



HAL
open science

LES VEHICULES AUTONOMES ET LE RISQUE TECHNOLOGIQUE : D'OU VIENT-ON ET OU VA-T-ON ?

Rodolfo Orjuela, Jonathan Ledy, Jean-Philippe Lauffenburger, Michel Basset

► **To cite this version:**

Rodolfo Orjuela, Jonathan Ledy, Jean-Philippe Lauffenburger, Michel Basset. LES VEHICULES AUTONOMES ET LE RISQUE TECHNOLOGIQUE : D'OU VIENT-ON ET OU VA-T-ON ? . Riseo : risques études et observations, 2018, 2018-1 Les véhicules autonomes, 1. hal-01816895

HAL Id: hal-01816895

<https://hal.science/hal-01816895>

Submitted on 15 Jun 2018

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

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

LES VEHICULES AUTONOMES ET LE RISQUE

TECHNOLOGIQUE :

D'OU VIENT-ON ET OU VA-T-ON ?

Rodolfo ORJUELA*, Jonathan LEDY**,

Jean-Philippe LAUFFENBURGER***, Michel BASSET****

* Maître de conférences, IRIMAS EA 7499, Université de Haute-Alsace

** Ingénieur de recherche, IRIMAS EA 7499, Université de Haute-Alsace

*** Professeur des universités, IRIMAS EA 7499, Université de Haute-Alsace

**** Professeur des universités, IRIMAS EA 7499, Université de Haute-Alsace

prenom.nom@uha.fr

Résumé :

Cette contribution vise à apporter des éléments techniques et scientifiques en mesure d'enrichir les réflexions actuellement menées dans le cadre juridique à propos des risques technologiques introduits par le véhicule à délégation de conduite. Dans un premier temps, un court rappel de l'origine du véhicule autonome est réalisé. Dans un second temps, un exposé de l'évolution des systèmes d'aide à la conduite et de leur apport en matière de sécurité routière est donné. Enfin, après avoir introduit les cinq niveaux d'automatisation de la conduite, l'architecture hiérarchisée de commande d'un véhicule totalement autonome est présentée. Cette description s'accompagne d'une discussion sur les risques technologiques potentiels associés et sur les moyens scientifiques et techniques mis en œuvre afin de les encadrer.

Abstract:

This paper aims to provide some technical and scientific elements to enrich the current thinking in the legal framework about the technological risks introduced by the autonomous vehicle. As a first step, a brief review of autonomous vehicle origins is provided. In a second step, a presentation of the evolution of driving assistance systems and their contribution to road safety is given. Finally, after having introduced the 5 levels of automation, the hierarchical control architecture of a fully autonomous vehicle is presented. In parallel to this description, a discussion of the associated potential technological risks and the scientific and technical means implemented to reduce them is proposed.

I. Introduction

L'utilisation massive du véhicule terrestre comme moyen de transport de personnes et de biens présente un impact non négligeable sur l'environnement¹ (pollution, rejet de CO₂, etc.), sur la sécurité² (accidents de la circulation, etc.) et sur l'exploitation de l'infrastructure routière (saturation du réseau, interdiction partielle de circulation dans certaines villes, etc.). En dépit des énormes efforts en permanence réalisés pour réduire ces impacts, il s'avère nécessaire de repenser les systèmes de transport en général et les moyens de locomotion individuels en particulier afin d'assurer leur pérennité pour les générations à venir. Dans ce contexte et avec le développement accéléré des nouvelles technologies numériques, l'apparition récente du véhicule à délégation de conduite (partielle ou totale) a ouvert d'intéressantes perspectives en matière de nouvelles modalités de transport.

Avant de se pencher sur le véhicule à délégation de conduite et à ses potentiels bénéfiques en matière de sécurité routière et de mobilité, il semble pertinent de rappeler les motivations à l'origine de son développement, notamment du point de vue de la sécurité. En effet, depuis le premier accident de la route mortel causé par une automobile survenu à Londres le 17 août 1896, la sécurité routière est devenue un enjeu politique, économique et sociétal majeur³. Son amélioration représente un souci permanent pour les pouvoirs publics et les constructeurs automobiles. Une diminution importante des accidents peut être envisagée par une action conjointe sur un plan politique et légal (législation plus rigoureuse, etc.), pédagogique (campagnes de sensibilisation, etc.) et technologique (intégration de systèmes intelligents de sécurité et de conduite).

D'un point de vue technologique, de nombreuses avancées sur les véhicules mais aussi sur l'infrastructure routière, sont à l'origine d'une baisse régulière de la mortalité routière depuis la fin des années 70. Pour ce qui est du véhicule automobile, les systèmes de sécurité passifs (airbags, ceintures de sécurité, etc.) ont permis de réduire considérablement les blessures graves et les décès lors des accidents de la route. Cependant, ces systèmes ont pour seul objectif la protection des occupants lors d'un accident mais ne permettent pas d'éviter celui-

¹https://www.huffingtonpost.fr/2018/01/29/la-pollution-de-lair-tue-des-millions-de-personnes-dans-le-monde-chaque-annee_a_23342222/ (consulté en 2018).

²*Road safety evolution in EU, European Commission - Directorate General for Mobility and Transport, 2016.*

³ Les accidents de la route sont à l'origine de près de 26000 décès en 2013 dans l'Union Européenne. En France, les accidents de la route constituent la première cause de décès chez les adolescents.

ci. Dans cette perspective, des systèmes de sécurité actifs ont été développés par les constructeurs, en particulier grâce aux progrès importants réalisés dans les domaines de l'électronique et des systèmes embarqués⁴. Le but de ces systèmes automatiques est d'assister le conducteur dans son action de guidage du véhicule et/ou de prendre le contrôle de ce dernier lors d'une situation critique afin d'éviter un accident⁵. Citons, à titre d'exemple, l'ABS (*Anti-lock Braking System*) et l'ESP (*Electronic Stability Program*) disponibles depuis quelques années sur les véhicules européens. L'ABS, introduit en 1970 puis standardisé dans les années 1990 et enfin rendu obligatoire en 2004, a permis d'améliorer la manœuvrabilité des véhicules dans les situations de freinage d'urgence. Quant à l'ESP⁶, dont l'appellation générique recommandée par la Société des Ingénieurs de l'Automobile est ESC⁷ (*Electronic Stability Control*), il a permis d'améliorer la stabilité latérale du véhicule lors, par exemple, d'un dérapage lorsque la chaussée est mouillée. Aujourd'hui, ces systèmes de sécurité actifs font partie de l'équipement de base des véhicules commercialisés en Europe. Depuis le 1^{er} novembre 2014, l'ESC est devenu un équipement obligatoire en Europe pour les voitures neuves⁸. Selon la commission européenne⁹, l'utilisation de ces systèmes de sécurité actifs a incontestablement permis d'améliorer la sécurité routière. Pour aller encore plus loin en matière de sécurité, l'idée d'augmenter le niveau d'automatisation, d'« intelligence », des véhicules a paru une voie intéressante à explorer, d'où l'intérêt récemment porté au véhicule à délégation de conduite.

Le concept du véhicule à délégation de conduite, appelé également véhicule autonome, qui au départ n'était qu'un rêve, est devenu aujourd'hui une réalité. Les prémises du véhicule autonome remontent aux années 1925 quand un inventeur, Francis Houdina, a effectué la démonstration d'une automobile radiocommandée dans les rues de Manhattan sans aucun conducteur à bord¹⁰. Selon le *New York Times*, le véhicule radiocommandé pouvait démarrer son moteur, changer le rapport des vitesses : « comme si une main fantôme était au volant ». En France en mai 1959, dans le numéro 500 de *Science & Vie* intitulé « Science & Vie : l'an

⁴ Aucun calculateur n'était embarqué en 1919 pour la Citroën type A, l'électronique et l'informatique n'étant pas encore existantes. Aujourd'hui, on compte par exemple une trentaine de calculateurs pour la Citroën C4 Picasso alors que pour la Citroën 508 RXH, on en compte plus de 50.

