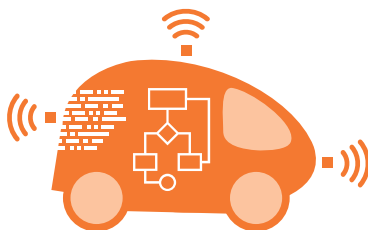


Véhicules autonomes et connectés

Les défis actuels et les voies de recherche



Les livres blancs d'Inria examinent les grands défis actuels posés par le numérique et présentent les actions menées par nos équipes-projets pour les résoudre. Ils ont pour objectif de faire le point sur une problématique en précisant ses complexités, en détaillant les voies de recherche existantes ou en émergence et en décrivant les impacts sociétaux attendus et à prévoir.

Ils sont produits sous l'égide de la Cellule Veille et Prospective d'Inria avec la contribution active des chercheurs. Cette unité, par l'attention qu'elle porte aux évolutions scientifiques et technologiques, contribue à la détermination des orientations stratégiques et scientifiques d'Inria. Elle permet également à l'Institut d'anticiper l'impact des sciences du numérique dans différents domaines sociaux et économiques.

Ce livre blanc a été coordonné par Fawzi Nashashibi, assisté d'Olivier Trebuq, avec l'aide de Paola Goatin, Valérie Issarny et Olivier Simonin. Merci également aux équipes-projets Inria qui ont répondu aux questionnaires et aux experts académiques et industriels qui ont accepté de participer à des entretiens qui nous ont ainsi permis de prendre en compte leurs expertises et leurs opinions. Enfin, la rédaction de ce document a été finalisée grâce à la contribution de Thierry Lucas, rédacteur, et de la Direction générale déléguée à la science d'Inria (Peter Sturm et Alain Viari).



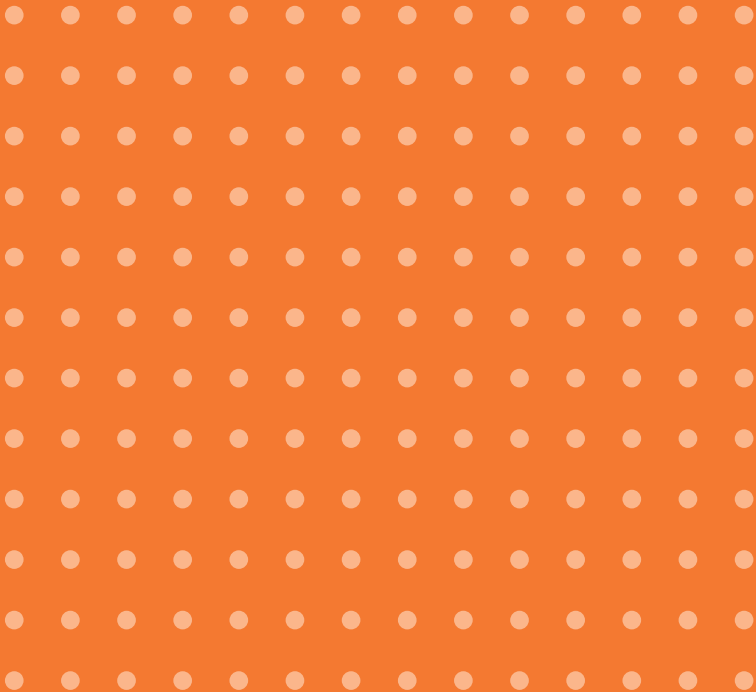
Sommaire

i. Introduction	2
1. La mobilité : nouveaux enjeux, nouveaux usages, nouveaux acteurs	5
1.1 Les nouveaux besoins de la mobilité : des enjeux économiques, sociaux et environnementaux	6
1.2 Les avantages du VAC et les conditions de son déploiement	7
1.3 L'industrie automobile en mutation	12
1.4 Une recherche mondiale en pleine effervescence	15
2. Les défis technologiques et scientifiques du VAC	17
2.1 Les défis en lien avec la navigation autonome	19
2.2 Les défis en lien avec l'intégration et la sûreté de fonctionnement	24
2.3 Les télécommunications et la cybersécurité des véhicules connectés	25
2.4 Le <i>Big Data</i>	27
2.5 La simulation	28
2.6 La modélisation des grands systèmes : trafic routier et gestion de flottes	29
2.7 Les interfaces Humain-machine	31
3. L'impact social, légal et éthique d'un déploiement du véhicule autonome et connecté	32
4. Quatre questions stratégiques sur le véhicule autonome et connecté	36
4.1 Comment assurer la sécurité des systèmes et des communications fiables ?	37
4.2 Un véhicule autonome peut-il comprendre son environnement ?	38
4.3 Un pilote automatique peut-il être intelligent ?	38
4.4 Comment valider un système aussi complexe ?	40
5. Annexe : l'implication d'Inria au service du VAC – domaines scientifiques et équipes concernées	41
Glossaire	46





Introduction





© Inria / illustration Clod

Le véhicule autonome est-il un phénomène de mode ? On pourrait le penser, quand il ne se passe pas une semaine sans que ne soit annoncé le développement d'un nouveau véhicule « sans conducteur ou sans conductrice », et que les articles sur ce sujet fleurissent dans la presse. Mais cet engouement est peut-être le signe que nous sommes à l'aube d'une révolution dans le monde des transports et de la mobilité.

Le véhicule autonome, qui est aussi un véhicule connecté – pour être autonome, il doit pouvoir communiquer avec les autres véhicules, comme avec l'infrastructure routière – ne va pas seulement changer notre manière de nous déplacer. Son déploiement aura un impact sur l'évolution de la société, en termes de sécurité, d'environnement, d'urbanisme... L'industrie automobile elle-même, pour produire des véhicules dans lesquels les télécommunications et l'intelligence artificielle joueront un rôle déterminant, est en passe de subir une profonde transformation, et voit déjà arriver de nouveaux acteurs issus du numérique tel *Google*.

Pour mieux appréhender tous ces enjeux, il est nécessaire de comprendre ce qui fait la spécificité du véhicule autonome et connecté, mais aussi les défis scientifiques et technologiques auxquels sont confrontés les acteurs du secteur. Pour développer ces systèmes complexes, qui font appel à des technologies émergentes et à des disciplines scientifiques variées, les industriels établissent des collaborations avec des laboratoires de recherche. D'ici quelques années, le logiciel représentera plus de la moitié des coûts de développement du véhicule et le logiciel embarqué comptera sans doute pour la majeure partie de sa valeur ajoutée. Chez Inria, institut national de recherche dédié au numérique, plusieurs équipes de recherche sont déjà impliquées dans des projets liés au développement du véhicule autonome et connecté.

Ce livre blanc sur les Véhicules Autonomes et Connectés (VAC) présente de manière synthétique les technologies innovantes sur lesquelles travaillent les nombreuses équipes académiques et industrielles qui, à travers le monde, préparent le déploiement de la voiture autonome. Il décrit également son impact économique et sociétal, et ses implications éthiques.

LES COMPÉTENCES D'INRIA POUR LE VAC

Les technologies utilisées dans les systèmes de transport intelligents, en particulier dans les véhicules autonomes, sont aujourd'hui au cœur des activités de recherche et d'innovation de nombreuses équipes-projets d'Inria : la modélisation, l'optimisation, le contrôle en temps réel, les réseaux de télécommunication, les technologies et méthodes de calcul couplées aux nouvelles plates-formes informatiques embarquées, la géolocalisation, le traitement et la fusion multisensorielle, l'intelligence artificielle...

Ces activités font appel à de nombreux domaines – modélisation mathématique, techniques robotiques, interfaces Humain-machine, technologies de télécommunication et des réseaux, apprentissage automatique, aide à la décision, raisonnement dans l'incertain – dans lesquels Inria est un acteur majeur. Le tableau en annexe donne un aperçu plus détaillé des domaines qu'Inria aborde et des équipes impliquées.



La mobilité : nouveaux enjeux, nouveaux usages, nouveaux acteurs



1.1 Les nouveaux besoins de la mobilité : des enjeux économiques, sociaux et environnementaux

Chaque année, les accidents de la route sont responsables de 1,25 million de morts et jusqu'à 50 millions de blessés dans le monde¹. Notre planète compte aujourd'hui un véhicule pour dix habitants, chiffre qui risque d'exploser avec le développement des pays émergents. Le coût des accidents de la route est estimé à environ 25 milliards d'euros pour l'économie française.

L'amélioration de la sécurité est donc un enjeu capital. Or, 90 % des accidents étant imputables à des erreurs humaines², on peut espérer qu'une automatisation totale ou partielle de la conduite pourrait réduire leur nombre ou leur gravité.

