

(Source : AdobeStock)

Navigation sûre et flexible des véhicules autonomes

Focus sur le volet contrôle/commande

Lounis ADOUANE ¹
et Kévin BELLINGARD ^{1,2}

¹ Université de technologie de Compiègne, CNRS, Heudiasyc, 60200 Compiègne, France

² Sherpa Engineering, Département R&D, 92000 Nanterre, France

Comment fonctionne la commande des véhicules autonomes ? Voici un aperçu des principales méthodes et des enjeux stratégiques qui occupent à la fois les communautés scientifique et industrielle.

Introduction

L'objectif principal des véhicules autonomes (VA) est d'améliorer la qualité de vie des personnes en rendant les déplacements plus rapides, plus confortables et moins consommateurs d'énergie - donc généralement moins polluants - tout en réduisant d'une manière drastique les accidents de la route ¹ [1]. Sur ce dernier point,

¹ Il est à noter que 93 % des accidents de la route sont dus à des erreurs humaine [20].

qui est une des motivations premières des VAs, il est admis qu'il faut en moyenne entre 0,5 à 1 seconde pour qu'une personne, en bonne condition physique, puisse percevoir et détecter le danger, pour commencer à réagir en conséquence [2]. C'est ce qui est appelé le « temps de réaction, Tr ». Tr peut augmenter considérablement jusqu'à 3 s, voire plus, en fonction, notamment, de l'état psychologique, de fatigue, de concentration et des capacités perceptives du conducteur, qui elles-mêmes dépendent entre autres des conditions météorologiques et de la luminosité de l'environnement. Dans le cas d'un VA,

au vu de l'automatisation de ces fonctions de perception et de contrôle, ces temps de réaction peuvent être divisés par dix (soit 100 ms), voire moins, ce qui peut aider à réduire considérablement le nombre d'accidents de la route. Par ailleurs, afin d'offrir un service de transport toujours plus flexible et fiable, la conception actuelle des villes du futur (*smart cities*), vise, notamment, à proposer des VAs communicants propres et partagés afin de réduire les embouteillages [3]. Pour une définition plus formelle de l'autonomie des voitures, une classification en 6 niveaux a été établie dès 2014 par la SAE (*Society of Automotive*

Engineers). Les niveaux sont définis, du plus bas, niveau 0 « Pas d'automatisation », au plus élevé, niveau 5 « Automatisation complète ».

De nos jours, les développements autour des VAs s'accroissent d'une manière fulgurante. On peut considérer que la dernière décennie de travaux intensifs (scientifiques, techniques et expérimentaux dans des villes réelles, etc.) a porté ses fruits et a permis d'atteindre la maturité technologique dans un certain nombre des fonctions nécessaires à l'automatisation. Plusieurs constructeurs automobiles comme Mercedes, GM, Ford, Renault, Daimler, Stellantis, Audi, Tesla ou BMW annoncent commercialiser à court ou moyen terme des VAs de niveau 3 (voire supérieur) mais avant d'atteindre cet objectif ambitieux, les résultats déjà présents doivent être consolidés et confirmés d'une manière plus systémique. D'autres défis majeurs sur les plans technique, scientifique, réglementaire et sociétal, doivent être également relevés afin de garantir l'acceptabilité de ces systèmes hautement technologiques. Les enjeux liés à leur maîtrise dépassent largement le cadre du transport intelligent. En effet, les avancées scientifiques et techniques liées à ces systèmes de conduite automatisée (ADS²) nous interrogent sur plusieurs sujets comme :

- la place et les répercussions de ces systèmes cyber physiques, dotés d'une intelligence artificielle embarquée, sur nos vies de tous les jours ;
- le niveau de fiabilité minimale que ces systèmes doivent atteindre pour les laisser partager d'une manière complètement naturelle et responsable nos environnements immédiats.

Plusieurs sujets d'actualité sont abordés dans cet article, en se focalisant sur les aspects scientifiques, englobant le triptyque « perception-décision-action » (figure 1), liés aux architectures de contrôle-com-