⁵ JACQUES EHRLICH, « Technologies d'assistance à la conduite automobile » *Techniques de l'ingénieur*. Réf : SE3772 v1, 2009.

⁶ L'ESP est une marque déposée par Bosch. Ce dispositif a été proposé par Bosch dans les années 1990.

⁷ Certains constructeurs parlent d'ESP, aussi de VDC pour *Vehicle Dynamic Control*, VSA pour *Vehicle Stability Assist*, etc. Dans tous les cas, il s'agit d'un système de sécurité actif de contrôle de la trajectoire.

⁸ En Europe, les accords ECE-R13 et ECE-R13H ont rendu obligatoire les systèmes ESC pour les automobiles, les camions et les bus.

⁹ eSafety. *Making Europe's roads safer for everyone*. Rapport Technique, *European Commission*, 2006.

¹⁰ «[Science: Radio Auto](#)». *Times Magazine*. Numéro 10, 1925.

2000 », un concept de voiture est présenté. Il s'agit de la « *Fulgur, la voiture de rêve* » décrite dans les termes suivants : « Simca imagine la voiture de rêve européenne : elle sera propulsée par des piles à radicaux libres et elle serait entièrement dirigée par un cerveau électronique et des radars. Mais ce n'est encore qu'un rêve d'ingénieurs ». Ce rêve d'ingénieurs a été concrétisé en particulier grâce à l'initiative du département de la Défense des États-Unis. En effet, son agence pour les projets de recherche avancée de défense (*Defense Advanced Research Projects Agency*, DARPA), annonce en 2002 le grand challenge portant sur la construction d'un véhicule 100% autonome capable de parcourir 142 miles dans le désert de Mojave. La récompense pour le vainqueur s'élevait à un million de dollars. Deux éditions ont eu lieu, en 2004 et 2005, avec la participation de 23 véhicules pour la dernière édition. En 2007, le challenge est transformé et orienté vers les véhicules autonomes capables de se déplacer dans un environnement urbain¹¹ (*DARPA Urban Challenge*) avec toutes les difficultés que cela représente. Ce challenge ouvre la voie au véhicule autonome comme moyen de transport individuel et se concrétise par la mise en circulation en 2009 de la célèbre *google car*¹², développée non par un constructeur automobile mais par un géant de l'informatique.

L'apparition de la *google car* et ses premiers tests en conduite autonome sur route ouverte ont imposé une réflexion sérieuse sur le cadre légal et juridique nécessaire à la circulation de ce type de véhicule sur les routes. Un fait marquant survient en mars 2011 quand l'état de Californie aux États-Unis autorise, pour la première fois, l'immatriculation d'un véhicule autonome rendant ainsi possible son déplacement dans la ville dans des situations normales de conduite avec une intervention humaine limitée. En Europe, des travaux en matière de réglementation sont également initiés. En France, l'évolution du cadre juridique et légal lié aux véhicules autonomes n'en est qu'à ses débuts. En effet, une première phase d'autorisation de principe proposée en 2016¹³ permet l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques. Récemment, le 28 mars 2018, le gouvernement a publié un décret¹⁴ encadrant les expérimentations de véhicules à conduite déléguée en proposant une avancée importante : le superviseur humain de la conduite pourra se trouver à l'extérieur du véhicule mais devra garder avec celui-ci un contact visuel direct. Ce décret autorise la

¹¹ <http://archive.darpa.mil/grandchallenge/index.html> (consulté en 2018).

¹² <https://waymo.com/journey/> (consulté en 2018).

¹³ Ordonnance n° 2016-1057 du 3 août 2016 relative à l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques.

¹⁴ Décret n° 2018-211 du 28 mars 2018 relatif à l'expérimentation de véhicules à délégation de conduite sur les voies publiques. JORF n° 0075 du 30 mars 2018.

<https://www.legifrance.gouv.fr/eli/decret/2018/3/28/TRER1717809D/jo/texte>

circulation expérimentale des véhicules autonomes et vise aussi à encadrer les conditions d'obtention des autorisations et les modalités d'expérimentation¹⁵. Ces évolutions du cadre juridique sont indispensables afin de favoriser l'expérimentation de façon à évaluer les apports de cette technologie en conditions réelles de conduite. Les résultats des expérimentations de la *google car* sont prometteurs. En 2017, la *google car* compte plus de 2.7 millions de kilomètres parcourus dont 1.6 millions en mode 100% autonome, avec un total de 11 accidents sans aucun blessé ni décès¹⁶.

L'apparition de la *google car* a aussi imposé une remise en question sur un plan technique et scientifique de la part des principaux constructeurs automobiles. Depuis qu'ils ont pris part à la course au développement du véhicule à délégation de conduite, se succèdent des annonces plus au moins optimistes quant au déploiement de cette nouvelle technologie¹⁷. Certains constructeurs ont commencé à commercialiser, pour leurs modèles très haute gamme, des systèmes d'autopilote (*Autopilot systems*) assurant une conduite autonome dans certaines situations spécifiques de conduite (sur autoroute, avec de bonnes conditions climatiques, etc.). Il convient toutefois de remarquer que même si les annonces publicitaires et la presse grand public présentent les véhicules ainsi équipés comme autonomes, il ne s'agit en réalité que de véhicules pourvus de fonctionnalités d'aide à la conduite, certes très avancées mais devant être utilisées dans des situations spécifiques de conduite avec une supervision totale et constante de la part du conducteur. La responsabilité de la conduite demeure donc à la charge du conducteur humain qui doit rester maître de son véhicule même si la conduite est grandement assistée. A ce jour, aucun véhicule complètement autonome destiné au grand public n'est commercialisé, la présence d'un superviseur humain demeurant toujours obligatoire. Toutefois, le véhicule autonome est d'ores et déjà considéré par la société savante IEEE comme la forme la plus viable pour le transport intelligent avec une prévision d'utilisation de 75% d'ici à 2040¹⁸. Il représente à l'heure actuelle une piste privilégiée en matière de mobilité par les pouvoirs publics dans la mesure où il permet d'apporter une réponse adaptée aux problèmes environnementaux, de sécurité, d'exploitation de l'infrastructure, de mobilité pour tous (personnes handicapées, personnes âgées, etc.) ou encore de partage des moyens de transport.

¹⁵ LISA TOUSSAINT, « Véhicules autonomes, feu (semi) Vert ! » *Bulletin des Transports de la Logistique*, Numéro 3686, pages 217-2018, 2018.

¹⁶ <https://waymo.com/ontheroad/> (consulté en 2018).

¹⁷ <https://www.volvocars.com/au/about/innovations/intellisafe/autopilot> (consulté en 2018).

¹⁸ <http://sites.ieee.org/itss/2014/09/15/you-wont-need-a-drivers-license-by-2040/> (consulté en 2018).

Cela dit, le véhicule autonome sera-t-il en mesure de répondre à toutes ces attentes ? Le zéro accident est-il un objectif réellement atteignable ? Le véhicule à délégation de conduite pourra-t-il garantir une sécurité maximale ? Sera-t-il comme on peut le lire ici et là plus sûr qu'un véhicule à conduite humaine ? Ou faudra-il partir du principe que les accidents vont toujours exister et que les changements vont s'opérer sur leur nature, leurs causes, leur gravité et leur occurrence ? Quels nouveaux risques le véhicule autonome peut-il engendrer ?