Ce n'est pas le seul défi posé au véhicule autonome : les transports sont responsables de dizaines de millions de tonnes d'émissions de polluants, ainsi que d'environ un quart de la consommation mondiale d'énergie³ et des émissions de CO₂ dans l'atmosphère⁴. Le déploiement du véhicule autonome devrait aussi favoriser de nouveaux modes de transports individuels et collectifs (auto-partage, robots-taxis...) dont on peut espérer qu'ils réduiront sensiblement le nombre de véhicules en circulation.

En 2010, plus de la moitié des habitants de la planète habitaient en zones urbaines et ce chiffre devrait atteindre 75 % en 2050. Dans les villes, la question globale de la mobilité va donc devenir cruciale. Comment concevoir la physionomie des transports dans l'avenir ? Peut-on imaginer que les villes du futur pourront supporter le même taux de croissance du parc automobile ? La voiture individuelle, telle que nous la connaissons aujourd'hui, ne pourra à l'évidence pas rester le mode privilégié de transport. Par ailleurs, la révolution numérique en cours conduira également à un changement dans nos besoins de mobilité.

1. *Rapport de situation sur la sécurité routière 2015*, Organisation mondiale de la santé.

2. Association prévention routière, Statistique 2012 Principaux Facteurs d'accidents.

3. *US Department of Energy (DOE)*.

4. Agence internationale de l'énergie.

1.2 Les avantages du VAC et les conditions de son déploiement

Qu'est-ce qu'un véhicule autonome ?

De la voiture entièrement prise en charge par son conducteur ou sa conductrice, jusqu'à la voiture entièrement autonome, les véhicules sont habituellement classés en 6 niveaux d'autonomie. Le véhicule totalement autonome est entièrement piloté par une intelligence artificielle. Il est capable de se diriger seul, d'interagir avec son environnement pour adapter sa conduite en fonction des événements (accidents, travaux...) et des autres usagers de la route (voitures, piétonnes et piétons...), afin de se rendre en un lieu donné sans intervention humaine. Si certains prototypes actuels s'en approchent dans certaines situations particulières, ils ne couvrent pas encore tous les cas de figure réels.

On peut distinguer 6 niveaux d'autonomie :

Niveau 0 : pas d'automatisation. La conduite est entièrement à la charge du conducteur ou de la conductrice, qui peut toutefois disposer de mécanismes d'avertissement, comme le signal sonore de franchissement de ligne, de proximité d'un obstacle sur la route, etc.

Niveau 1 : le conducteur ou la conductrice garde en permanence la responsabilité des manœuvres, mais délègue une partie des tâches au système, typiquement pour le contrôle longitudinal du véhicule, par exemple à travers un régulateur de vitesse adaptatif. Elle ou il doit être capable de reprendre totalement la main sur la conduite si la situation l'exige.

Niveau 2 : la responsabilité des manœuvres est entièrement déléguée au système, mais tout s'effectue sous supervision constante du conducteur ou de la conductrice, qui peut décider de reprendre la main à tout moment, par exemple lors d'un changement de voie automatique. Autre illustration : l'assistance au stationnement (le *Parking Assist*), qui n'est activée que lorsqu'une place de stationnement est détectée ou choisie par le conducteur ou la conductrice.

Niveau 3 : le conducteur ou la conductrice peut déléguer la conduite sur les deux dimensions de guidage (longitudinal et latéral) et peut abaisser son niveau de vigilance pour se consacrer **de manière brève** à d'autres tâches. Le système de pilotage intelligent se charge alors de positionner et de maintenir le véhicule sur sa voie tout en conservant une allure adaptée à la vitesse et aux conditions de trafic. Le conducteur ou la conductrice doit rester en mesure de reprendre le contrôle de la conduite si les conditions l'exigent.

* Classification de la SAE (Society of Automotive Engineers).

LES BÉNÉFICES ATTENDUS DES VÉHICULES AUTONOMES ET CONNECTÉS

– Plus de sécurité et de confort :

Amélioration de la sécurité routière et réduction du nombre et de la gravité des accidents, réduction du stress et de la fatigue pendant la conduite, gain de temps pour d'autres tâches, réduction de la consommation de carburant, diminution du nombre d'amendes...

– Une mobilité intelligente :

Optimisation des temps de trajet, meilleure exploitation de l'infrastructure routière et plus grande fluidité du trafic, réponse à de nouveaux besoins de mobilité.

Niveau 4 : c'est un niveau hautement automatisé dans lequel le conducteur ou la conductrice n'intervient déjà plus et peut en effet complètement détourner son attention pour faire autre chose. En revanche, ce niveau ne concerne que certains modes de conduite, et sous certaines conditions. C'est le conducteur ou la conductrice qui active et désactive le mode automatisé.

Niveau 5 : c'est l'automatisation ultime : l'être humain n'intervient plus, ni dans le contrôle, ni dans la supervision de la tâche de conduite ou de navigation. Tout est sous la responsabilité et le contrôle du système. La présence même d'un être humain aux commandes n'est plus forcément nécessaire.

Qu'est-ce qu'un véhicule connecté ?

Un véhicule connecté intègre des systèmes de télécommunications sans fil qui lui permettent de collecter des informations qu'il pourra enregistrer, traiter, exploiter et relayer vers d'autres véhicules, ou envoyer vers l'infrastructure routière.

Les données collectées par le véhicule sont nombreuses et variées. Certaines sont liées au pilotage, comme l'information sur la distance avec un autre véhicule mesurée par un radar, ou les données de géolocalisation. D'autres données concernent la vie à bord, par exemple le transfert de musique stockée sur un *smartphone* ou d'un film... On peut facilement s'imaginer que les futurs VAC traiteront jusqu'à plusieurs gigaoctets de données par seconde.

Depuis 2017, sur décision de l'Union européenne, tous les véhicules neufs doivent être connectés afin de passer automatiquement un appel d'urgence en cas d'accident : c'est le service *e-Call*. À l'horizon 2020, on estime que 80 % du parc automobile seront connectés.

À l'heure actuelle, les connexions passent essentiellement par le *smartphone* du conducteur ou de la conductrice, mais bientôt c'est *via* l'électronique du tableau de bord que le véhicule sera directement connecté.

La connectivité, pour quoi faire ?

1. Services aux conducteurs, conductrices, passagères et passagers

L'échange de données entre le véhicule et son environnement permet de développer de nouveaux services tels que le paiement de parkings ou de péages, la réception d'informations sur la consommation d'énergie, la diffusion de divertissements, etc.

2. Offres commerciales

Des données remontées d'un VAC vers des serveurs pourront former la base pour de nombreux services : maintenance prédictive, programmation d'entretiens ou de changement des pneus, etc. Et bien évidemment, le marché sera très créatif dans la proposition de nouvelles modalités d'assurance (vers une individualisation en fonction du type de conduite) ou d'autres services administratifs ou commerciaux.

3. Aide à la navigation et optimisation de la conduite

Les données reçues par le véhicule permettent de prendre en compte l'état de la circulation de manière dynamique afin, par exemple, d'éviter les bouchons... Pour



CyBus, CyCab et C1 communiquant entre eux, EP RITS, 2014 – © Inria / Photo H. Raguet

le confort des passagères et des passagers, des profils de conduite automatisée (vitesses, styles de conduite...) s'adaptent à la topologie du terrain, à l'état du trafic, aux modes de conduite des autres usagers de la route.

4. Sécurité passive

Le véhicule reçoit des informations signalant les problèmes de visibilité (brouillard...), d'adhérence, de route coupée..., la présence d'objets ou de personnes sur la route, des zones de travaux, ou encore l'arrivée d'un véhicule en sens inverse. Il émet automatiquement un signal de détresse en cas d'accident.

5. Sécurité active

La connectivité du véhicule ouvre la voie à des fonctions d'aide au dépassement et d'évitement de collisions, à la gestion des intersections (alerte et freinage en cas d'obstacle masqué, de non-respect d'un feu...), et à des régulateurs de vitesse adaptatifs coopératifs (CACC).

6. Conduite coopérative et coordonnée

La coordination entre les véhicules permet une meilleure gestion de l'occupation des voies, la gestion optimale des feux et l'évitement des goulets d'étranglement. La construction de cartes locales dynamiques devient possible, grâce au partage des informations captées par chaque véhicule.

Un déploiement qui s'accélère

L'Audi A8, commercialisée en 2018, est la première voiture de série équipée d'un système de conduite automatisée de niveau 3. On observe ainsi une nette accélération, alors qu'il y a peu on envisageait un déploiement très progressif des véhicules autonomes, en passant par des étapes telles que l'assistance dans les bouchons sur voie rapide, l'automatisation plus poussée sur autoroute avec changement de voie et gestion des intersections, le stationnement en mode autonome, etc.

La volonté d'accélérer l'arrivée de la voiture autonome vient aussi de la pression des acteurs de la Silicon Valley. Ainsi, le constructeur américain *Tesla* équipe d'ores et déjà ses voitures des équipements nécessaires à la conduite autonome. Ils seront activés par téléchargement de logiciels au fur et à mesure de l'évolution de la réglementation.