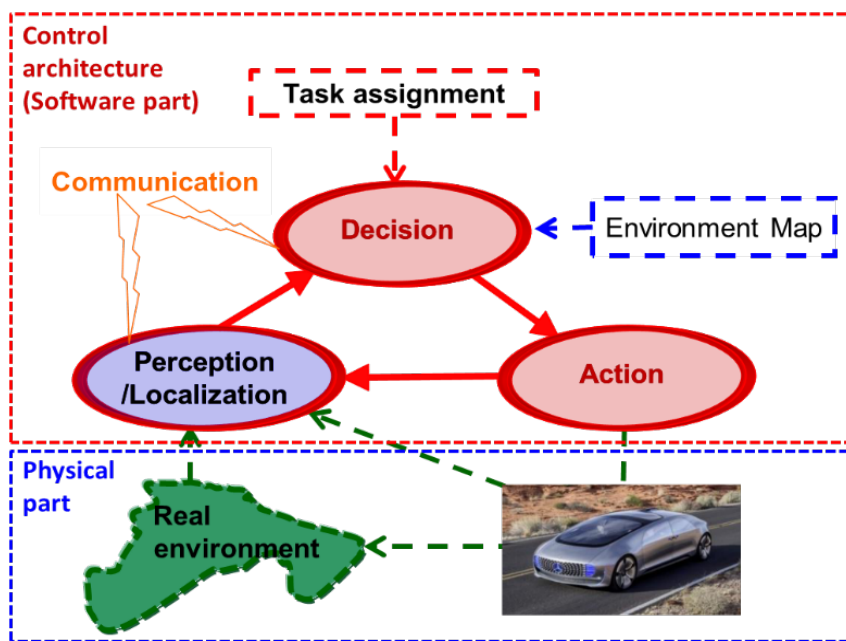


Figure 1 : Triptyque perception-décision-action et interaction entre la partie logicielle et matérielle des véhicules autonomes [4].

mande des VAs. Il met plus particulièrement l'accent sur les phases de décision-action, dont l'objectif est de garantir une navigation autonome sûre et flexible dans des environnements ou des situations qui peuvent être complexes.

Architectures de contrôle pour une Navigation autonome

Introduction et principales définitions

Tout d'abord, commençons par donner une brève définition des principaux termes qui seront fréquemment utilisés tout au long de cet article pour caractériser les comportements et les actions d'un VA :

- **Sûreté** : dans le contexte de cet article, ce terme indique le fait d'assurer l'intégrité physique du VA et donc de ses passagers et des usagers de la route l'entourant, tout en évitant les collisions.

- **Fiabilité** : la capacité du VA à accomplir la tâche assignée même en présence de conditions non maîtrisées telles que l'incertitude due à la perception ou aux conditions de réalisation de la tâche

- **Flexibilité** : la capacité du VA à réaliser la tâche assignée par exemple, éviter un obstacle, franchir une intersection de plusieurs manières. Le VA peut, par exemple, choisir un autre chemin pour atteindre la position finale assignée.

Une navigation complètement autonome (de niveau 5), pour aller d'un point A à un point B quelconque, ne pourra être obtenue que si l'architecture globale de contrôle utilisée qui regroupe les 3 phases complémentaires et cycliques perception-décision-action (figure 1) peut garantir la sûreté et la fiabilité de la navigation tout en permettant de maintenir un haut niveau de flexibilité pour accomplir les différentes missions assignées.

Dans la phase de **perception**, à laquelle on adjoint bien souvent la fonction de localisation du véhicule par rapport à son environnement, l'ADS doit notamment analyser cet environnement et en construire le modèle le plus explicite et permettre une localisation locale et globale du VA (par exemple, respectivement par rapport aux obstacles dynamiques locaux et à l'environnement statique) ; la **décision** utilise les sorties du bloc de perception jumelées à des techniques d'inférence

2 Automated Driving Systems

●●● déterministes ou stochastiques pour générer les consignes les plus appropriées pour accomplir la tâche assignée ; et, enfin, l'**action** transforme ces consignes en commandes (via des lois de commande appropriées) pour les appliquer aux actionneurs du VA. Par ailleurs, pour réaliser une navigation complètement autonome, le VA doit avoir également la capacité de réagir en temps-réel face à une multitude d'environnements, par exemple, environnements encombrés ou non, dynamiques ou non, incertains ou non et de s'adapter en toute sécurité à des événements imprévisibles. De plus, il ne suffit pas de garantir uniquement la fiabilité et la sûreté de la navigation ; le VA doit également assurer, une navigation fluide pour le confort des passagers. Pour satisfaire cette multitude de critères, il est important de disposer d'une architecture de contrôle fiable, sûre et flexible [4]. Plusieurs stratégies de navigation utilisant des architectures de contrôle dédiées ont été proposées dans la littérature. Elles permettent une navigation autonome même dans des environnements dynamiques et encombrés.