La question liée aux risques et accidents potentiels engendrés par le véhicule autonome est d'ores et déjà posée et demeure sans réponse même si l'on peut entrevoir ses contours grâce à des travaux collaboratifs, par exemple, entre scientifiques et juristes¹⁹. Dans ce contexte de travail interdisciplinaire, nous souhaitons apporter ici un éclairage sur le véhicule autonome d'un point de vue scientifique et technique. Il nous semble en effet intéressant de présenter dans cette contribution ces aspects du véhicule à délégation de conduite de façon à enrichir les réflexions juridiques suscitées par le véhicule autonome.

II. Le véhicule autonome, un objet inconnu en matière de transport

Le chemin a été long depuis 1925 pour le véhicule à délégation de conduite qui demeure encore un objet inconnu dans le panorama des moyens de locomotion même si sa présence tend à se démocratiser peu à peu. Aujourd'hui, de nombreuses villes (Paris, Lyon, Toulouse, Ann Arbor (USA), Christchurch (NZ), etc.) testent sur leur territoire de petites navettes complètement autonomes en mesure de réaliser certains trajets prédéfinis, à très faibles vitesses, sur des voies spécifiques et bien connues. Les exemples précédents montrent que nous n'en sommes qu'aux premières expérimentations en conditions réelles de conduite.

UTILISATEUR	INFRASTRUCTURE	SOCIETE
<ul style="list-style-type: none"> • Moins de collisions sur la route, grâce à l'élimination ou à la minimisation des erreurs humaines. • Trajets plus confortables et moins stressants. • Plus grande liberté de mobilité pour les personnes handicapées, fatiguées, ivres, inattentives, très âgées ou les 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de la congestion du trafic grâce à la réduction des incidents et à une meilleure gestion des flux. • Navigation en temps réel plus efficace, assignation de voyage et routage dynamique. • Des trajets partagés plus accessibles, fiables et souples pour les services de 	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer la prise en charge et les services dédiés aux personnes à mobilité réduite. • Inciter davantage à la transition de la propriété personnelle vers les services de covoiturage. • Réduire la pénurie de conducteurs pour certains pays et régions.

¹⁹Citons à titre d'exemple les projets de recherche interdisciplinaire tels que le projet Véhicule Autonome et Cadre Juridique (2016-2017) et le projet V.I.E (Véhicule Intelligent et ses Evolutions 2017-2018) de l'Université de Haute-Alsace dont l'objectif est de faire émerger des réflexions innovantes en matière de solutions techniques, scientifiques et juridiques (cadre juridique lié au risque).

<p>enfants.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gain de productivité personnelle et / ou de plaisir. • Mode de transport alternatif et peut-être plus efficace. • Propriété du véhicule moins nécessaire voire inutile pour les particuliers. • Manipulation automatisée des manœuvres réalisables en cas de défaillance du véhicule ou des utilisateurs. 	<p>transport en commun et de mobilité.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Réduction du nombre de véhicules routiers grâce au covoiturage ou à l'auto-partage des véhicules automatisés. • Infrastructure plus efficace grâce à un meilleur contrôle des véhicules et à des opérations coordonnées. • Des services de mobilité plus abordables et des opérations de transit moins subventionnées par les services publics. • Amélioration des rendements économiques et des modèles d'affaires pour les investisseurs privés. • Economies des ressources pour l'infrastructure, notamment au niveau du stationnement et de la construction de routes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les coûts d'assurance et de propriété connexes. • Réduire le taux d'accidents et diminuer les pertes sociétales. • Rendre les véhicules et les infrastructures plus respectueux de l'environnement. • Apporter des services de transport de plus en plus aptes à améliorer la sécurité, la fiabilité, la sécurité et la productivité.
--	---	--

Tableau 1 Principales contributions du véhicule autonome dans un monde idéal

Ces expérimentations vont permettre de mesurer les apports de cette technologie en matière de transport. Comme récemment présenté par CHAN CHING-YAO²⁰, ces apports peuvent avoir un impact positif à différents niveaux, à savoir : celui de l'utilisateur, de l'infrastructure et de la société. Dans un monde idéal pour les véhicules autonomes, ce chercheur envisage une série de contributions résumées dans le Tableau 1.

Cependant, ce monde idéal peut s'avérer plus difficile d'accès que prévu ; le déploiement partiel ou total de cette technologie devant passer, sans doute, par une phase de questionnement sur les solutions actuellement existantes et sur leurs évolutions. A titre d'exemple, la mixité du parc automobile composé pour partie de véhicules non autonomes et de véhicules à délégation de conduite, conduira nécessairement à limiter les retombées des voitures autonomes et représente, en tant que tel, un défi essentiel pour les scientifiques. L'intégration des véhicules autonomes dans un environnement de circulation complexe où la part humaine demeure importante nécessitera le déploiement de solutions d'analyse et d'interprétation du comportement humain en vue de prévoir et d'anticiper les actions des autres usagers de la route.

Afin de prendre la mesure du défi technique et scientifique à relever pour garantir une conduite autonome (aller d'un point de départ A à un point cible B en suivant un chemin prédéfini respectant les vitesses réglementaires et ce, sans intervention humaine et en toute

²⁰CHAN CHING-YAO, "Advancements, prospects, and impacts of automated driving systems" *International Journal of Transportation Science and Technology*. Numéro 6, pages 208-216, 2017.

sécurité pour les occupants et pour ceux qui partagent la route), il nous semble pertinent d'exposer succinctement les tâches relatives à l'activité de conduite au cours de la section suivante.

III. De la conduite humaine à la conduite assistée

L'activité de conduite humaine a fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans différents domaines scientifiques tels que les sciences humaines, les sciences pour l'ingénieur, etc. La plupart de ces travaux ont eu pour objet la compréhension des tâches réalisées lors de la conduite et leur modélisation. Ils ont donné lieu à de nombreux modèles d'étude proposés dans la littérature²¹. Ces modèles convergent généralement vers une structuration hiérarchisée à trois niveaux²², à savoir : le niveau stratégique (planification), le niveau tactique (manœuvres) et le niveau opérationnel (contrôle).

Le niveau stratégique définit la planification générale d'un voyage incluant, par exemple, les points à rejoindre lors du trajet et le type de route à emprunter, ainsi qu'une évaluation du coût et des risques que le voyage peut représenter. Le niveau tactique vise à adapter le plan de route à la situation rencontrée. Il génère la planification des trajets locaux et les actions pertinentes à mener en fonction des circonstances de conduite rencontrées sur le terrain (obstacles, etc.) et des contraintes liées à la caractéristique de la route et aux limitations de vitesse par exemple. Le dernier niveau, dit opérationnel, fournit les actions de commande (angle du volant, niveau d'accélération ou de freinage) nécessaires au guidage du véhicule à partir des informations fournies par le niveau tactique. Cette modélisation hiérarchisée, malgré ses limites dues à une vision simplifiée de l'activité de conduite, permet néanmoins de caractériser la conduite afin de mieux la comprendre.

L'un des aspects intéressant que cette structure de modèle fait ressortir porte sur le temps moyen nécessaire à la réalisation des tâches associées à chacun des trois niveaux. Ainsi, le temps moyen nécessaire au niveau stratégique peut se compter en minutes, alors que celui nécessaire au niveau tactique n'est que de l'ordre de la dizaine de millisecondes. En effet, lors d'une situation d'urgence telle que l'évitement d'un obstacle par exemple, le temps alloué pour appliquer au véhicule les actions appropriées est de quelques millisecondes. Or, bien souvent, face à une situation d'urgence, le conducteur n'a pas toujours le bon réflexe lui

²¹GERARD GISSINGER, NADINE LEFORT-PIAT, « La voiture intelligente » Hermès Lavoisier, 2002.

