle le lien existant entre les décisions individuelles et collectives prises par les VAs (e.g., suivre le véhicule de devant, adapter les vitesses du SMV d'une manière souple afin de garantir une consommation énergétique minimale) et la dynamique d'évolution des VAs, dans le but de contrôler ces SMVs de la manière la plus **sûre** (tenant compte des incertitudes perceptives et de modélisation caractérisant la navigation des SMVs) et **économique énergétiquement** (tirant profit au maximum de la possibilité de coordonner-synchroniser d'une manière optimale les mouvements du SMV). Les principaux points scientifiques caractérisant l'architecture de contrôle/commande visée sont résumés dans ce qui suit.

a) **Volet haut niveau -- Prise de décision coopérative robuste** (sous incertitude) : Dans la littérature, de nombreuses méthodes ont été utilisées comme outils de prise de décision pour les VAs. Inspiré par les réseaux Bayésiens pour le changement de voie développés dans [Iberraken 18], il est prévu dans cette thèse de développer un réseau Bayésien de prise de décisions à plusieurs niveaux, basé sur une structure MBDMN (Multi-level Bayesian Decision Making Network) pour l'appliquer à une navigation collaborative de SMV dans des situations complexes. L'objectif est d'aboutir à un processus décisionnel robuste et fiable même en présence d'incertitudes élevées (e.g., manque d'informations sur une partie de l'environnement qui peut être obstrué par un camion par exemple). La navigation et la coordination d'un SMV sont des tâches complexes et nécessitent une conception et une gestion très précises de l'interaction entre les véhicules [Vilca 15] [Aduane 16, Chapitre 6]. Les principaux défis scientifiques liés à cette partie de la thèse concernent la coordination coopérative de véhicules autonomes dans des environnements / situations complexes (principalement en termes d'évaluation des risques et de la prise de décision coopérative). Plus précisément, il est prévu d'étendre les architectures multi-contrôleurs (AMC) proposées [Aduane 16] [Vilca 15] afin de les rendre plus robustes à la grande diversité des conditions de conduite, des événements et des situations qui pourraient être rencontrés (prévisibles ou non prévisibles) par les VAs dans leur environnement. Pour ce faire, les potentialités du AMC [Aduane 16, 17] (cf. Figure 1) seront étendues afin d'avoir la capacité de gérer explicitement le risque de navigation coopérative dans des environnements incertains et dynamiques. En termes de gestion des risques, le principal moyen de faire face à des situations très risquées, consiste à adapter la vitesse / accélération maximale autorisée du véhicule, et cela en tenant compte des autres véhicules [Philippe 19] ainsi que des capacités effectives du contrôle bas niveau du véhicule afin de suivre au mieux les consignes imposées par le haut niveau (d'où l'intérêt important de maîtriser ce lien étroit existant entre le haut et le bas niveau, cf. volet 2). Par ailleurs, afin de satisfaire aux critères d'optimisation énergétique (en lien étroit avec la dynamique du véhicule et du contrôle bas niveau), le principal levier à considérer correspond à la planification des profils de vitesse des VAs, afin qu'ils puissent tenir compte des incertitudes liées à l'état du SMV [Dahmane 18].

b) **Volet bas niveau -- Contrôle et planification réactive robuste des VAs pour un suivi sûr des consignes imposées par le haut niveau** : Malgré le développement indéniable des technologies d'automatisation "bas niveau", il reste encore de nombreux verrous à lever pour atteindre un contrôle capable d'imiter l'intelligence humaine face à des situations de conduite complexes. Notamment, certains systèmes avancés d'aide à la conduite, qui incluent l'automatisation du volant pour le contrôle latéral du véhicule (e.g., "lane keeping", "lane centering", etc.) ou des pédales pour le contrôle