La compétition va donc contribuer à accélérer ce processus. Il y aura néanmoins deux marchés distincts : celui de la mobilité partagée, avec des véhicules urbains desservant une zone bien précise et jouant avant tout le rôle de moyens de transport,

et celui de véhicules « de loisir » bénéficiant d'un degré plus ou moins grand d'automatisation. Ces deux types d'usage des véhicules peuvent donner lieu à des écosystèmes économiques différents. À partir de 2025 devraient apparaître les premiers systèmes de transport automatisés, sur des sites privés ou d'accès contrôlé. À cette période, des véhicules autonomes (niveau 3 ou 4) devraient aussi commencer à rouler sur autoroute, à condition que les infrastructures aient été adaptées (par exemple sur des voies réservées à cet usage). Ce n'est qu'à partir de 2040 que l'on devrait voir des voitures complètement autonomes (niveau 5), dans des zones périurbaines, et en test dans des villes. Mais la maturité des technologies n'est pas le seul verrou au déploiement des VAC, qui dépendra largement de décisions politiques (investissements, réglementations...) et des stratégies d'aménagement du territoire.

À QUELLES CONDITIONS LES VÉHICULES AUTONOMES SERONT-ILS DÉPLOYÉS ?

Pour être déployés à grande échelle, les véhicules autonomes devront :

1. Atteindre un niveau de maturité technologique qui réponde aux exigences de sécurité ;
2. Garantir l'interopérabilité des différents systèmes, à travers des infrastructures coopératives, des standards et des normes, des procédures de certification, des réseaux de maintenance, etc. ;
3. Offrir de nouveaux services de mobilité ;
4. Garantir leur viabilité économique ;
5. Entrer dans un cadre légal et réglementaire défini, aux plans national et international.

D'autres considérations importantes concernent le déploiement d'infrastructures sous-jacentes nécessaires au bon fonctionnement à large échelle des VAC : en premier lieu, un réseau de télécommunications qui permette de satisfaire – en termes de bande passante et de latence - les énormes besoins de transferts de données décrits dans ce texte, mais également, selon les modèles d'exploitation qui vont émerger, l'installation de signalétiques ou de voies de circulation dédiées.

On peut remarquer que l'usage des VAC pourrait se développer à des rythmes différents en milieu urbain et dans le monde rural : une meilleure couverture de réseau et une infrastructure plus fournie pourront permettre des fonctionnalités plus riches en ville, du moins dans un premier temps.

1.3 L'industrie automobile en mutation

Un modèle économique en rupture

Pour les constructeurs et les équipementiers, l'arrivée des véhicules autonomes et connectés n'est pas une simple évolution de leurs métiers : c'est une rupture majeure. Un changement d'ère qui est souvent résumé par l'importance croissante apportée au logiciel dans la construction automobile. « *Le logiciel [pour l'automobile de demain] sera ce que le moteur était à l'industrie automobile depuis cent ans* », déclarait récemment Johann Jungwirth, le « *chief digital officer* » de Volkswagen. Pour la première fois en plus de 100 ans d'existence, la mécanique et la thermique ne sont plus l'alpha et l'oméga de l'automobile.

Le rôle majeur du logiciel dans les voitures autonomes n'a pas seulement une incidence sur la conception des véhicules. Après sa mise en service, le véhicule pourra être mis à jour « en ligne », comme l'a déjà montré le constructeur de voiture électrique *Tesla*. Du coup, c'est la frontière entre véhicule neuf et véhicule d'occasion qui risque de devenir floue, avec des conséquences sur le marché automobile... En effet, comment qualifier un véhicule vieux de quelques années mais équipé des tout derniers logiciels ?

.....
Le « hardware » risque-t-il de devenir une simple commodité sans valeur, tandis que toute la valeur se reporte sur les logiciels ?
.....

Pour les constructeurs, une question centrale est donc : le « *hardware* » risque-t-il de devenir une simple commodité sans valeur, tandis que toute la valeur se reporte sur les logiciels ? Le profil même des constructeurs automobiles va subir une profonde transformation. Grâce aux masses de données collectées via les véhicules

connectés, les constructeurs pourront améliorer la conception des voitures, et développer de nouvelles activités en créant de nouveaux services, par exemple pour la maintenance prédictive et préventive des véhicules. Par ailleurs, de nouvelles entreprises de véhicules électriques autonomes apparaissent, qui fabriqueront, sans investissements massifs, des voitures à partir de modules achetés auprès des équipementiers. Sur ce marché en pleine mutation, les géants du numérique comme *Google*, *Apple* ou *Uber* veulent s'imposer dans la voiture autonome, chacun avec son modèle économique. *Google*, via sa filiale *Waymo* va proposer un système de conduite autonome aux industriels. *Apple* semble se concentrer sur l'aspect « système d'exploitation, design et interface », c'est-à-dire sur son savoir-faire d'intégrateur. Et *Uber* pourrait gérer des flottes de camions et de voitures robots.

Mais la véritable révolution en cours est celle des usages de l'automobile. Le succès d'entreprises d'autopartage comme *Blablacar*, *Uber*, ou encore *Lyft*, ne donne qu'une faible idée des changements à venir. Avec des véhicules autonomes et connectés, il sera très simple pour un citadin ou une citadine de se déplacer en commandant un véhicule *via* une application, véhicule qui se déplacera tout seul chez le client ou la cliente, pour un coût bien inférieur à l'ensemble des coûts associés à la possession d'une voiture individuelle.

Que ce soit sous la forme de robots taxis ou de voitures partagées, la limite entre transports publics et privés deviendra moins nette. Et tous les acteurs de l'automobile, les constructeurs et les équipementiers, mais aussi les concessionnaires, les réparateurs, les loueurs... vont devoir repenser leur modèle économique. La chaîne de valeur devrait progressivement migrer vers les fournisseurs de logiciels et les opérateurs de services liés à la mobilité.



Projet Perfect : assistance à la conduite et affichage du risque, EP CHROMA, 2015 – © Inria / Photo H. Raguet

Le véhicule autonome et la révolution des usages pourront également renouveler la forme traditionnelle de l'automobile. Les véhicules, tels que nous les connaissons, ont été conçus pour être conduits par des êtres humains, pour un usage privé et familial. Mais dans une voiture partagée et autonome, nul besoin, par exemple, d'avoir des sièges avant et des sièges arrière : tous les sièges pourraient au contraire se faire face pour permettre aux passagères et aux passagers d'échanger de manière plus conviviale. On peut aussi imaginer des véhicules dotés de tables de travail, de grandes vitres pour contempler le paysage, de machines à café... *Mercedes-Benz* a présenté en janvier 2015 un *concept-car* proposant une telle approche. Les start-up

Zoox et Next travaillent également dans cette optique. À partir du moment où les êtres humains sont libérés de la nécessité de conduire, l'habitacle de la voiture peut être pensé comme une plate-forme de services destinée aux usagères et usagers.

Grandes manœuvres chez les industriels : fusions, alliances et nouveaux acteurs

Comme nous l'avons vu, l'arrivée des voitures autonomes secoue déjà le monde de l'industrie automobile. Les grands constructeurs et les équipementiers traditionnels sont encore bien présents, mais ils sont rejoints et déjà bousculés par de nouveaux acteurs comme *Tesla*. Mais ce sont aussi les grands groupes du numérique, comme *Google*, *Apple* et *Microsoft*, qui deviennent les premiers partenaires des industriels de l'automobile, et très bientôt leurs principaux rivaux.

Les grands fournisseurs de puces et de processeurs, *Nvidia*, *Qualcomm* ou encore *Intel*, sont aussi des acteurs clés dans le développement des véhicules autonomes. *Intel*, par exemple, a racheté *Mobileye*, un spécialiste des caméras intelligentes pour l'automobile, pour 14,7 milliards de dollars. De nombreuses start-up travaillent sur des fonctions et des composants spécifiques à la voiture autonome, tels que la cartographie (*Civil Maps*, *Here*), les caméras intelligentes (*Mobileye*), les capteurs Lidar (*Velodyne*, *Quanergy*, *Innoviz*, *IeddarTech*, ...), l'intelligence artificielle (*Drive.AI*, *Nuro.AI*, *Nauto*, *Five AI*, *AIMotive*, ...).

Enfin, les sociétés spécialisées dans les services de mobilité, comme *Uber*, *Lyft*, ou encore le chinois *Didi*, ont pour objectif d'opérer des flottes de robots-taxis sans chauffeur. Elles affrontent sur ce créneau la concurrence de start-up comme *Zoox* ou *Nutonomy*.

Depuis l'arrivée des *Google Cars* en 2009, les tests réalisés par différentes sociétés se multiplient, aux États-Unis, en Asie ou en Europe. Dans la seule Californie, un des États américains les plus avancés sur la question, 27 entreprises ont déposé une demande d'autorisation pour tester leurs véhicules sur les routes de l'État.