Alors que certains laboratoires et entreprises innovantes (comme Google) développent l'ensemble du système de navigation du VA, avec une refonte globale de toutes ses fonctions, les constructeurs automobiles historiques, procèdent généralement par des développements incrémentaux en utilisant des systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS³). Plusieurs ADAS sophistiqués et fiables ont déjà pénétré le marché des nouvelles voitures tels que « l'assistance au maintien dans la voie » ou le « système d'évitement de collision ». Cette approche incrémentale ascendante se rapproche d'une certaine manière de ce qui est dénommé Architectures Multi-Contrôleurs (AMC) [4], [5], [6] (figure 2), elles-mêmes inspirées des architectures dites comportementales [7]. Les AMC visent à rendre la navigation complètement autonome dans des environnements et des situations qui peuvent être

3 Advanced Driver Assistance Systems

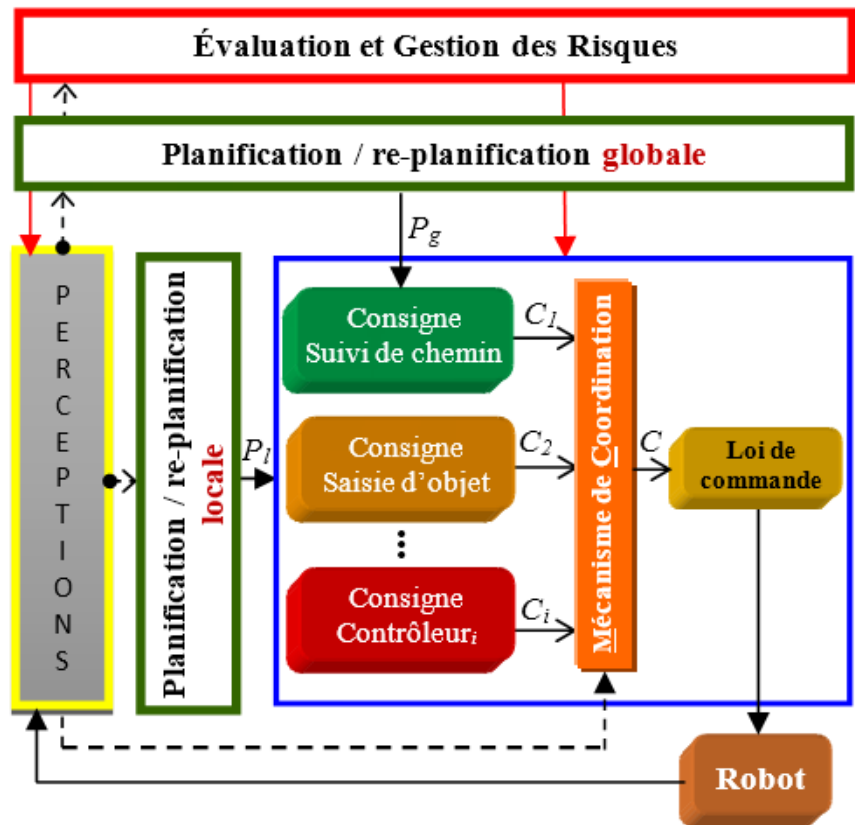


Figure 2 : Exemple d'Architecture Multi-Contrôleurs [4] [5].

complexes et incertains. Par ailleurs, pour atteindre l'aspect multi-objectifs de la navigation (par exemple, gérer les interactions avec les autres usagers de la route) les AMC s'appuient en plus sur une forme de standardisation ou d'homogénéisation de leurs principaux composants qui ont trait aux volets décision-action. Il sera utilisé dans ce qui suit l'architecture donnée sur la figure 2, pour illustrer, d'une manière succincte, les principaux blocs caractérisant une grande partie des architectures de contrôle-commande proposées dans la littérature, et cela en se focalisant davantage, comme cela a été dit précédemment, sur les volets décision-action.

Perceptions

Ce bloc est chargé de détecter, localiser et caractériser le plus précisément possible et en temps-réel l'environnement statique : routes, signalétique, mobilier urbain, comme l'environnement dynamique : piétons et autres véhicules. Ces informations sont obtenues grâce à des capteurs embar-

qués sur le véhicule comme des caméras, des radars, des Lidars et des récepteurs GNSS⁴, ou disposés sur l'Infrastructure. La localisation, quant à elle, consiste à situer le VA localement ou d'une manière globale dans son environnement et cela avec la meilleure précision/intégrité⁵ possible.