²²JOHN MICHON, "A critical view of driver behavior models: What do we know, What Should we do?" *Human behavior and traffic safety*, pages 485-520, 1985.

permettant d'appliquer l'action appropriée. Dans certains cas, les actions à appliquer pour conserver ou reprendre le contrôle du véhicule vont même à l'encontre du « bon sens ». A titre d'exemple, citons une situation de freinage d'urgence pour éviter un obstacle. Bien souvent, le conducteur va appliquer instinctivement un freinage constant et important pour arrêter son véhicule. Or, ce type de freinage induit un blocage des roues qui se traduit par une perte de manœuvrabilité du véhicule. En d'autres termes, le véhicule freine mais le conducteur n'est plus en mesure de maîtriser sa direction. La seule solution capable d'éviter le phénomène de blocages des roues consiste à appliquer un freinage dit par « pompage », c'est-à-dire en appuyant et en relâchant le frein dans un temps de réaction très court (niveau tactique). Si ce type d'actions peut être réalisé par un pilote professionnel, il s'avère beaucoup plus compliqué à réaliser par un conducteur moyen, même expérimenté. Il convient également de remarquer que, dans d'autres situations d'urgence, les actions nécessaires pour le maintien de la stabilité du véhicule se révèlent impossibles à réaliser par un conducteur humain, d'où l'idée d'assister le conducteur par un système de sécurité actifs.

Des systèmes de sécurité actifs, tels que l'ABS, l'ESC, l'AFU (assistance de freinage d'urgence) sont présents depuis les années 1990 jusqu'à devenir acceptés, courants et même obligatoires aujourd'hui. Ils ont été conçus afin de remplacer complètement ou partiellement l'action du conducteur humain par une action automatique générée par un ordinateur embarqué relié à des capteurs et à des actionneurs. Ces systèmes d'aide à la conduite ont largement démontré leur efficacité lors de situations critiques de conduite et font l'objet d'une certification, avant homologation (respect des normes de régulation des véhicules²³) et mise sur le marché. Ces systèmes remplacent l'action humaine de conduite principalement au niveau opérationnel.

Plus récemment, les niveaux stratégique et tactique ont fait l'objet de développements techniques et des systèmes avancés d'aide au conducteur, dits ADAS²⁴, ont vu le jour. Cette aide a radicalement bouleversé l'activité de conduite. Prenons à titre d'exemple le niveau stratégique de conduite comportant les tâches de planification et de navigation d'un trajet. De nos jours, ces actions ne sont presque plus réalisées par le conducteur, mais entièrement déléguées à un système informatique embarqué dans le véhicule grâce à la démocratisation des technologies de géolocalisation par satellite (GPS) et de cartographie numérique. Le conducteur peut alors se délester de ces tâches afin de mieux se concentrer sur les niveaux

²³https://www.unece.org/trans/main/wp29/meeting_docs_wp29.html (consulté en 2018).

²⁴ADAS : Advanced Driver Assistance Systems

tactique et opérationnel. D'autres systèmes d'aide à la conduite, tels que le régulateur de vitesse, prennent le contrôle partiel du véhicule lors d'une situation spécifique de conduite, la conduite sur autoroute par exemple. Ces systèmes, de plus en plus sophistiqués, offrent au conducteur la possibilité de réguler automatiquement sa vitesse en fonction de l'inter-distance entre véhicules, lui procurant un certain confort lors de longs trajets sur autoroute.

L'activité de conduite, quel que soit le niveau considéré, devient donc de plus en plus partagée entre le conducteur humain et le système d'aide à la conduite. Les débuts de cette relation homme-machine ont cependant été compliqués en raison d'un potentiel manque de fiabilité du système, impactant ainsi son acceptabilité par le grand public. Ces nouveaux systèmes électroniques occasionnaient potentiellement d'autres pannes et risques qui n'étaient pas forcément prévus lors de leur conception. En France, on se souvient des affaires liées aux régulateurs de vitesse survenues au début des années 2000²⁵. Certains utilisateurs parlaient de « régulateurs fous » liés à des dysfonctionnements difficiles à prouver et à reproduire. Ces affaires illustrent la fragilité de la confiance que les utilisateurs, ici les conducteurs, accordent à la technologie proposée.

Toute nouvelle technologie doit faire ses preuves avant d'être acceptée par son utilisateur. Toutefois, le risque zéro en matière de systèmes d'aide à la conduite n'existe pas en raison de la complexité des situations de conduite à traiter et certainement des objectifs de coûts limités de production et des cycles de développement de plus en plus courts imposés par le marché. En effet, la concurrence farouche entre les constructeurs automobiles impose une mise sur le marché en un temps de plus en plus court de nouveaux modèles de véhicule, ce qui laisse peu de temps aux équipementiers automobiles pour les phases de recherche, de développement, de mise au point, de test et de validation. Une autre source d'explication provient de la complexité même de l'architecture électronique globale d'un véhicule en raison de l'intégration de plus en plus de systèmes électroniques (pour la gestion du moteur, de l'habitacle, etc.). L'interaction entre ces systèmes électroniques peut conduire à certains dysfonctionnements délicats voire impossibles à prévoir lors de la phase de développement mais aussi à reproduire une fois la panne survenue en conditions réelles de conduite. Certaines pannes peuvent s'avérer fortuites et la trace du problème n'est pas enregistrée dans la

²⁵<http://www.leparisien.fr/faits-divers/encore-un-regulateur-de-vitesse-bloque-sur-une-renault-18-03-2005-2005790417.php> (consulté en 2018).

<https://www.ladepeche.fr/article/2012/09/26/1449403-regulateur-de-vitesse-bloque-la-voiture-incontrolable-expertise-le-1er-octobre.html> (consulté en 2018).

mémoire du calculateur. Une panne peut ne pas être liée au système d'aide à la conduite en tant que tel mais, par exemple, à sa source d'alimentation tributaire d'un autre équipement électronique. Dans d'autres situations, un enchaînement d'actions qui n'était pas forcément prévu par l'algorithme de gestion peut engendrer un conflit à l'origine d'une panne difficile à détecter.

Face à ces problèmes et aux enjeux de sécurité, les chercheurs et les ingénieurs développent des solutions innovantes en mesure d'améliorer par exemple les outils numériques de simulation (environnement de simulation permettant de reproduire le comportement d'un organe ou du véhicule entier et son interaction avec le conducteur, la route et l'environnement). Il est alors possible de « jouer » en simulation une grande variété de situations de conduite de façon à mettre en lumière les éventuels dysfonctionnements du système dans son environnement. Remarquons aussi que la partie logicielle des systèmes d'aide à la conduite devient de plus en plus critique et des outils de développement inspirés de ceux déjà utilisés dans le domaine de l'aéronautique et du ferroviaire font leur apparition dans le domaine automobile afin d'augmenter la fiabilité. L'automatisation des tests (séquences aléatoires jouées par une machine afin de tester une multitude de combinaisons possibles) et le recours à des méthodes de vérification formelle dont l'objectif est de confirmer la robustesse des développements permettent également de valider les logiciels embarqués dans des configurations de tests variées.

Dans les années à venir, les systèmes d'aide à la conduite à la base de la conduite autonome seront de plus en plus soumis à une phase sévère d'homologation de façon à garantir leur bon fonctionnement. Pour certains systèmes d'aide à la conduite, cette phase d'homologation est d'ores et déjà réalisée en « plongeant » le système réel d'aide à la conduite dans un environnement de simulation numérique poussé et ce, de façon à réduire la durée de roulage du véhicule pour homologuer le système. Ces solutions en évolution permanente ont démontré leur efficacité, se traduisant par une fiabilisation accrue des équipements d'aide à la conduite. Ainsi, les systèmes d'aide à la conduite intégrés dans les véhicules apportent de plus en plus un gain réel en matière de sécurité et de confort.