C'est donc tout le paysage de l'industrie automobile qui va changer. Le déploiement de nouveaux véhicules, des infrastructures routières, des modes de communication et d'échanges de données, des systèmes de transports... ne pourra se faire sans un important effort de standardisation permettant l'interopérabilité des systèmes et leur maintenance. Les instances de standardisation qui s'appliquent au transport en général et qui intègrent le véhicule autonome et connecté dans le champ de leurs travaux sont nombreuses et se déclinent aux plans national (AFNOR), européen (ETSI, CEN) et international (ISO, IEEE, IETF).

Déjà l'industrie évolue très rapidement, au gré des rachats, des partenariats et des projets. En effet, le développement d'un système complet et opérationnel fondé sur des véhicules autonomes et connectés n'est pas réalisable par un seul acteur. Aucun ne peut maîtriser toutes ses composantes, qu'elles soient scientifiques, technologiques, industrielles ou économiques. La tendance, qui ne fait que s'accroître, est donc aux alliances – voire aux fusions – entre opérateurs, constructeurs et organismes de recherche publics et privés. Pour préparer les futurs services de robot-taxis, les constructeurs automobiles établissent des partenariats avec les opérateurs de transports, tel *Renault* avec *Transdev*, ou les constructeurs allemands avec les opérateurs des grandes villes comme Hanovre, Stuttgart et Munich. Par ailleurs, les fabricants de véhicules rachètent à prix d'or des entreprises spécialisées. *GM* s'est offert *Cruise Automation*, qui a développé un système de conduite autonome, pour environ un milliard de dollars. *Ford* va investir la même somme dans la start-up *Argo-AI* (intelligence artificielle et robotique). Quant aux constructeurs allemands *Daimler*, *BMW* et *Audi*, ils ont racheté pour trois milliards de dollars, le fournisseur de cartes géographiques *Here*.

Les grandes firmes du numérique font de même. Le projet *Google Car* a donné naissance à une filiale commerciale, *Waymo*, qui a noué des partenariats avec *Honda* et *Fiat-Chrysler*. *Apple* a investi un milliard de dollars dans *Didi Chuxing*, la plateforme chinoise de VTC. *Uber*, pour 680 millions de dollars, a acquis la société *Otto*, qui transforme des camions en véhicules autonomes. Sans oublier les partenariats de *Microsoft* avec *Toyota*, *Renault Nissan* et *Volvo*.

1.4 Une recherche mondiale en pleine effervescence

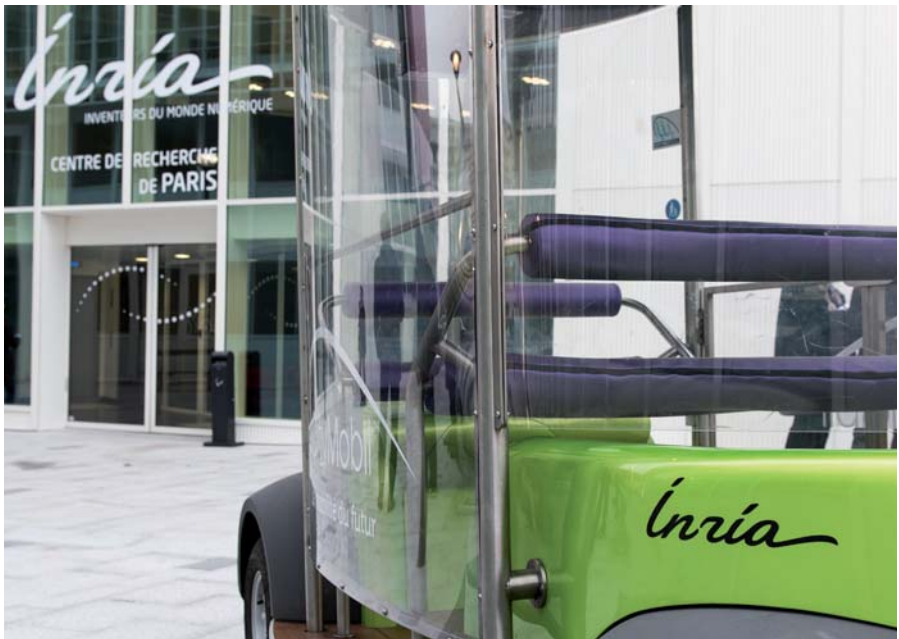
De nombreux centres de recherche et universités à travers le monde, participent au développement du véhicule autonome et connecté. Les industriels, confrontés à des défis technologiques qui constituent de véritables ruptures, doivent s'appuyer sur ces laboratoires de recherche pour inventer des solutions encore inédites.

Aux États-Unis, de grandes universités comme le MIT, Berkeley, Carnegie-Mellon University, ou Stanford, ont créé des équipes importantes autour du VAC, qui collaborent avec les industriels, et dont les résultats ont alimenté les véhicules de démonstration réalisés ensuite par *Google* ou *Uber*. Le père de la voiture autonome de *Google* vient de Stanford ; *Uber*, qui doit déployer une flotte de VTC autonomes *Volvo* dans la ville de Pittsburgh aux États-Unis, travaille avec des chercheurs de Carnegie-Mellon University.

En Europe, l'Allemagne est en pointe avec des compétences importantes à l'université de Braunschweig, au *Karlsruhe Institute of Technology* ou à l'université de Berlin (AutoNOMOS Labs) ou encore au DFKI (Centre de recherche allemand sur l'intelligence artificielle). Ce pays se distingue surtout par un effort coordonné entre les pouvoirs publics, les industriels et la recherche académique. En Italie, l'université de Parme est devenue une référence mondiale sur le véhicule autonome. En France, de fortes compétences ont été développées chez Inria, à l'UTC, à l'IFSTTAR, à l'institut Pascal de Clermont-Ferrand.

La recherche en Europe s'est particulièrement illustrée sur les technologies de navettes autonomes, avec notamment les travaux qu'Inria a démarrés au tout début des années quatre-vingt-dix et qui ont permis la participation à une dizaine de projets européens.

En Asie, Singapour est un pôle de recherche très actif, avec une volonté affirmée de déboucher à relativement court terme sur des véhicules autonomes en milieu urbain. Enfin les universités chinoises avancent également très vite – *Shanghai Jiao Tong University (SJTU)*, *Tongji University* (Shanghai), *Tsinghua University*, *Jilin University*.



Le véhicule autonome Cybus, EP RITS, 2016 – © Inria / Photo G. Scagnelli



Les défis technologiques et scientifiques du VAC



La conception et le développement de véhicules autonomes et connectés d'un niveau d'autonomie de plus en plus élevé posent de formidables défis technologiques et scientifiques. Les mathématiques, le génie logiciel, l'intelligence artificielle ainsi que la cybersécurité sont parmi les principaux domaines des sciences du numérique impliqués.

Le tableau donné en annexe regroupe en trois catégories distinctes les différents domaines concernés par le développement du VAC :

- **Navigation autonome** : algorithmes et fonctions nécessaires à la prise de décision et à la navigation, depuis le capteur jusqu'à la locomotion ;
- **Intégration – systèmes embarqués** : aspects liés à l'intégration pratique des logiciels, à la fiabilisation et aux architectures fonctionnelles et matérielles et au temps réel mais aussi à la connectivité et la cybersécurité ;
- **Modélisation – intégration large échelle** : modélisation du trafic et des interactions VAC – usagers et usagers. Aspects collecte et fouille de données, télédiagnostic, simulation large échelle, offres de mobilité intelligente, etc.

La suite décrit les principaux défis scientifiques et technologiques liés au VAC, posés aux acteurs du monde numérique.

Il convient de préciser au préalable que pour relever la plupart de ces défis, il sera nécessaire de disposer d'une couverture réseau de bonne qualité. Sans bande passante minimale et surtout latence limitée, un VAC ne pourra pas fonctionner correctement. Ce problème sera très certainement limité en milieu urbain mais tout



GTL, Grenoble Traffic Lab, EP NECS, 2017 – © Inria / Photo C. Morel

à fait crucial sur l'essentiel du territoire où la notion de manque de couverture réseau performante est bien réelle. Bien entendu, les nouvelles technologies annoncées (5G...) ne constituent pas une réponse à part entière : on ne parle pas uniquement de performances mais surtout d'accès à la performance.

2.1 Les défis en lien avec la navigation autonome

Pour qu'un véhicule puisse naviguer de manière autonome, sans pilote, il faut qu'il sache **1) percevoir son environnement** à l'aide de multiples capteurs ; **2) analyser et interpréter** les données qu'il reçoit et **3) prendre des décisions** sur la conduite du véhicule.

La réalisation de ces fonctions fait face à de multiples défis scientifiques et technologiques résultant notamment de la contrainte de traitement en temps réel.

La perception multisensorielle

.....
Le véhicule autonome doit être capable de détecter et d'identifier tous les objets fixes ou mobiles de son environnement.
.....