Décision-action

Pour qu'un VA puisse réaliser une manœuvre élémentaire (par exemple, un dépassement sur autoroute ou le maintien d'une distance de sécurité par rapport au véhicule qui le précède), le VA doit suivre, généralement, ces deux étapes :

- Définir des consignes appropriées et en temps réel comme accélérer, ralentir, s'arrêter d'urgence, ou bien tourner qui prennent

4 Global Navigation Satellite System : Système de Navigation par Satellite

5 Plus d'informations sur l'intégrité sur <https://www.hds.utc.fr/parteneriats/laboratoire-commun-sivalab.html>

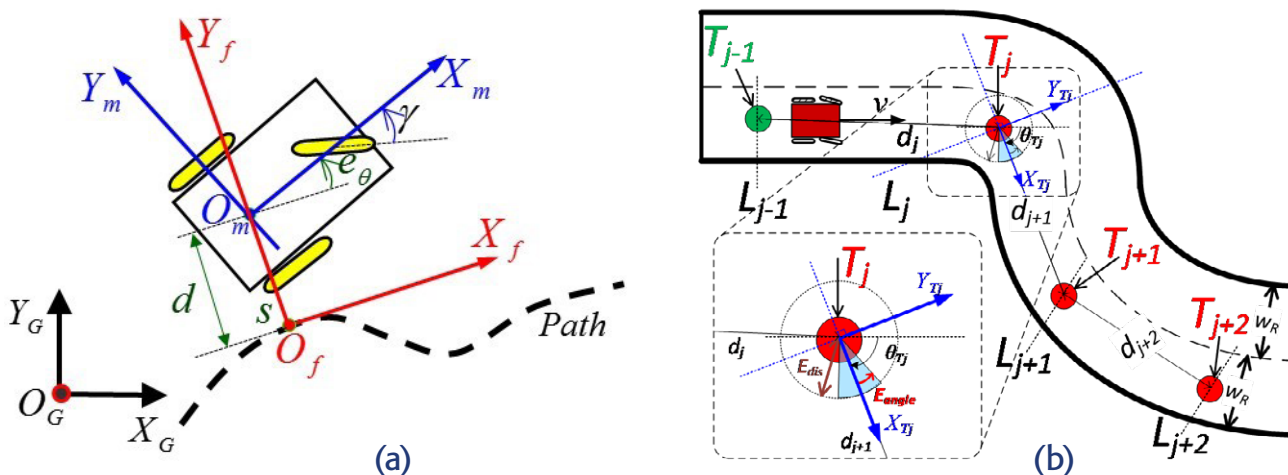


Figure 3 : Quelques méthodes de navigation utilisées dans la littérature. (a) Suivi de trajectoire basé sur un repère de Frenet (en rouge sur la figure). (b) Navigation basée sur des points de passages [9].

en compte l'état actuel et éventuellement prédit du véhicule et de son environnement immédiat, ainsi que la manœuvre courante à réaliser. Ces consignes peuvent être obtenues pour des instants précis, ou sur un horizon de temps plus au moins long (planification court, moyen ou long termes).

- Une fois les consignes obtenues, une loi de commande appropriée doit être appliquée pour actionner le VA et lui permettre d'atteindre les consignes assignées. Il est nécessaire dans cette étape de tenir compte des capacités et des contraintes matérielles du VA, comme le temps de réponse de ses actionneurs. Plusieurs lois de commande dédiées au suivi de trajectoire ont été proposées dans la littérature comme dans [8]. Elles utilisent pour une grande partie d'entre-elles un repère de Frenet, lié à la trajectoire à suivre comme référence de contrôle (figure 3a). D'autres publications proposent d'utiliser uniquement des points de passages éparés positionnés d'une manière appropriée dans l'environnement [9] (figure 3b). Ce type de navigation permet de rendre la navigation encore plus flexible tout en maintenant un très haut niveau de sûreté des manœuvres produites.

Les deux étapes citées ci-haut sont importantes pour atteindre en toute sécurité et de

manière stable les objectifs de navigation assignés au VA. Il est à noter que dans le cas d'un contrôle du VA qui ne s'appuierait pas sur les deux étapes citées ci-dessus, c'est-à-dire sur une modélisation formelle du système et de la tâche à réaliser, le contrôle sera nommé « *end-to-end* » et il s'appuiera principalement sur des techniques d'IA, qui à partir d'un stimulus spécifique, état de l'entrée du système, assigne une sortie de commande, généralement en utilisant des techniques d'apprentissage supervisé. Cet apprentissage peut utiliser, par exemple, des techniques d'apprentissage profond « *deep learning* » avec des milliers, voire des millions, d'exemples de situations rencontrées, et de ce qui doit être fait par le VA en conséquence. Ces techniques prennent de plus en plus d'ampleur pour le contrôle des VAs, mais le manque de preuves formelles pour démontrer la fiabilité/stabilité du contrôle produit reste le principal verrou à lever dans les années à venir [10].