IV. De la conduite assistée à la conduite autonome

Si la conduite 100% humaine est peu à peu remplacée par une conduite partagée entre le conducteur et le véhicule par l'intermédiaire de systèmes d'aide à la conduite, la maîtrise du

véhicule reste néanmoins, aujourd'hui encore, à la charge du conducteur humain qui doit être en mesure de reprendre le contrôle du véhicule si la situation le nécessite ou en cas de dysfonctionnement de l'assistance. L'avènement du véhicule autonome a conduit à une remise en question de cette relation homme-machine et a débouché sur un découpage en niveaux d'automatisation proposé par la SAE Internationale (anciennement *Society of Automotive Engineers*) dans son rapport de 2014²⁶.

Ces niveaux d'automatisation vont du niveau zéro pour une conduite 100% humaine jusqu'au niveau cinq pour une conduite complètement automatisée. Les différents degrés d'automatisation ont été classés comme illustré dans le Tableau 2. Ces niveaux d'automatisation servent actuellement de ligne directrice pour la transition vers la délégation complète de la conduite. Il convient de remarquer que, jusqu'au niveau deux d'automatisation (automatisation partielle), le conducteur surveille l'environnement de conduite. Il existe donc un partage des tâches de conduite où le système autonome se charge du niveau opérationnel et l'humain du niveau tactique. A partir du niveau trois, le paradigme de conduite est radicalement bouleversé puisque le système doit être en mesure de surveiller l'environnement.

En effet, le système de conduite autonome doit être apte à gérer les tâches des niveaux tactique et opérationnel. Pour le niveau trois, le système peut solliciter une intervention de la part du conducteur qui doit être à même de répondre convenablement. La question soulevée est de savoir comment le conducteur humain va réagir et reprendre le contrôle de son véhicule face à une situation d'urgence par exemple. Actuellement, la réponse à cette question fait l'objet de nombreux travaux de recherche qui visent à évaluer les capacités de réaction du conducteur pour analyser, comprendre et réagir correctement face à une situation de reprise d'urgence du contrôle du véhicule²⁷. La question est de taille car ces résultats vont orienter les solutions techniques qui verront le jour pour gérer l'interaction entre le pilotage autonome et le conducteur. Clairement, le système doit être en mesure à la fois d'alerter le conducteur mais aussi de lui fournir des informations appropriées sur la conduite à adopter lors de la reprise du contrôle. Cette problématique soulève également la nécessité de développer une interface homme-machine (IHM), c'est-à-dire un moyen d'échange entre le système et le conducteur, à la fois ergonomique, efficace et intègre. Fournir l'information juste nécessaire sous la forme

²⁶ *Levels of Driving Automation Reports 2014 and 2016*. SAE J3019.

²⁷ SERGEY ABRASHOV. « *Étude et modélisation du conducteur pour la conception de systèmes d'assistance à la conduite* ». Thèse de doctorat. Université de Bordeaux, 2017.

appropriée au moment opportun est une exigence essentielle d'un tel dispositif de pilotage autonome et constitue un autre challenge technologique à relever. Constructeurs et chercheurs se posent la question de savoir s'il est plus judicieux de donner la main au conducteur humain lors d'une situation d'urgence ou bien au contraire de laisser gérer la situation d'urgence au système autonome. L'issue de ce problème conduit encore à d'autres questions d'ordre moral et éthique.

Enfin, au niveau cinq la conduite devient complètement autonome. Le conducteur humain n'intervient plus pour gérer les niveaux stratégique, tactique et opérationnel. La mise en œuvre d'un tel niveau d'automatisation exige l'utilisation des briques technologiques développées pour les niveaux précédents. Nous décrirons, dans la section suivante l'architecture type du véhicule autonome afin d'aborder les risques technologiques.

Niveau	Nom	Définition	Contrôle de la direction, accélérateur/décélération	Supervision de l'environnement	Capacités du système
<i>LE CONDUCTEUR HUMAIN SURVEILLE L'ENVIRONNEMENT DE CONDUITE</i>					
0	Pas d'automatisation	Pendant tout le trajet, le conducteur humain assure complètement tous les aspects liés à la tâche de conduite même lorsqu'elle est améliorée par des systèmes d'avertissement ou d'intervention.	Conducteur humain	Conducteur humain	Aucun mode de conduite
1	Assistance de conduite	Des modes de conduite spécifique sont délégués à un système d'assistance de la direction ou d'accélération/décélération utilisant des informations sur l'environnement de conduite tout en considérant que le conducteur humain doit effectuer tous les aspects restants de la tâche de conduite dynamique.	Conducteur humain et système	Conducteur humain	Quelques modes de conduite
2	Automatisation partielle	Des modes de conduite spécifique sont délégués à un ou plusieurs systèmes d'assistance de la direction et d'accélération/décélération utilisant des informations sur l'environnement de conduite tout en considérant que le conducteur humain doit effectuer tous les aspects restants de la tâche de conduite dynamique.	Système	Conducteur humain	Quelques modes de conduite
<i>LE SYSTEME DE CONDUITE AUTOMATISE SURVEILLE L'ENVIRONNEMENT DE CONDUITE</i>					
3	Automatisation conditionnelle	Des modes de conduite spécifique sont délégués à un système automatisé de conduite qui gère tous les aspects de la tâche de conduite dynamique en considérant que le conducteur humain répond de façon appropriée à une demande d'intervention.	Système	Système	Quelques modes de conduite
4	Haute automatisation	Des modes de conduite spécifique sont délégués à un système automatisé de conduite qui gère tous les aspects de la tâche de conduite dynamique même si le conducteur humain ne répond pas de façon appropriée à une demande d'intervention.	Système	Système	Quelques modes de conduite
5	Automatisation complète	Pendant tout le trajet, un système automatisé de conduite assure tous les aspects dynamiques de la conduite pour tout type de route et de conditions environnementales.	Système	Système	Tous les modes de conduite

Tableau 2 Niveau d'automatisation de la conduite pour des véhicules au sol.

V. L'architecture de commande du véhicule sans conducteur

Nous avons jusqu'ici exposé comment peu à peu l'automatisation de la conduite s'est développée, passant de systèmes d'aide à la conduite à une conduite à délégation partielle pour aboutir, à terme, à une délégation totale. Certains de ces systèmes, en particulier les systèmes de sécurité actifs, ne sont plus remis en question par l'ensemble des utilisateurs. D'autres systèmes permettant d'améliorer le confort des occupants (régulateurs de vitesses, maintien dans la voie, etc.) sont acceptés et utilisés de plus en plus par les conducteurs mais ne font pas encore partie de l'équipement de base des véhicules. Enfin, des dispositifs plus avancés tels que l'assistance pour se garer (*Parking Assistance System*) ou le système de conduite sur autoroute (*Tesla Autopilot*, renommé par la suite *Enhanced Autopilot*) n'ont pas encore franchi la phase d'acceptabilité par les conducteurs qui les jugent encore très peu sûrs.

Le dernier accident mortel de la route survenu en avril 2018²⁸ lors de l'utilisation du programme d'assistance à la conduite *Tesla Autopilot* a suscité de nouvelles controverses sur cette technologie. L'enquête sur les conditions de l'accident et éventuellement sur les potentielles défaillances du dispositif est actuellement en cours et pour l'heure, il est impossible de se prononcer sur les responsabilités du sinistre. Remarquons que ce système d'aide à la conduite reste encore à un niveau d'automatisation trois, avec supervision obligatoire du conducteur. Cette affaire illustre l'émergence des nouveaux risques liés à la démocratisation de ces systèmes semi-autonomes de conduite, autant de risques qui peuvent représenter des freins à la présence sur la route de véhicules grand public complètement autonomes (niveau cinq). Toutefois, la question n'est plus de savoir si les véhicules autonomes seront présents mais de savoir quand, l'échéancier étant loin d'être établi et sa date de concrétisation encore incertaine. De façon à mieux préparer sa venue sur les routes, il devient nécessaire d'appréhender la conduite autonome dans toute sa complexité.