Le véhicule autonome doit être capable de détecter et d'identifier tous les objets fixes ou mobiles de son environnement : les signalétiques verticales (feux tricolores, panneaux de signalisation, ...) et horizontales (marquages de zones, lignes de stop ou de cédez-le-passage, ...), les piétonnes, les piétons, les autres véhicules, les autres usagers et usagères de la route, les objets sur la route... Il lui faudra également suivre et prédire l'évolution des objets et des personnes dans le temps. Il doit enfin établir une carte de son environnement, et localiser sa propre position sur une carte locale et globale.

Ces fonctions sont réalisées grâce à de multiples capteurs, et à des algorithmes permettant d'analyser la scène à partir des données recueillies.

LES CAPTEURS

Des masses de données à traiter et à stocker

À l'horizon 2030, pour afficher un certain degré d'autonomie, un véhicule devra être équipé de radars, de capteurs à ultrasons, de plusieurs caméras fonctionnant dans le visible, le proche infrarouge et l'infrarouge lointain, de lidars (*Laser detection and ranging*) et de capteurs de navigation « à l'estime » (utilisés lorsque le GPS est inactif). Un premier défi sera donc de pouvoir traiter et stocker, en temps réel, la grande quantité de données engendrées par les multiples capteurs du véhicule.

Une nécessité : la fusion multicapteur

Tous les capteurs présentent des limitations qui les rendent inutilisables dans certaines conditions : masquages, portée réduite, biais, imprécisions... De plus, la défaillance d'un capteur peut surgir à tout moment. La fusion multicapteur, qui combine des données fournies par les différents capteurs pour obtenir une information globale pertinente, est un moyen de remédier à ce problème.

Dans un véhicule autonome et connecté, la fusion multicapteur est en fait une nécessité pour mener à bien les différentes tâches de perception. Par exemple, pour la détection et le suivi des obstacles, il faut fusionner les données d'un capteur laser et d'une caméra, ou d'un radar et d'une caméra. De même, la localisation globale du véhicule passe par une fusion des données de GNSS (localisation par satellite), d'INS (navigation inertielle) et d'odométrie (mesure de déplacement des roues).

La fusion de données reste aujourd'hui un grand défi, tant scientifique que technique. De multiples techniques de fusion sont exigées par les applications, mais aussi par les organes d'évaluation des véhicules. Ainsi, au niveau industriel, les exigences d'*Euro NCAP* (un organisme international d'évaluation) vont pousser les constructeurs à développer des systèmes de fusion de capteurs afin de qualifier leurs systèmes d'aide à la conduite (ADAS).



Prédiction de la collision et assistance à la conduite, EP CHROMA, 2015 – © Inria / Photo H. Raguet

L'INTERPRÉTATION DE LA SCÈNE

La détection des objets et des obstacles

Pour comprendre son environnement, le véhicule autonome doit d'abord savoir reconnaître les objets et les obstacles. Quels que soient les objets à détecter (piétonnes et piétons, véhicules, panneaux, ...), ce sont les techniques d'apprentissage automatique qui donnent actuellement les meilleurs résultats. Le « *deep learning* » (apprentissage profond) est considéré comme très prometteur, à condition de disposer d'une base d'apprentissage suffisamment importante. De nombreuses bases de données existent déjà pour divers types d'objets et notamment les véhicules, les piétonnes et les piétons, les panneaux routiers... Parmi les bases consacrées aux piétonnes et aux piétons, on trouve celle de *Daimler (Daimler Pedestrian Detection Benchmark)*, de *Caltech*, ou d'*Inria*.

Localisation locale et globale

Les techniques de localisation globale sont aujourd'hui bien maîtrisées. La fusion des données du GNSS (localisation par satellite), de la centrale inertielle, et de l'odométrie et/ou d'un compas magnétique est une technique actuellement assez répandue. Des méthodes ont été développées en vue de raffiner la localisation en s'appuyant sur les capteurs embarqués. La localisation dans des environnements urbains est un problème désormais presque résolu grâce à des méthodes de type SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*), qui consiste à construire ou améliorer une carte de son environnement et, simultanément, à s'y localiser.

En revanche, il demeure un réel défi consistant à localiser un véhicule dans un environnement ouvert, par exemple sur une autoroute. Les recherches s'orientent vers des méthodes combinant capteurs proprioceptifs (qui effectuent des mesures locales) et extéroceptifs (qui effectuent des mesures sur l'environnement global). L'enjeu est de fournir une solution de localisation avec une précision à l'échelle du mètre, voire du décimètre.

L'autonomie décisionnelle

L'autonomie du véhicule, c'est aussi sa capacité à prendre des décisions. L'unité centrale du véhicule, son « cerveau », doit décider de l'itinéraire à suivre, ou d'une manœuvre à effectuer, que ce soit de manière planifiée ou en réaction à un événement. Il décide alors d'envoyer vers les organes de locomotion du véhicule des consignes de déplacement (les trajectoires à effectuer), mais aussi la façon de le faire (paramètres de commande et consignes de vitesse, d'accélération, de freinage, etc.).

Le « cerveau » du véhicule doit aussi décider du niveau de partage de la conduite avec le conducteur à un moment donné. Ce sera la tâche d'un module d'arbitrage, dont le rôle est crucial, mais qui reste encore peu étudié.

PLANIFICATION D'ITINÉRAIRES

La planification d'itinéraires est aujourd'hui fondée sur des techniques bien maîtrisées. Mais il est désormais nécessaire de prendre en compte de nouveaux critères d'optimisation :

- **le modèle du trafic**, pour une meilleure estimation et prévision des temps de trajets ;
- **la consommation de chaque véhicule** en fonction de la topologie de chaque segment du trajet et de l'état du trafic, afin d'optimiser la consommation énergétique et l'émission de polluants ;
- **le confort des passagers et des passagères**, en minimisant par exemple la circulation dans des lieux « à risque », des chemins accidentés, ou comportant beaucoup d'intersections et de ronds-points.

PLANIFICATION DES MANŒUVRES

Le véhicule autonome doit décider des manœuvres à entreprendre en fonction de l'itinéraire planifié, de la situation routière courante et de l'état du conducteur, de la conductrice ou du véhicule. Il décidera par exemple s'il faut – ou si on peut – réaliser un dépassement, s'il faut déclencher un arrêt d'urgence (conducteur ou conductrice en détresse, panne, collision imminente).

Plusieurs approches existent pour élaborer des décisions. La logique floue par exemple est souvent utilisée pour élaborer des arbres de décision, en général fondés sur des règles établies ou apprises. Des schémas de décision peuvent également être élaborés par des techniques d'optimisation multicritères.

Les travaux sur la planification des manœuvres commencent à donner des résultats intéressants même s'ils restent encore limités. Ainsi, ils ne s'adressent généralement qu'aux routes multivoies présentant une direction unique. Sur des routes à double sens, il convient de prendre en compte les profils des véhicules arrivant dans l'autre sens et, par conséquent, de les ajouter au calcul de l'évaluation des risques. Il est nécessaire également de travailler sur des configurations routières encore plus contraignantes, tels que les intersections et les ronds-points, qui nécessitent des schémas de décision plus élaborés. Ceci passera probablement par l'intégration de modèles de comportement des automobilistes parvenant à ces intersections.

INTERACTIONS VÉHICULE-USAGÈRES ET USAGERS

Lorsqu'un véhicule autonome évolue sur une voie urbaine au trafic plus ou moins dense, il est nécessaire de prendre en compte les interactions avec ses usagères et usagers. Une collaboration entre des expertes et des experts en interfaces Humain-machine, des chercheurs et des chercheuses en intelligence artificielle permettra dans l'avenir d'élaborer de meilleurs modèles comportementaux intégrables aux systèmes décisionnels des véhicules.

PLANIFICATIONS DES TRAJECTOIRES

La planification des trajectoires géométriques des véhicules autonomes a beaucoup profité des méthodologies développées pour les robots mobiles autonomes. Toutefois, toutes les méthodes élaborées pour les robots ne sont pas immédiatement transposables au véhicule autonome, soumis à des contraintes supplémentaires.

Ainsi, de plus en plus de méthodes de planification reposent sur la modélisation des comportements et non sur une prédiction purement géométrique des trajectoires. Ce sont les techniques à base d'apprentissage (*deep learning* entre autres) qui sont alors mises en œuvre, avec l'idée d'apprendre des comportements types correspondant à différentes configurations routières.