Planification des trajectoires

La planification-replanification des chemins/trajectoires ⁶ est une des composantes essentielles pour faire naviguer un

⁶ Il est à noter que les termes trajectoire ou chemin sont utilisés selon, respectivement, si le temps est pris en compte ou non lors de la phase de planification.

VA. La littérature distingue deux types de navigations : la cognitive (ou délibérative) et la réactive [5]. La planification dite cognitive utilise généralement une grande quantité d'informations sur l'état de l'environnement statique ou dynamique et sur celui du véhicule pour définir les consignes à appliquer. Contrairement à cela, dans une planification dite réactive, le VA fonctionne sur le principe de stimuli-réponse (généralement qualifiée de bio-inspirée [7]) ; ce dernier type de planification fonctionne donc de manière quasi réflexive pour notamment faire face à une situation critique, où le VA doit réagir le plus rapidement possible à une situation dangereuse. La planification de trajectoire peut être menée avec un horizon de temps plus au moins variable en fonction des objectifs visés par la navigation et du temps de réaction que peut avoir le VA vis-à-vis des situations rencontrées. Ce temps dépend lui-même des éléments logiciels (par exemple : méthodes/techniques inhérentes au triptyque perception-décision-actions) et matériels embarqués sur le VA (figure 1).

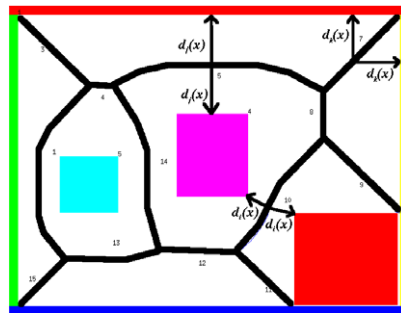
Une multitude de méthodes existent dans la littérature pour réaliser la planification de chemins/trajectoires (par exemple, les clothoïdes ou les équations polynomiales) [11], [12]. Parmi les autres méthodes de planification qui ont inspiré fortement la communauté scientifique/in-

●●● dustrielle travaillant sur les VAs, nous pouvons citer :

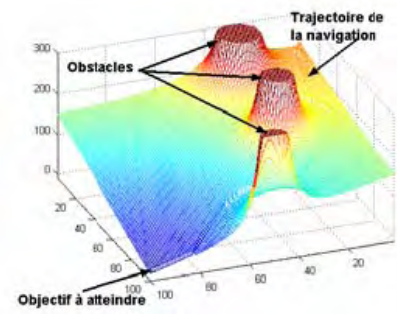
- **Diagramme de Voronoï** [13] (figure 4a) : ces diagrammes permettent au véhicule de naviguer à égale distance de tous les obstacles. Le chemin obtenu correspond donc au chemin le plus sûr, mais il n'intègre pas, d'emblée, ni les autres critères de navigation (comme le temps de parcours minimal) ni les contraintes structurelles du VA (telle que sa non-holonomie⁷). Des post-traitements doivent ainsi être faits pour définir le chemin final que doit suivre le VA.

- **Méthode des Champs de Potentiels Artificiels (CPA)** [14] (figure 4b). Les méthodes basées sur les CPA sont parmi les méthodes les plus répandues dans la littérature, et cela en raison principalement de leur utilisation intuitive et très efficace pour faire naviguer un VA. Le principe de base est de définir la cible à atteindre comme un champ de force attractif, et chaque obstacle par un champ de force répulsif. L'idée est, par la suite, de faire la somme de ces champs de forces pour trouver finalement le chemin final que doit suivre le VA, par une descente de gradient minimale, qui part de la position initiale du VA à sa destination finale. Un des défauts majeurs de cette technique est qu'elle peut générer des chemins oscillants, voire des minima locaux.

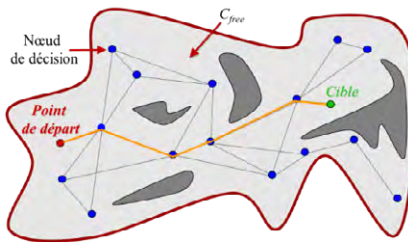
- **Probabilistic Road Maps (PRMs)** (figure 4c), [15] et la **méthode d'Exploration rapide d'arbres de décision** ou RRT⁸ (figure 4d), [16]. Ces deux méthodes sont qualifiées de stochastiques, contrairement aux deux premières méthodes qui sont qualifiées de déterministes. Le PRM et le RRT ne sélectionnent pas le chemin à suivre en s'appuyant sur la géométrie de l'environnement et des obstacles, mais par une exploration aléatoire de l'espace