Un véhicule à délégation de conduite de niveau cinq doit remplacer le conducteur humain par un dispositif d'automatisation 100% capable de :

1. prendre des informations sur le véhicule, la route et l'environnement,
2. prendre une décision pour déterminer une série d'actions appropriées à réaliser,

²⁸ <http://www.euronews.com/2018/03/31/tesla-in-fatal-car-crash-driving-on-auto-pilot> (consulté en 2018).

3. agir sur les organes de commande du véhicule afin de garantir le succès de la mission en toute sécurité pour les occupants du véhicule et les usagers de la route.

Afin de réaliser ces trois tâches, le véhicule autonome est équipé d'un système complexe de perception composé d'un ensemble de capteurs hétérogènes (caméras, radars, télémètres laser, centrales inertielles, etc.) constituant en quelque sorte les « yeux » du véhicule. A partir des données issues de cette multitude de capteurs, des algorithmes informatiques élaborent une stratégie de conduite et les actions correspondantes. Finalement, un ensemble d'actionneurs (moteurs électriques, etc.) permettent d'agir sur les organes de commande du véhicule. Tout comme la modélisation de la conduite humaine, l'architecture de commande pour un véhicule autonome tend à converger vers une structure hiérarchisée²⁹.

Cette hiérarchisation peut être schématisée, comme illustré sur la Figure 1, en considérant quatre niveaux, à savoir, la navigation, la perception, la génération des trajectoires et la commande. Ces quatre niveaux interagissent entre eux et visent à reproduire par un système autonome, les tâches de conduite humaine associées aux trois niveaux stratégique, tactique et opérationnel précédemment exposés. Remarquons qu'il n'existe pas d'analogie directe entre les niveaux stratégique, tactique et opérationnel et les niveaux de navigation, de perception, de génération des trajectoires et de commande. En effet, les niveaux tactique et opérationnel font appel aux trois niveaux de perception, de génération des trajectoires et de commande.

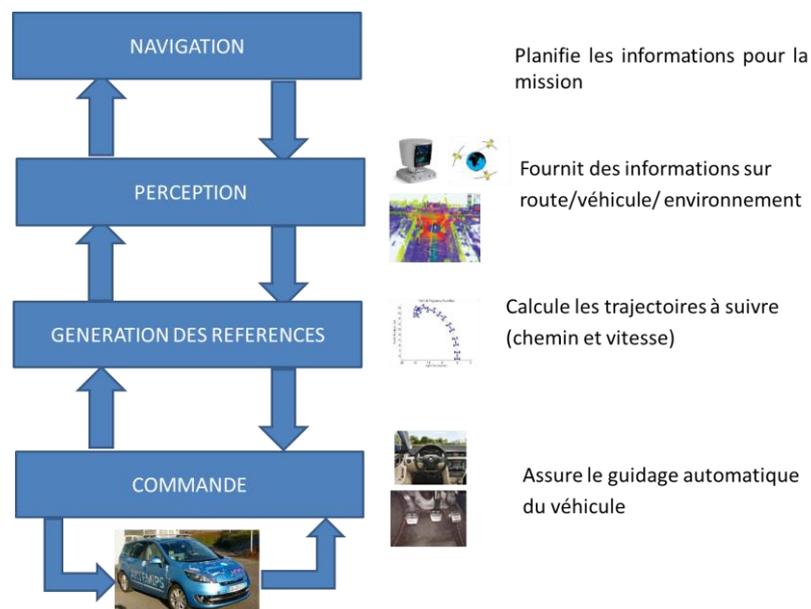


Figure 1 : Architecture hiérarchisée de commande pour le véhicule à délégation de conduite.

²⁹ RACHID ATTIA, “*Coupled Longitudinal and Lateral Control for a Safe Automated Vehicle Guidance*”. Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2015.

Cette architecture de commande a été mise en œuvre sur les prototypes de véhicule autonome de l’Institut de Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique et Signal (IRIMAS) de l’Université de Haute-Alsace présentés sur la Figure 3.



Figure 2 : Vue d’ensemble des deux prototypes de véhicule autonome de l’IRIMAS. Au premier plan « ARTEMIPS » et au second plan « POCLETTE ». ARTEMIPS est un véhicule autonome équipé pour prendre en charge à son bord une personne en situation d’handicap (travaux réalisés dans le cadre du projet SIMPHA). POCLETTE est un véhicule électrique léger de petit gabarit permettant de valider les concepts à l’aide d’une instrumentation bas coût et peu encombrante.

Dans cette section, nous souhaitons présenter une brève description de chaque niveau de l’architecture pour une conduite automatisée en nous focalisant principalement sur les moyens techniques actuellement disponibles pour leur mise en œuvre. Cette présentation s’accompagne d’une discussion sur les risques technologiques potentiels liés à chaque niveau et les solutions envisagées afin de les diminuer.

A. Le niveau de navigation

Le niveau de navigation correspond essentiellement au niveau stratégique de la conduite humaine. Il a pour but de planifier le chemin et le profil de vitesse à suivre pour atteindre une destination donnée par l’utilisateur en un temps défini. Il se fonde principalement sur l’utilisation de systèmes de géolocalisation et de cartes informatiques numériques précises. Cette couche de navigation peut prendre en compte les contraintes liées par exemple au temps moyen de parcours souhaité, à la consommation énergétique, etc. La navigation est d’ores et déjà déléguée à ce type de systèmes qui fournit au conducteur les informations générales nécessaires à la planification globale du trajet. Le principal risque technologique peut provenir des informations erronées fournies par le système de navigation, par exemple si la carte

informatique disponible dans sa base de données n'est pas mise à jour régulièrement ou si la fermeture ou la modification temporelle d'une voie n'a pas été signalée. Le niveau de navigation doit également prendre en compte les limitations de vitesse réglementaires en vigueur sur la portion de route empruntée par le véhicule.

La phase de navigation constitue donc une étape hors ligne de planification. L'adaptation de la stratégie de conduite aux conditions réelles du terrain est réalisée en confrontant les informations hors ligne données par le niveau de navigation à celles du terrain recueillies en ligne par le niveau de perception.

B. *Le niveau de perception*

Le niveau de perception, comme son nom l'indique, fournit des informations sur le véhicule (vitesse, accélération, cap, etc.), sur la route (le type de route, état de la route, etc.) et sur l'environnement du véhicule (détection des autres usagers de la route, des obstacles, etc.). La quantité importante d'informations à acquérir, à traiter et leur hétérogénéité, accroissent considérablement la complexité de ce niveau. Il devient alors inévitable d'équiper le véhicule d'un très grand nombre de capteurs chargés d'acquérir et de mesurer avec une précision donnée chaque type d'information. Des capteurs de natures diverses sont utilisés afin de limiter les risques dus aux erreurs de mesures intrinsèques à chaque capteur.

La perception de la route et de l'environnement est actuellement réalisée principalement à l'aide de systèmes de vision (caméras), de systèmes de télémétrie laser et de radars. Chacun de ces capteurs dispose de caractéristiques intrinsèques limitant ses performances, d'où l'idée de combiner ces sources d'information. Les caméras, par exemple, fournissent des informations pertinentes sur la scène mais sont extrêmement sensibles aux changements de luminosité et de contraste, leur capacité de détection est largement affectée en conditions météorologiques défavorables (brouillard, pluie, etc.). Afin de pallier ces déficiences, les systèmes de vision à partir des caméras sont bien souvent associés à un système de télémétrie laser très efficace même en conditions météorologiques défavorables. La Figure 3 présente les systèmes de perception d'ARTEMIPS, le prototype de véhicule autonome de l'Institut de Recherche en Informatique, Mathématiques, Automatique et Signal de l'Université de Haute-Alsace.