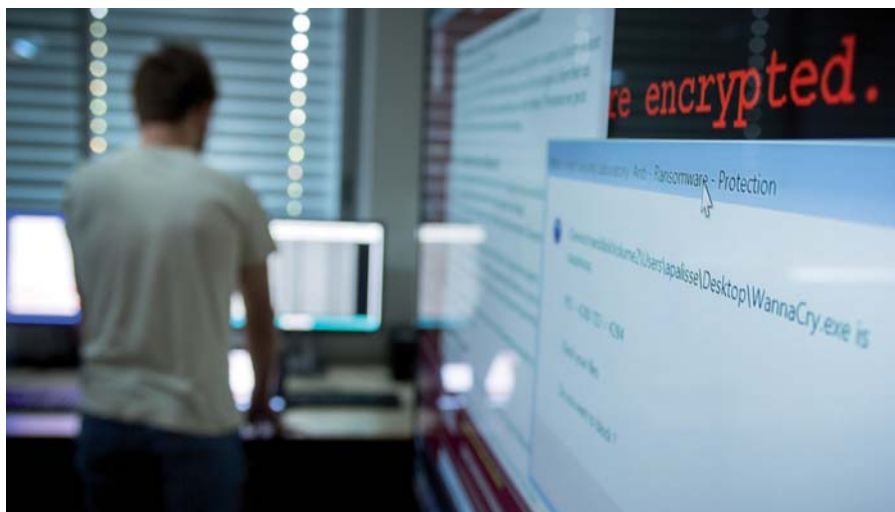
Ces techniques d'apprentissage devraient aussi permettre d'élaborer des profils types de conduite du conducteur ou de la conductrice humains afin de les reproduire lors de l'élaboration des trajectoires et des commandes associées. Des profils différents seront chargés dans l'unité centrale du véhicule selon son utilisation prévue : cars scolaires, véhicules privés sur autoroute, navettes urbaines à basse vitesse, etc.

Le contrôle-commande haut niveau

Les méthodes de contrôle-commande, inspirées de celles développées pour les robots mobiles, sont ici mises au service d'une commande de véhicule qui doit assurer de manière optimale :

- **la stabilité du véhicule ;**
- **le confort des passagères et des passagers,** avec des contraintes sur les accélérations longitudinales et latérales ;
- **l'évitement ou le rattrapage des glissements,** le contrôle du patinage.

Les modèles cinématique et dynamique sont différents de ceux d'un robot, mais les cadres théoriques sont les mêmes : commande des systèmes non linéaires, commande robuste, commande optimale, commande adaptative floue, commande prédictive MPC (*Model Predictive Control*), etc. Des lois de contrôle particulières sont également développées pour la conduite en convoi. Enfin, le développement spécifique de véhicules électriques impose que soient élaborés les modèles correspondants ainsi que des lois de commande adaptées.



Recherche sur les logiciels malveillants afin de détecter au plus vite les infections, EP TAMIS, 2017 – © Inria / Photo C. Morel

2.2 Les défis en lien avec l'intégration et la sûreté de fonctionnement

Dans le véhicule de demain, la composante logicielle constituera la majeure partie des coûts de production. L'intégration des logiciels à bord d'un véhicule hautement automatisé est donc un enjeu majeur. Un important effort de recherche est encore nécessaire sur de nombreux points.

La conception d'architectures embarquées

Le véhicule autonome, équipé de multiples capteurs, doit bénéficier de capacités de traitement en temps réel. Des unités de traitement spécifiques à base de processeurs multicœurs sont étudiées. Mais concevoir et développer des solutions efficaces embarquées à bord des véhicules reste un défi.

Les preuves formelles des algorithmes

Les algorithmes sont à la base de l'architecture décisionnelle. La validation de ces algorithmes, par des méthodes de preuves formelles, sera une nécessité juridique et économique (afin, en particulier, de réduire les coûts lors des phases de prototypage et de déploiement).

L'optimisation matérielle et logicielle

Aujourd'hui, les rares systèmes déployés à bord de véhicules (par exemple chez *Tesla*) n'intègrent que très peu de composants logiciels, si on les compare à une architecture globale de navigation ou de décision. Lorsque des millions de lignes de code seront embarquées, il faudra procéder à l'optimisation des architectures matérielles et logicielles, et sans doute concevoir des architectures matérielles dédiées.

Résilience, tolérance aux fautes, gestion des incertitudes

Aucun système existant aujourd'hui, à bord d'un véhicule, ne sait parfaitement gérer les défaillances et les erreurs, qu'elles proviennent du matériel, du logiciel ou des capteurs. Or, pour qu'un système intelligent soit robuste, il faudra que l'architecture embarquée fasse preuve de résilience. Il sera donc nécessaire, par exemple, d'assurer une duplication des fonctions réalisées par les systèmes embarqués. Ceci nécessitera non seulement le développement de solutions multiples pour réaliser les tâches, mais aussi des outils efficaces de supervision et d'ordonnancement.

La sécurité des systèmes informatiques et physiques

La sécurité des systèmes informatiques et physiques est une obligation. Il est également nécessaire de sécuriser les moyens de télécommunications embarqués afin d'éviter toute intrusion. Depuis l'apparition des premiers systèmes d'aide à la conduite (ADAS) sur le marché, de nombreuses défaillances ont conduit à des « rapatriements » de véhicules. Ces problèmes, liés à un défaut de qualité, ont amené l'industrie automobile à étudier sérieusement les moyens d'améliorer la qualité du développement logiciel. C'est l'objectif assigné à la norme ISO 26262, qui établit un cadre formel pour la mise en œuvre de cette réforme.

2.3 Les télécommunications et la cybersécurité des véhicules connectés

Assurer une communication fiable entre les véhicules

Le déploiement des véhicules autonomes et connectés ne pourra se faire sans une profonde adaptation des réseaux de télécommunications, et sans leur sécurisation. L'explosion du nombre d'agents communicants – les véhicules, mais aussi les serveurs informatiques de gestion des réseaux – aura un fort impact sur l'occupation des canaux de communication, aujourd'hui déjà largement saturés. Dans cette perspective, l'IEEE a décidé d'allouer une bande de fréquence autour de

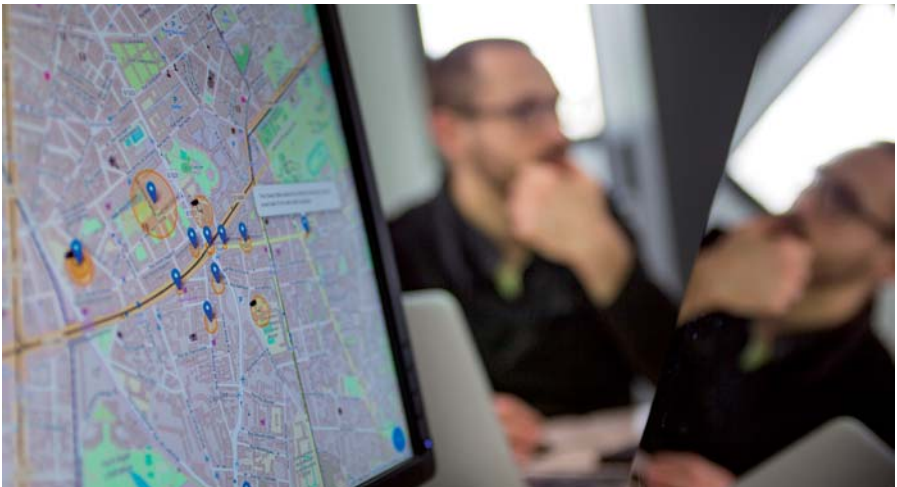
.....
La sécurité routière exige un échange d'informations hautement réactif et fiable entre véhicules voisins, dans n'importe quelle condition de densité de circulation.
.....

5.9 GHz dédiée aux applications véhiculaires (IEEE 802.11p).

La sécurité routière exige un échange d'informations hautement réactif et fiable entre véhicules voisins, dans n'importe quelles conditions de densité de circulation. Le défi est donc de concevoir des moyens de communications sans fil fiables dans des scénarios présentant de fortes densités.

Parmi les solutions actuellement étudiées, la technologie VLC (*Visible Light Communication*) assure une communication sans fil en utilisant la lumière visible. Très bien adaptée aux courtes distances, elle a très vite été envisagée pour des applications de véhicules autonomes circulant en convoi.

Mais pour une utilisation plus générale, il faudra prendre en compte l'hétérogénéité des réseaux de communication : les réseaux cellulaires, les réseaux maillés de faible puissance, le WiFi (faible consommation) et la technologie *Bluetooth* (faible puissance) peuvent répondre à différents besoins de communication d'un véhicule autonome et connecté. Chacun, cependant, utilise des compromis différents entre la fiabilité, la consommation d'énergie et le débit. Il est donc nécessaire d'étudier les limites de chaque technologie et d'élaborer des critères clairs pour sélectionner celle qui convient le mieux à chaque utilisation.



Informer les utilisateurs et utilisatrices d'appareils connectés de l'usage qui est fait de leurs données personnelles, EP PRIVATICS, 2018 – © Inria / Photo C. Morel

L'hétérogénéité des réseaux de communication impose aussi de régler la question de la transition d'une technologie à l'autre (« *handover* »). Cette problématique doit être étudiée dans le contexte d'un environnement dynamique et dense.