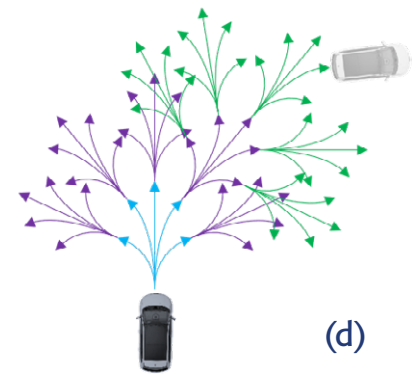
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 4 : Représentation de quelques méthodes de planification de trajectoires déterministes (4a et 4b) et stochastiques (4c et 4d).

des solutions possibles dans C_{free} l'espace libre (sans obstacles) de l'environnement, (figure 4c). Dans les procédés stochastiques cités, il est possible de faire face à des environnements dynamiques denses et incertains, en replanifiant régulièrement la trajectoire du VA. Ces techniques ont largement contribué, et contribuent toujours d'une manière importante au développement des fonctions de planification robuste des VAs.

Évaluation et gestion des risques

Les progrès et développements récents des VAs ont mis en exergue toute l'importance d'assurer la sûreté sans faille des manœuvres réalisées par ces véhicules, et cela même dans des environnements hautement dynamiques et incertains. Bien que les véhicules équipés d'ADS offrent un potentiel d'amélioration indéniable de la sécurité de conduite par rapport aux conducteurs humains, ce transport comportera toujours un certain niveau de risque à prendre en considération. En effet, tout comme un conducteur humain, l'ADS doit

être constamment en train d'évaluer son risque de navigation en fonction des situations de trafic rencontrées (par exemple : vitesse et proximité des autres véhicules), ainsi que des conditions de navigation (par exemple : état d'adhérence de la chaussée ou de visibilité liée aux conditions météorologiques). Ce risque est bien évidemment minimisé tout au long du parcours du VA. Le bloc lié à la « prise de décision » des actions que doit réaliser un VA pour, par exemple, activer l'évitement d'obstacle ou décider de réduire sa vitesse, voire se rabattre sur la voie d'arrêt d'urgence [6] doit être conçue avec une stratégie d'adaptation et d'anticipation appropriée aux conditions de dynamique et d'incertitude de l'environnement de navigation. Les approches proposées dans la littérature sont diverses et variées et chacune d'elles présente des avantages et inconvénients. Certaines voient la prise de décision sous forme procédurale et utilisent des modélisations à base d'automates à états discrets. On retrouve également des méthodes à base de systèmes experts. D'autres travaux introduisent des algorithmes plus évolués,

⁷ C'est-à-dire, l'impossibilité du véhicule de se déplacer instantanément dans toutes les directions de son espace d'état (en X, en Y et par rapport à son cap θ).

⁸ Rapidly exploring Random Tree

“ Bien que les véhicules équipés d’ADS offrent un potentiel d’amélioration indéniable de la sécurité de conduite par rapport aux conducteurs humains, ce transport comportera toujours un certain niveau de risque à prendre en considération.”

inspirés des méthodes d’optimisation. De plus, il existe des travaux utilisant des méthodes probabilistes [6], ensemblistes [17], ou d’autres basées sur de l’apprentissage profond [10].

Standardisation des fonctionnalités de sûreté des ADS

Un des principaux objectifs des industriels travaillant sur les VAs est de créer un ADS qui dépasse largement les capacités de sûreté de conduite d’un humain. Le respect de cet objectif est primordial pour l’acceptabilité à long terme de ces systèmes, et ainsi les voir se démocratiser de plus en plus à travers le monde. En mars 2018, après le premier accident mortel impliquant un VA, spécifiquement celui d’Uber, qui est entré en collision avec un piéton qui marchait à côté de son vélo et qui traversait la route dans l’obscurité et à un endroit non autorisé, il a été conclu après investigations poussées par le régulateur américain des transports NTSB⁹ que la technologie d’Uber « ne prenait pas assez en compte l’éventualité de piétons traversant hors des endroits dédiés ». Bien évidemment, depuis cet accident malheureux, des développements colossaux sur la sûreté des VAs ont été réalisés par les différents acteurs technologiques, travaillant autour des ADS. Néanmoins, au-delà de cet accident qui a eu une résonance internationale, les industriels ont été saisis par l’urgence de proposer des ADS à la fiabilité éprouvée, au risque de voir l’opinion publique et les gouvernements, et par la suite les inves-