Figure 3 : Le véhicule ARTEMIPS de l'IRIMAS. Détail de quelques équipements pour la perception de la conduite autonome. A gauche, face avant du véhicule avec un télémètre laser à longue portée (150 mètres) au-dessous de la plaque d'immatriculation. Au milieu, une vision d'ensemble du véhicule. A droite, le poste de contrôle avec le volant instrumenté pour une conduite autonome et à l'extérieur dans la partie supérieure, un télémètre laser à courte portée (50 mètres).

Par ailleurs, les capteurs embarqués aujourd'hui dans le véhicule autonome sont dits « intelligents » car ils ne fournissent pas seulement une mesure brute de l'information mais sont assortis d'une brique logicielle embarquée capable de réaliser une première phase de traitement de cette information. Certains capteurs permettent, par exemple, de déterminer la distance entre le véhicule et un obstacle mais aussi la nature de l'obstacle détecté (piéton, cycliste, véhicule, camion, etc.). Les systèmes de vision, quant à eux, utilisent une voire plusieurs caméras (caméras multi-vues) afin de délivrer une information sur la profondeur de la scène³⁰ ou d'effectuer une reconnaissance des éléments de la scène (panneaux de signalisation, etc.). Toutefois, plus la vitesse du véhicule augmente, plus la détection des éléments doit se faire rapidement. Actuellement, cette détection peut être réalisée en temps réel conformément aux exigences de la brique logicielle, mais cela est uniquement vrai pour certains objets bien définis (voitures, piétons, adultes, etc.) et en considérant des taux de détection variable d'une situation à l'autre. Si le taux de reconnaissance va sans aucun doute augmenter dans les années à venir, le défi porte encore sur la détection d'éléments de petit gabarit pouvant apparaître soudainement sur la scène (par exemple un enfant qui traverse la route en courant, etc.).

Une autre information essentielle que le niveau de perception doit délivrer a trait au positionnement précis du véhicule au moyen de systèmes de géolocalisation³¹. Un système de

³⁰ CECILE RIOU, « Architectures et apports de systèmes de vision light-field pour la vision par ordinateur », Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2017.

³¹ PHILIPPE SAINT-MARTIN, « Applications de la géolocalisation. Une technologie qui change le monde » *Techniques de l'ingénieur*, Réf : TE6720 v2, 2015.

localisation grand public, type GPS, calcule la position d'un mobile avec une précision de 3 à 5 mètres suivant les conditions d'utilisation. Cette précision s'avère largement insuffisante dans le cadre des applications liées au véhicule autonome pour lesquelles une précision de l'ordre du centimètre est exigée. Il est alors nécessaire de faire appel à des systèmes de géolocalisation plus sophistiqués (GPS différentiel, etc.), entraînant par ailleurs des coûts matériels plus élevés. Cela dit, même si les systèmes de géolocalisation deviennent très performants, d'autres risques peuvent provenir de leur manque de fiabilité, en particulier quand le véhicule évolue dans un environnement peu dégagé en raison d'édifices élevés, d'arbres, etc. ou lors de la circulation dans un tunnel. Ces conditions de conduite sont fréquemment rencontrées lors d'un déplacement en zone urbaine. L'idée est alors de faire appel à d'autres systèmes de localisation, certes moins précis, mais s'affranchissant de l'utilisation des données satellites. Des réflexions portant sur l'équipement de l'infrastructure routière de balises de localisation représentent une piste intéressante à explorer mais engendrant des investissements lourds. Utiliser les systèmes de vision (caméras) pour obtenir une position relative du véhicule par rapport à la route sur laquelle il circule est une solution technologique de plus en plus employée³² et qui fait une nouvelle fois référence à la notion de redondance de l'information.

Ainsi, l'utilisation de moyens de perception variés et « intelligents » pour fournir des informations d'une richesse accrue introduit un niveau de redondance des données comme pour les systèmes critiques³³ (aéronautiques, ferroviaires, nucléaires, etc.). Si cette redondance permet d'augmenter la fiabilité des mesures et d'améliorer ainsi la qualité de la perception même en cas de défaillance d'un capteur, elle augmente en revanche rapidement les coûts de l'équipement (coûts matériels). Par ailleurs, elle exige un traitement de l'information plus complexe faisant appel, par exemple, aux techniques de fusion des informations³⁴ qui combinent des sources hétérogènes d'informations et fournissent en bout de chaîne l'information la plus pertinente (coûts logiciels).

³²GUILLAUME BRESSON and ZAYED ALSAYED and LI YU and SÉBASTIEN GLASER "Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving". *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, Volume: 2 Issue: 3, pages 194-220, 2017.

³³Pour les systèmes critiques, les capteurs et les calculateurs sont doublés voire triplés afin d'augmenter la fiabilité des mesures en cas de défaillance d'un capteur.

³⁴JEAN-PHILIPPE LAUFFENBURGER, « Vers l'autonomie des véhicules routiers : de la commande des systèmes à la perception de l'environnement ». Habilitation à diriger des recherches, Université de Haute-Alsace, 2015.

C. *Le niveau de génération des trajectoires*

Les niveaux de navigation et de perception fournissent des informations au niveau inférieur, niveau de génération des trajectoires, qui a pour objet de générer les trajectoires géométriques à suivre à une vitesse donnée (profil de vitesse). Cette phase de génération des trajectoires peut être principalement associée au niveau tactique de la conduite automobile. En effet, ces trajectoires sont locales à l'environnement proche du véhicule et doivent s'adapter en fonction de la situation de conduite rencontrée.

Les trajectoires liées au chemin à suivre doivent d'une part être « lisses » afin de garantir leur suivi lors de la commande du véhicule et doivent d'autre part respecter des contraintes géométriques³⁵. Les contraintes à respecter sont principalement liées à l'occupation de l'espace admissible (ou navigable) sur la route avec les niveaux de sécurité nécessaires. Quant au profil de vitesse, il doit être calculé, lors d'une situation classique de conduite, en évitant des changements brusques de la vitesse souhaitée et ceci, afin de garantir le confort des occupants, d'éviter des sollicitations brusques du véhicule, etc. Sur autoroute par exemple, ces trajectoires sont facilement générées car le véhicule reste en ligne droite (les virages ont de grands rayons de courbure) avec une vitesse relativement constante. La génération des trajectoires géométriques et des vitesses devient plus délicate en environnement urbain où les virages peuvent être serrés et les variations de vitesse importantes (démarrages et arrêts fréquents) selon les conditions de circulation.

La phase de génération des trajectoires doit être très réactive (temps de calcul nécessaire très courts) pour mettre à jour les trajectoires à suivre compte tenu des informations fournies par le niveau de perception. Ces trajectoires doivent être générées aussi bien lors d'une situation classique de conduite (cas peu complexe) que lors d'une situation d'urgence d'évitement d'un obstacle (freinage d'urgence pour un arrêt complet du véhicule, etc.). Le risque est alors que les algorithmes de génération de trajectoires ne soient pas suffisamment rapides pour fournir une solution optimale dans un laps de temps extrêmement court.

Ainsi, le niveau de génération des trajectoires va intrinsèquement prendre une décision pour indiquer au véhicule la trajectoire et la vitesse à suivre. Cette décision peut avoir des conséquences extrêmement importantes sur les autres usagers de la route. On évoque alors les

³⁵JEREMIE DANIEL, "Trajectory Generation and Data Fusion for Control-Oriented Advanced Driver Assistance Systems". Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2010.

aspects éthiques et moraux à prendre en compte lors d'une telle décision³⁶. La prise en compte de ces aspects commence à être investiguée en essayant de comprendre le mécanisme décisionnel humain en situation complexe. Ces études montrent que le conducteur humain choisit par réflexe la solution la moins « coûteuse » en termes de dommages humains à condition qu'il n'ait pas d'attache affective vis-à-vis des personnes potentiellement blessées. La question qui se pose est alors de savoir sur quels critères le niveau de génération de trajectoires va se baser pour faire son choix. Plus que sur un plan technique, cette question devra être abordée et débattue en amont sur un plan philosophique, éthique et moral. Comment traiter la question juridique relative au risque qu'une mauvaise décision de cet ordre peut générer ?