longitudinal (e.g., “Cruise Control”, “Active Cruise Control”, etc.) sur les autoroutes, ont été développés et commercialisés. Mais en ajoutant la prise de décision collaborative en présence d’incertitudes (volet haut-niveau), la complexité est beaucoup plus élevée. L’objectif est de naviguer sur route, en évitant les collisions avec les autres occupants de la route, dans des situations fortement dynamiques, et en présence d’incertitudes (e.g., incertitudes des perceptions et des intentions des d’autres véhicules). Habituellement, la prise de décision se fait à l’étape de la planification de la trajectoire et de la manœuvre. Cette étape consiste à décider la trajectoire à suivre pour un certain horizon de temps, en fonction de la situation dynamique de l’environnement. A ce niveau, la dynamique du véhicule n’est généralement pas finement prise en compte, elle est souvent négligée ou limitée à certaines contraintes. Ce fait réduit le spectre des manœuvres sûres possibles qui peuvent être exécutées par le véhicule. En plus, les trajectoires calculées ne tiennent que faiblement compte des critères énergétiques liées à la navigation des VAs. D’autre part, les incertitudes (perception, autres intentions, ...) dans l’environnement, et la façon de les prendre en compte, constituent l’étape clé de la prise de décision, qui sera un compromis entre sécurité et non-restrictivité des capacités dynamiques du véhicule. Sur ce plan énergétique, la consommation d’un véhicule électrique dépend fortement des manœuvres locales et des profils de vitesse (accélération/décélération) exécutés par le véhicule. Mais le mouvement d’un véhicule est contraint par son environnement dynamique, surtout par les intentions des autres véhicules, et n’a pas une marge de manœuvre importante pour suivre des profils économes. Par contre, en considérant le véhicule autonome dans un contexte multi-véhicules, des stratégies de prise de décisions collectives peuvent être envisageables à ce niveau pour économiser la consommation d’énergie (lien avec volet haut niveau). En outre, parmi les éléments importants caractérisant le bas niveau correspond au fait de garantir le suivi des consignes imposées par le haut niveau (tenant compte de l’ensemble des informations disponibles sur le SMV), à cette fin il est envisagé de développer des techniques de commande adaptatives robustes aux erreurs de modèle des VAs, comme le mode glissant d’ordre supérieur, et, l’Immersion et l’Invariance (I&I) [Chebly 19]. Des métriques appropriées seront développées afin de caractériser les consommations énergétiques des VAs en fonction des trajectoires locales prises. Une méthode réactive sera utilisée pour le calcul des trajectoires locales, comme la méthode des tentacules (clothoïdes, polynomiales ou autre) [Mouhagir 19]. Un des challenges importants du sujet de thèse proposé consiste à faire une rétroaction temps réel, entre les prises de décisions haut niveau du véhicule (e.g., dépasser le véhicule de devant avec le minimum d’accélération pour économiser l’énergie) et les capacités dynamiques effectives du véhicule pour garantir son intégrité.

Pour conclure, cette thèse vise à traiter l’aspect décisionnel en présence d’incertitudes de perception et de modélisation, et en considérant explicitement la dynamique du véhicule afin d’améliorer la sécurité, la fluidité et la consommation énergétique des SMV autonomes. Une architecture de contrôle/commande sera alors développée, permettant d’avoir une cohérence entre le haut-niveau (prise de décision probabiliste) et le bas-niveau (contrôle et dynamique véhicule), avec une approche alliant des techniques de l’intelligence artificielle (IA : principalement réseaux de décision Bayésiens séquentiels avec rétroaction sur la dynamique effective du SMV) et des méthodes analytiques (issues du domaine de l’automatique non-linéaire).

### **Programme de travail avec les livrables et l’échéancier prévisionnel**

Le travail de thèse sera organisé selon les étapes suivantes :

- étude bibliographique de la dynamique des véhicules, de la planification des manœuvres et de la prise de décision pour les véhicules autonomes et SMV en présence d’incertitudes.
- définition des métriques/indicateurs pour réaliser les trajectoires les plus économes énergétiquement pour un VA donné.
- définition de certaines situations de conduite complexes et critiques à considérer.
- développement d’une nouvelle approche de prise de décision probabiliste haut niveau et de planification des manœuvres qui tiennent compte de la dynamique des véhicules et des incertitudes de perception et de modélisation des SMV.
- développement d’une architecture de commande qui contient une rétro-action liée au confort des passagers (il est à noter que réduire les accélérations latérales et longitudinales des VAs, mène de facto à améliorer la consommation énergétique des VAs). Des approches de commandes adaptatives et robustes seront utilisées comme le mode glissant, et, l’Immersion et l’Invariance (I&I).
- développement d’une architecture Système de Systèmes qui gère la coopération entre véhicules pour la prise de décision, dans l’objectif de réduire la consommation d’énergie des SMV étudiés.

- Validation des approches proposées via des simulations réalistes notamment en utilisant Scaner Studio (Oktal), et expérimentalement sur les véhicules robotisés Renault-Zoé disponibles à l'Heudiasyc.