tisseurs, se désengager et se détourner d’une manière pérenne de ces technologies avant-gardistes. Ainsi, depuis 2018, plusieurs consortiums, regroupant des industriels de premier plan ont vu le jour sur cette problématique importante, comme par exemple celui très explicite, intitulé SaFAD¹⁰ regroupant Aptiv, Audi, Baidu, BMW, Continental, Daimler, FCA US LLC, HERE, Infineon, Intel, et Volkswagen [18]; ou celui regroupant SAE (*Society of Automotive Engineers*) International avec Ford, General Motors (GM), Toyota et Uber, qui ont lancé le consortium pour la sécurité des véhicules automatisés AVCS¹¹. Les membres de ce dernier consortium travaillent « à l’élaboration d’une série de principes de sécurité pour les systèmes de conduite automatisés SAE de niveaux 4 et 5 axés sur les tests avant et pendant le fonctionnement des véhicules utilitaires sur la voie publique, la collecte, la protection et le partage des données ainsi que sur les interactions entre les VAs et les autres usagers de la route ».

L’idée des différents groupes, à travers le monde, travaillant sur ces normes est la définition d’un ensemble minimum de mesures raisonnables, d’hypothèses et de scénarios prévisibles qui doivent être pris en compte lors de l’élaboration des modèles de sûreté qui font partie d’un ADS. En effet, les industries comme les autorités ont besoin d’une norme ouverte, transparente et technologiquement neutre afin de fournir des indications pertinentes et fiables pour

¹⁰ *Safety First for Automated Driving*

¹¹ *Automated Vehicle Safety Consortium* ; <https://avsc.sae-itc.org/#about>, consulté en juillet 2022

Les auteurs

Lounis Adouane est Professeur



à l’Université de technologie de Compiègne (UTC), et réalise ses recherches au laboratoire Heudiasyc, UMR 7253 CNRS/

UTC. Il a reçu en 2005 son doctorat en Automatique de l’Université de Franche-Comté. En 2015, il obtient une HDR (Habilitation à Diriger Recherche) en Robotique de l’Université Clermont Auvergne. Ses principaux intérêts en recherche se focalisent sur le contrôle/commande des véhicules intelligents (autonomes et propres).

Kévin Bellingard en doctorat sous



contrat Cifre à l’Université de technologie de Compiègne (UTC), et réalise ses recherches au laboratoire Heudiasyc, UMR 7253 CNRS/

UTC et au sein de l’entreprise SHERPA Engineering (Nanterre), société experte en modélisation et contrôle/commande. Ses principaux intérêts en recherche se portent sur le contrôle/commande des véhicules intelligents, comprenant entre autres la prise de décision sous incertitudes dans des milieux urbains denses.

évaluer le niveau de performance d’un ADS. Cette orientation consiste à établir un ensemble minimal d’hypothèses de travail avec des limites sur les comportements raisonnablement prévisibles des autres usagers de la route afin de développer des modèles liés à la sûreté des VAs. L’objectif est de définir en commun ce que prendre des décisions pertinentes et équilibrées entre sûreté et caractère pratique/opérationnel signifie pour un VA [19]. Le modèle s’appliquera à la planification et aux fonctions décisionnelles d’un VA des niveaux 3 à 5. Le système doit être en mesure de faire face au mieux aux événements considérés comme raisonnables de la part des utilisateurs de la route (par exemple comportement des autres véhicules, et des piétons, ...). L’ADS établit des limites pour un comportement raisonnable et prévisible ●●●

⁹ *National Transportation Safety Board*

●●● des autres usagers de la route pour favoriser le développement opérationnel des VAs. Dans ce cadre, et sous la référence IEEE P2846, l'IEEE a commencé à travailler sur la définition d'un «modèle formel pour les considérations de sécurité des prises de décisions concernant les VAs» face à des scénarios et des cas de conduite spécifiques [19]. Le groupe de travail chargé de définir cette norme est dirigé par Intel.