Enfin, pour éviter la saturation des réseaux, une solution possible est de mieux cibler les messages, grâce au réseautage géolocalisé (ou *GeoNetworking : Geographic Addressing and Routing*). Il consiste à restreindre et à diffuser les informations communiquées à un périmètre géographique limité et optimisé grâce à des techniques de routage dédiées.

Une exigence : la cybersécurité

L'un des grands problèmes posés aujourd'hui aux télécommunications reste celui de la vulnérabilité aux attaques externes.

L'un des grands problèmes posés aujourd'hui aux télécommunications reste celui de la vulnérabilité aux attaques externes. Pour les véhicules connectés, la question de l'intégrité et de la confidentialité des informations qui circulent sur les réseaux se pose de manière critique. Le pire scénario que l'on puisse envisager serait, par

exemple, la prise de contrôle à distance d'un véhicule connecté.

C'est pourquoi la cybersécurité devient une priorité pour les industriels du transport. Des moyens de protection existent déjà, mais il faut maintenant les intégrer au processus de développement des véhicules.

Les solutions de cybersécurité devront assurer :

- **des fonctions de pare-feu (firewall)** dans les interfaces avec les réseaux extérieurs, la détection des intrusions et la mise en place de protections ;
- **la sécurisation des communications internes**, des communications entre le véhicule et les systèmes d'information, ou des communications entre les véhicules, par chiffrement et signature ;
- **le « durcissement » des calculateurs embarqués** (protection des données et des programmes) ;
- plus globalement, **la sécurisation des systèmes d'information** impliqués dans la circulation des véhicules autonomes et connectés.

2.4 Le Big Data

Les systèmes de véhicules autonomes et connectés vont produire d'énormes quantités de données de différents types : des données fournies par les capteurs

embarqués sur les véhicules, des données de localisation, des flux d'images, mais aussi des courriers électroniques, des SMS, des données de divertissements. Un véhicule autonome connecté pourrait ainsi produire jusqu'à 1 Go de données par seconde. Sur la base d'un déploiement attendu de centaines de milliers de véhicules connectés, toutes ces données devront être stockées, gérées, et traitées de manière automatique par des centres de recherche, des opérateurs, et des utilisateurs à des fins diverses. Les modalités de stockage et de traitement de ces masses de données sont encore à définir et représentent un réel défi, tant sur le plan économique que technique, sans oublier les aspects éthiques liés à la confidentialité des données à caractère personnel.

Les techniques du *Big Data* (traitement de très grands volumes de données) seront mises en œuvre pour extraire de l'information exploitable à partir des sources de données embarquées. L'exploitation des données par des méthodes de « *data mining* » devrait d'abord conduire à mieux connaître les habitudes, les préférences et les besoins de l'usager ou l'usagère du véhicule. Elle contribuera ensuite au développement de nombreuses applications d'assistance à la conduite, ou servira de support pour des services aux consommateurs et consommatrices, aux opérateurs ou aux exploitants.

De nombreuses applications sont attendues. Elles concerneront notamment :

- **Les données sécuritaires hautement prioritaires**, voire en temps réel (situations d'urgence, événements fortuits, évitement de collision...);
- **Les informations de service aux consommateurs et consommatrices** (assurance, autodiagnostic, détection/prévention de défaillances...);
- **Les données utiles au confort du conducteur, de la conductrice** ou des passagers et passagères (disponibilité de places de parking, données géographiques, publicités adaptées...);
- **La gestion et l'optimisation de l'énergie** (optimisation du profil de vitesse)
- **La gestion de trafic** (congestions, fermetures de voies...);
- **Une assistance pour rendre la conduite plus confortable** (choix du profil de conducteur ou conductrice automatique, paramétrage du contrôle du véhicule...).

2.5 La simulation

Un véhicule autonome et connecté, comme tout système automatisé, doit passer par une phase d'homologation et de certification. Mais comme il est impossible de lui faire parcourir les millions de kilomètres qui seraient nécessaires pour évaluer son taux de défaillances dans de multiples conditions, la solution réside dans la simulation.

La simulation d'un véhicule autonome et connecté est un problème particulièrement difficile. En effet, quand bien même chaque sous-système pourrait individuellement être validé par simulation, comment valider la complexité du système intégré, en utilisation réelle sur la route ? Il faudrait simuler le fonctionnement de toutes les briques technologiques simultanément, mais aussi la complexité des scènes routières, les comportements des autres conducteurs et conductrices et leurs réactions face à des situations prévisibles ou non, tout en prenant en compte le fonctionnement simultané d'un grand nombre de véhicules autonomes.

La conclusion est qu'il n'existe aujourd'hui aucun simulateur adapté à toutes les fonctionnalités du véhicule autonome et connecté. Le futur simulateur dédié au VAC devra donc comporter, entre autres, des modèles de trafic, des modèles comportementaux de conducteurs divers, des modèles cinématiques et dynamiques des véhicules, des modèles des capteurs (incluant les imprécisions et incertitudes de mesure), des modèles d'environnement réalistes avec des scènes urbaines, périurbaines ou autoroutières, des modèles d'environnement météorologiques (pluie, neige, brouillard, ...), et des modèles de communications.

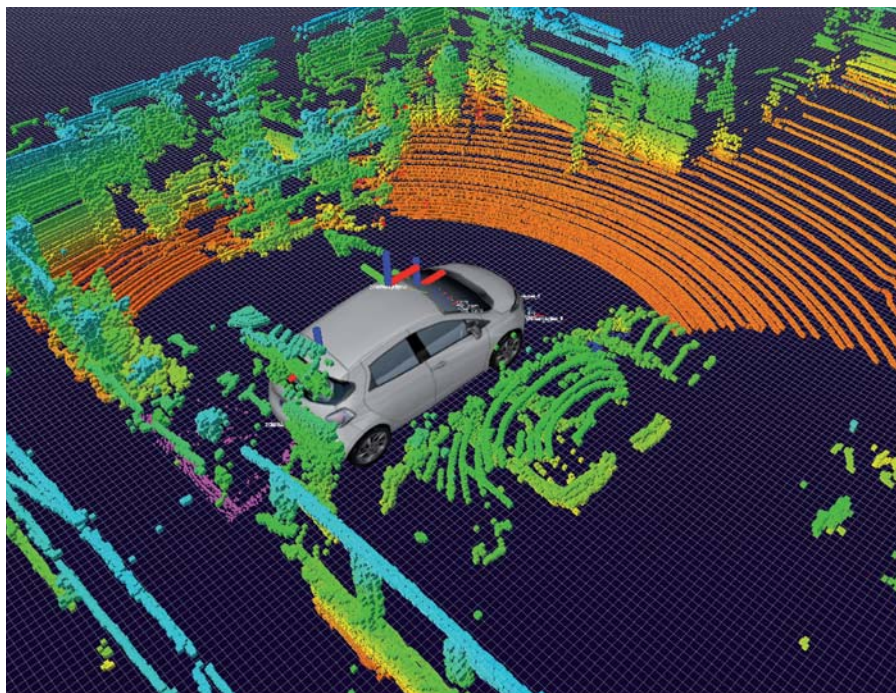
Les simulateurs disponibles aujourd'hui ne prennent en compte que certains de ces aspects.

2.6 La modélisation des grands systèmes : trafic routier et gestion de flottes

Avec un grand nombre de véhicules connectés qui sillonnent les routes et les rues, la modélisation du trafic va pouvoir s'enrichir des données collectées par les véhicules jouant le rôle de capteurs en mouvement. L'évolution de la circulation sur un réseau routier peut être décrite par des modèles microscopiques (où l'on suit la trajectoire de chaque véhicule, la formation de bouchons...), mésoscopiques ou encore macroscopiques (prédiction du trafic), où le trafic est traité comme un fluide circulant sur le réseau.

Le trafic peut être étudié et modélisé comme un grand système « aléatoire », en s'appuyant sur diverses approches mathématiques. Par exemple, par l'exploitation de méthodes probabilistes ou issues de la physique statistique.