### Intérêt de la collaboration

La collaboration entre le laboratoire Heudiasyc et le CRSI existe depuis de longues années à travers plusieurs projets de recherche. En plus, le projet international IRP "ADONIS" a commencé en 2020 entre l'UTC, le CNRS, l'UL et le CNRS Liban. La présente thèse vise à étendre les travaux antérieurs vers des aspects de contrôle et de prise de décision pour des systèmes multi-véhicules autonomes. Les compétences des deux équipes sont complémentaires : au CRSI, la communication inter-véhicules et les systèmes multi-agents (appliqués aux flottes de robots); à l'Heudiasyc, la dynamique véhicule, le contrôle et la planification de trajectoire pour véhicule autonome, la décision probabiliste, et la validation expérimentale sur des véhicules robotisés de la plateforme Robotex.

D'un point de vue collaboratif interne à l'Heudiasyc, Lounis Adouane qui vient d'être recruté (sept. 2019) en tant que PU à l'UTC va encadrer cette thèse avec Reine Talj (qui a soutenu récemment son HDR, avril 2019). Ce co-encadrement est très complémentaire dans le sens où L. Adouane amènera son expertise autour des techniques de décision probabiliste alors que R. Talj est plus spécialiste de la dynamique des véhicules.

Ces expertises conjuguées sont un bon gage du succès de cette cotutelle de thèse avec la possibilité de développer des approches transdisciplinaires innovantes à l'interface de deux domaines stratégiques pour le développement des véhicules autonomes.

### Bibliographie

[**Adouane 17**], L. Adouane, Reactive versus cognitive vehicle navigation based on optimal local and global PELC\*. Robotics and Autonomous Systems (RAS), DOI 10.1016/j.robot.2016.11.006, volume 88, pp. 51–70, February 2017.

[**Adouane 16**], L. Adouane, Autonomous Vehicle Navigation: From Behavioral to Hybrid Multi-Controller Architectures, Book, ISBN: 9781498715584, 228 pages, Taylor & Francis - CRC Press, April 2016.

[**Chebly 19**], A. Chebly, R. Talj et A. Charara, "Coupled longitudinal/lateral controllers for autonomous vehicles navigation, with experimental validation", Control Engineering Practice, Elsevier, Vol 88, pp. 79-96, July 2019.

[**Chebly 17**], A. Chebly, R. Talj, A. Charara, "Maneuver planning for autonomous vehicles, with clothoid tentacles for local trajectory planning", IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation ITSC 2017, Yokohama, Japon, 16-19 Octobre 2017.

[**Dahmane 18**], Y. Dahmane, R. Abdrakhmanov and L. Adouane, Stochastic MPC for Optimal Energy Management Strategy of Hybrid Vehicle performing ACC with Stop&Go maneuvers, 15th IFAC Symposium on Control in Transportation Systems (CTS 2018), Genova – Italy, 6-8 June 2018.

[**Iberraken 18**], D. Iberraken, L. Adouane, and D. Denis, "Multi-level Bayesian decision-making for safe and flexible autonomous navigation in highway environment", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'18), October 2018, Madrid-Spain.

[**Mouhagir 19**], H. Mouhagir, R. Talj, V. Cherfaoui, F. Aioun et F. Guillemard, "Evidential based approach for trajectory planning with tentacles, for autonomous vehicles", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, pp. 1-12, 2019.

[**Mouhagir 16**], H. Mouhagir, R. Talj, V. Cherfaoui, F. Guillemard, F. Aioun, "A Markov Decision Process-based approach for trajectory planning with clothoid tentacles", IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV) 2016, pp. 1254 - 1259, Göteborg, Sweden, Juin 2016.



**[Philippe 19]**, C. Philippe, L. Adouane, A. Tsourdos, H-S. Shin and B. Thuilot, Probability Collectives Algorithm applied to Decentralized Intersection Coordination for Autonomous Vehicles, 30th IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV'19), June 2019, Paris-France.

**[Tagne 16]**, G. Tagne, R. Talj, A. Charara, "Design and comparison of Robust Nonlinear Controllers for the Lateral Dynamics of Intelligent Vehicles", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol 17, Issue 3, pp. 796-809, 2016.

**[Termous 18]**, H. Termous, H. Shraim, R. Talj, C. Francis et A. Charara, "Coordinated Control Strategies for Active Steering, Differential braking and Active Suspension for Vehicle Stability, Handling and Safety Improvement", Vehicle System Dynamics, pp. 1-36, published online 19 September 2018.

**[Vilca 15]**, J.M Vilca., Safe and Flexible Hybrid Control Architecture for the Navigation in Formation of a Group of Vehicles, PhD Thesis, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, 26 October 2015.