D. *Le niveau de commande*

Le dernier niveau que nous souhaitons aborder est le niveau lié à la commande du véhicule qui correspond principalement au niveau opérationnel de la conduite humaine. Ce niveau a pour tâche de générer automatiquement les actions de commande à appliquer au véhicule autonome (angle du volant, niveau de freinage, d'accélération, etc.) pour qu'il effectue sa mission³⁷. Le but est donc de garantir que le véhicule autonome suive les trajectoires géométriques et les vitesses fournies par le niveau de génération des trajectoires. Ce niveau comporte une partie algorithmique importante dédiée au calcul en temps réel des commandes à appliquer compte tenu des incertitudes paramétriques du véhicule (le poids du véhicule peut changer suivant le nombre d'occupants, etc.) mais aussi des incertitudes de la route (sol glissant, sec, etc.) qui impactent le comportement dynamique du véhicule.

La synthèse de l'algorithme de commande est faite par ordinateur à l'aide de modèles mathématiques caractérisant les principaux phénomènes physiques liés au comportement dynamique du véhicule. Ces modèles deviennent d'autant plus complexes que les dynamiques en rotation et en translation du véhicule sont fortement couplées. Les effets de ces couplages sont d'autant plus forts que la vitesse du véhicule augmente complexifiant ainsi la phase de conception de la loi de commande. En réponse, des hypothèses simplificatrices sont émises en vue de réduire le domaine de fonctionnement du véhicule et de diminuer la complexité de l'algorithme de commande. Afin de limiter les risques technologiques de ces stratégies de commande, les expérimentations actuellement effectuées par le grand public se font à faible

³⁶ <http://moralmachine.mit.edu/hl/fr> (consulté en 2018).

³⁷RACHID ATTIA, RODOLFO ORJUELA, MICHEL BASSET, "Combined longitudinal and lateral control for automated vehicle guidance", *Vehicle System Dynamics*, Volume 52, Issue 2, pages 261-279, 2014.

vitesse et sur des portions de route à faible courbure. Le défi scientifique consiste à proposer de nouvelles architectures de commande capables d'augmenter progressivement le domaine de fonctionnement du véhicule et de répondre ainsi aux exigences des utilisateurs.

Outre la complexité physique du véhicule, les algorithmes de commande doivent prendre en compte la complexité de l'environnement immédiat susceptible de changer très rapidement. Le niveau de commande doit être en mesure de générer les actions de commande appropriées tout en garantissant la sûreté des occupants et ce, même en considérant que les données envoyées par le niveau de perception peuvent être erronées voire même inexistantes. Le niveau de commande doit également répondre au problème posé par le dysfonctionnement d'un organe de commande, par exemple, le moteur électrique qui pilote la direction du véhicule. Une stratégie de commande d'urgence doit alors être prévue en cas de défaillance partielle ou totale d'un actionneur du véhicule. Si pour les systèmes aéronautiques, il est possible d'introduire une redondance matérielle (en doublant par exemple les actionneurs, les circuits d'alimentation, etc.) ceci s'avère inimaginable pour des raisons de coût et d'encombrement dans le domaine automobile. Actuellement, des travaux de recherche sont menés en vue de proposer de nouvelles architectures de commande capables de faire face à ces situations³⁸. Dans les années à venir, un travail important devra être mené pour aboutir à des outils et à des méthodes de certification de sûreté de fonctionnement de ces algorithmes de commande.

VI. De la conduite autonome au véhicule autonome connecté

Le véhicule autonome présent dans un futur proche sera, sans aucun doute, un véhicule connecté soit à l'infrastructure routière soit à d'autres véhicules. Le but est d'avoir une approche plus globale de la situation de roulage en vue d'améliorer la sécurité (meilleure anticipation d'une situation critique, etc.), le confort (services associés, etc.), etc. Ces échanges de données vont donc nécessiter la mise en place de protocoles de communication sûrs et spécifiques qui ne sont pas encore standardisés. La sécurité des échanges des données est un facteur important qui doit être abordé de façon à limiter les risques liés au piratage informatique, virus, etc. Certaines données ainsi générées et/ou échangées peuvent être considérées par les usagers comme faisant partie de leur vie privée et vont donc nécessiter un encadrement juridique précis. Les perspectives du véhicule autonome connecté laissent

³⁸MOHAMED BOUDALI, RODOLFO ORJUELA, MICHEL BASSET, RACHID ATTIA "Emergency Autonomous Vehicle Guidance Under Steering Loss", 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Chine, 2018.

entrevoir les défis à relever pour limiter les risques technologiques et sont autant de pistes de recherche intéressantes en vue d'améliorer les moyens de mobilité pour tous.

VII. Discussion

Le véhicule autonome figure parmi les solutions technologiques les plus prometteuses en mesure de diminuer les accidents routiers, 90% des accidents étant dus à des erreurs humaines. Si l'impact positif sur l'accidentologie d'une action automatique lors d'une situation critique (perte d'adhérence, freinage d'urgence, etc.) est largement démontré, il reste encore à prouver qu'une stratégie de conduite automatisée est plus sûre et efficace qu'une conduite humaine lors d'un usage quotidien.

La tâche de conduite autonome devient dans son ensemble extrêmement complexe et doit peu à peu être considérée au même degré de criticité que celui appliqué dans le domaine aéronautique par exemple, et ce afin de réduire les risques technologiques. Chaque brique nécessaire à la mise en place d'une délégation de la conduite (navigation, perception, génération des trajectoires et commande) comporte son propre niveau de complexité, lié aussi bien à la partie matérielle (capteurs, actionneurs utilisés) qu'à la partie logicielle (algorithmes de commande, de perception, etc.). La difficulté majeure consiste à appréhender l'architecture de conduite du véhicule autonome dans sa globalité. En effet, les nombreuses interactions entre ces niveaux doivent être maîtrisées car elles sont susceptibles d'engendrer des effets de bord souvent difficiles à prévoir lors des phases de conception. Les risques technologiques sont de nature diverse (logicielle et matérielle) et sont difficiles à évaluer dans leur ensemble. Les développements scientifiques et techniques vont donc tendre à fiabiliser dans un premier temps chaque niveau tout en veillant à ce que l'ensemble reste cohérent et sûr.

La démocratisation du véhicule autonome ne peut se faire sans passer par cette fiabilisation accrue des systèmes embarqués (i.e. systèmes de perception, de commande, traitement des données, etc.) assortie d'un coût relativement bas, un double défi à relever. La question est de savoir comment les avancées scientifiques et techniques seront capables d'améliorer la sécurité routière tout en limitant les nouveaux risques que cette nouvelle technologie ne manquera pas d'engendrer. Clairement, tous les développements technologiques que cette évolution impose auront un impact direct sur la société où le véhicule automobile a, d'une certaine façon, structuré notre mode de vie. Ces véhicules à conduite non humaine imposent la remise en question du paradigme de la mobilité individuelle ou semi-individuelle sur divers

aspects : économiques, sociétaux, juridiques, etc. Les modèles sur lesquels ces véhicules s'appuieront diffèreront probablement de ceux connus actuellement. Pour cette raison, un travail interdisciplinaire est nécessaire afin d'appréhender le véhicule autonome dans sa globalité et de préparer sa présence future au quotidien.