Conclusion

Les dernières décennies ont vu les travaux sur les VAs prendre de plus en plus d'ampleur. L'engouement de la communauté internationale s'est accéléré de manière fulgurante après 2010, suite à l'annonce de Google de son programme d'ampleur sur ces VAs. De nos jours, nous pouvons constater les énormes

avancées scientifiques, conceptuelles et technologiques qui ont été réalisées, et cela en un temps relativement court eu égard à l'ambition importante visée par ces VAs. Bien évidemment, le chemin, pour arriver à un véhicule complètement autonome (de niveau 5), reste encore long, mais un pas important est franchi avec la commercialisation de véhicules de niveau 3. ■

Références

- [1] D. J. Fagnant et K. Kockelman, «Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations,» *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015.
- [2] X. Guo et Y. Zhang, «Maturity in Automated Driving on Public Roads: A Review of the Six-Year Autonomous Vehicle Tester Program,» *Transportation Research Record*, 2022.
- [3] Z. Zhu, L. Adouane et A. Quilliot, «Flexible multi-unmanned ground vehicles (MUGVs) in intersection coordination based on -constraint probability collectives algorithm,» *Journal of Intel. Robotics & Applications*, 2021.
- [4] L. Adouane, *Autonomous Vehicle Navigation: From Behavioral to Hybrid Multi-Controller Architectures*, Taylor & Francis - CRC Press, 2016.
- [5] L. Adouane, «Reactive versus cognitive vehicle navigation based on optimal local and global PELC*,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2017.
- [6] D. Iberraken et L. Adouane, «Safe Navigation and Evasive Maneuvers based on Probabilistic Multi-Controller Architecture,» *IEEE Transactions on ITS*, 2022.
- [7] R. C. Arkin, *Behavior-Based Robotics*, The MIT Press, 1998.
- [8] C. Samson, «Control of chained systems. application to path following and point stabilization of mobile robots,» *IEEE Trans. Autom. Control*, 1995.
- [9] J. Vilca, L. Adouane et Y. Mezouar, «A novel safe and flexible control strategy based on target reaching for the navigation of urban vehicles,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2015.
- [10] D. Omeiza, H. Webb, M. Jirotko et L. Kunze, «Explanations in Autonomous Driving: A Survey,» chez *IEEE Trans. on ITS*, 2022.
- [11] J. Minguez, F. Lamiroux et J. P. Laumond, *Handbook of Robotics*, Chapter: Motion Planning and Obstacle Avoidance, Springer, 2008.
- [12] S. Gim, L. Adouane, S. Lee et J. P. Derutin, «Clothoids Composition Method for Smooth Path Generation of Car-like Vehicle Navigation,» *Intelligent & Robotic Systems*, 2017.
- [13] F. Aurenhammer, «Voronoi diagrams—a survey of a fundamental geometric data structure,» chez *ACM Comput. Surv.*, 1991.
- [14] O. Khatib, «Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots,» *Int. J. Robot. Res.*, 1986.
- [15] L. E. Kavraki et L. E., «Probabilistic roadmaps for path planning in highdimensional configuration spaces,» *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, 1996.
- [16] S. M. Lavalle, «Rapidly-exploring random trees: A new tool for path planning,» chez *Tech. rep.*, Iowa State University, 1998.
- [17] N. M. Ben Lakhel, L. Adouane, O. Nasri et J. Ben Hadj Slama, «Safe and Adaptive Autonomous Navigation under Uncertainty based on Sequential Waypoints and Reachability Analysis,» *Robotics and Autonomous Systems*, 2022.
- [18] «Safety,» 2019. [En ligne]. Available: <https://www.apiv.com/docs/default-source/white-papers/safety-first-for-automated-driving-apiv-white-paper.pdf>. [Accès le 25 Juillet 2022].
- [19] «Standard for Assumptions in Safety-Related Models for Automated Driving Systems,» chez *IEEE Std 2846-2022*, April 2022.
- [20] G. Yeomans, «Autonomous Vehicles: Handing over Control: Risks and Opportunities in Insurance,» chez *Lloyd's exposure manag. edition*, 2010.

Résumé

Les véhicules autonomes (VAs) sont en plein développement depuis plus de deux décennies. Voir des véhicules autonomes naviguer en toute fluidité et sécurité autour de nous sera une réalité dans un avenir proche. Cela n'exclut pas bien évidemment qu'il y ait encore beaucoup de verrous, notamment scientifiques, techniques et législatifs à lever. L'objectif de cet article est de donner, en premier lieu, un aperçu des principaux composants constituant une architecture de contrôle/commande pour un VA. Puis il décrit les principales méthodes/techniques et enjeux stratégiques, liés aux volets planification de trajectoire/prise de décision sous incertitude et commande des VAs. ■

Abstract

Autonomous vehicles (AVs) have been in full development for more than two decades. Seeing autonomous vehicles navigating smoothly and safely around us will be a reality in the near future. This obviously does not exclude that there are still many challenges, in particular scientific, technical and legislative, to be lifted. The objective of this article is to give, first, an overview of the main components constituting a control/command architecture for an AV. Subsequently, this article will focus on the main methods/techniques and strategic issues, related to the trajectory planning/decision-making under uncertainty and AV's control aspects. ■