Plusieurs travaux récents en mathématiques appliquées et en ingénierie des transports étudient l'impact de l'introduction des véhicules autonomes et connectés dans la circulation routière. Ces recherches visent, par exemple, à exploiter les communications entre véhicules dans le but d'augmenter le débit, l'efficacité et la sécurité



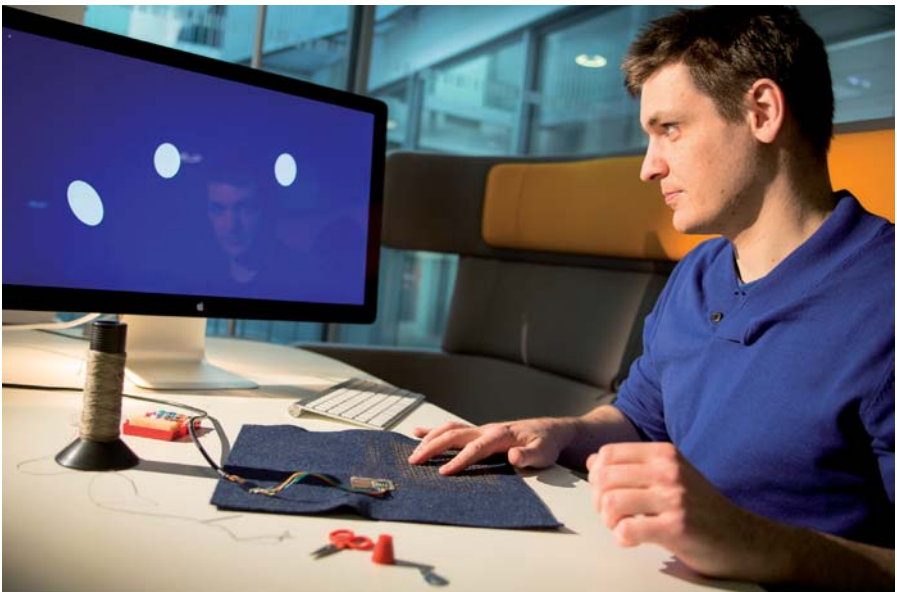
Nuage de points de l'environnement proche de la voiture mesuré par les 5 télémètres qui équipent le véhicule – © Inria / EP CHROMA

du trafic. En effet, une gestion optimale des changements de voie et des intersections pourrait conduire à une meilleure utilisation de l'espace sur les routes, et réduire ainsi la chute de capacité due aux intersections. Pour aller encore plus loin, on peut imaginer de contrôler des véhicules autonomes et connectés pour stabiliser le trafic en empêchant l'apparition des vagues « *stop-and-go* », et améliorer ainsi la fluidité du trafic. Plusieurs études ont montré des résultats très prometteurs, même pour des faibles taux de pénétration de ce type de véhicules : la congestion peut être complètement éliminée avec seulement 25 % de véhicules fonctionnant avec un ACC (*Adaptive Cruise Control*, régulateur de vitesse adaptative).

La modélisation a aussi un rôle important à jouer dans la gestion de flottes, par exemple d'un ensemble de véhicules partagés, où l'un des principaux problèmes est la réallocation des véhicules sur un réseau urbain de plus en plus dense et dynamique. C'est typiquement un problème d'optimisation multicritère, où le nombre de véhicules et leur répartition par station dépend de nombreux aspects : les distances parcourues, l'autonomie énergétique des véhicules, la topologie des segments du réseau routier, etc.

2.7 Les interfaces Humain-machine

Avec les nouvelles fonctions intégrées à bord des véhicules, mais aussi le changement des modalités de conduite, des interfaces Humain-machine (IHM) spécifiques doivent être conçues pour les véhicules autonomes et connectés. L'IHM va devenir un élément essentiel du véhicule, car il sera impératif de hiérarchiser les informations présentées au conducteur ou à la conductrice, aux passagers et aux passagères, en fonction des priorités, des alarmes, des urgences... Ces nouvelles interfaces Humain-machine seront dédiées aux occupantes et occupants du véhicule, mais aussi aux autres usagères et usagers de la route avec qui des interactions seront désormais nécessaires. Elles seront conçues avec l'assistance d'ergonomes, d'expertes et d'experts des facteurs humains dans le domaine de la mobilité en général. Ces équipes devront en particulier étudier un point clé de l'interface Humain-machine dans un VAC : l'arbitrage entre le pilotage automatique et le pilotage par le conducteur ou la conductrice, en fonction des contextes et des situations.



Tissu intelligent : pavé tactile multi-points brodé, MJOLNIR, 2016 – © Inria/Photo C. Morel



L'impact sociétal, légal et éthique d'un déploiement du VAC



Le véhicule autonome et connecté ne sera pas seulement un système d'une grande complexité technologique, son déploiement à grande échelle induira des changements profonds dans le fonctionnement de la société, qui toucheront l'organisation des villes, les usages des transports, la responsabilité civile des industriels et des opérateurs de la mobilité.

L'arrivée de « véhicules robots » soulève aussi des questions éthiques. Par sa haute technicité et la grande diffusion à laquelle il est promis, le véhicule autonome et connecté concentre une large part des questions habituellement liées au numérique dans la société : sécurité, transfert de responsabilité, prise de décision par des intelligences artificielles, sécurisation des communications, respect de la vie privée et des données à caractère personnel, etc.

Un impact direct sur la vie de la société

L'organisation et la structure des villes devraient être considérablement transformées par l'arrivée du véhicule autonome et connecté. Le VAC sera une composante essentielle des futures « villes intelligentes » (*smart cities*).

En effet, avec les nouveaux services de transport, collectifs ou privés, utilisant de manière intensive des véhicules autonomes partagés (voitures ou navettes le plus souvent), le nombre de voitures circulant au cœur des agglomérations pourrait être notablement réduit. Ceci explique l'intérêt de nombreuses villes dans le monde pour une expérimentation de navettes ou de taxis autonomes (ou « taxis-robots »). Une étude réalisée en 2013 par *Columbia University* montre les effets spectaculaires que l'on peut attendre de l'introduction des VAC dans une ville. Pour la ville de Ann Arbor (Michigan) dont la population de 285 000 habitants détient au total 200 000 véhicules, les auteurs de l'étude ont calculé la taille de la flotte partagée qui serait nécessaire pour satisfaire les besoins de mobilité de l'ensemble de la population, sans lui imposer pour autant des temps d'attente trop longs. Avec seulement 18 000 véhicules, la flotte de véhicules autonomes et partagés permettrait un temps d'attente moyen inférieur à une minute, pour un taux d'utilisation des véhicules de 70 % durant les heures de la journée.

En fait, avec le remplacement progressif des voitures privées par des véhicules « à la demande », c'est le lien de propriété entre le conducteur ou la conductrice et son véhicule qui va se modifier. L'automatisation complète du véhicule pourrait même laisser entrevoir la fin du permis de conduire mais également la perte de compétence des conducteurs ou des conductrices devenus des passagers ou des passagers passifs... À plus long terme, on imagine que des enfants pourraient se rendre seuls à l'école dans des navettes autonomes et que des personnes en situation de handicap pourront bénéficier d'une mobilité accrue.

De nouvelles questions légales

Quand un véhicule autonome prend automatiquement, sans intervention humaine, des décisions qui engagent la sécurité des passagères, des passagers, des piétonnes, des piétons et des autres véhicules, qui est responsable des conséquences ? Le transfert de la responsabilité de la conduite, du conducteur ou de la conductrice vers les constructeurs ou les fabricants de composants « intelligents » du VAC, est une question nouvelle pour les juristes, mais aussi pour les assureurs.

Une éthique de la conduite à réinventer

S'il fallait édicter un premier principe éthique du VAC, il pourrait s'exprimer ainsi : le développement des véhicules autonomes et connectés ne se justifie que s'il se traduit par une diminution substantielle du nombre et de la gravité des accidents de la route.

Quand bien même la perception de l'environnement et des risques par un VAC, au vu des technologies déjà disponibles, deviendrait meilleure que celle de l'Homme, il restera néanmoins impossible d'empêcher totalement les accidents. Le déploiement des véhicules automatisés va créer une situation nouvelle à laquelle les gouvernements, les entreprises et la société tout entière doivent se préparer.



CityMobil2, projet européen co-financé par le FP7 – © City of León - CityMobil2

La question éthique cruciale posée au VAC est déjà bien identifiée. Quand un véhicule est confronté à deux options de conduite présentant toutes deux un risque pour la vie humaine – par exemple : heurter un autre véhicule ou changer de direction au risque de faucher des piétonnes ou des piétons – quelle sera la décision et comment doit-elle être prise ? Peut-on confier à une intelligence artificielle la tâche de trancher ce dilemme ?

Une décision prise par un VAC, sans intervention humaine, n'est en définitive que le résultat de l'exécution d'un programme informatique : qui définira les règles éthiques inscrites dans ce programme ? Qui vérifiera que les bases de données utilisées pour l'apprentissage des intelligences artificielles sont suffisantes et n'induisent pas des biais ? Le problème est similaire à celui qui se pose déjà pour les robots ou pour les programmes d'intelligence artificielle, mais avec des conséquences, dans le cas du VAC, qui peuvent être dramatiques. Personne n'a aujourd'hui de réponses à ces questions. Mais c'est dès maintenant, pendant que l'on travaille sur les futures technologies du VAC, qu'il faut se les poser.

Référence : La commission d'éthique du ministère des Transports du gouvernement allemand a publié un rapport en juin 2017, qui propose vingt règles éthiques à suivre pour le développement des VAC.

<https://www.bmvi.de/SharedDocs/EN/publications/report-ethics-commission.html?nn=187598>



Quatre questions stratégiques sur le véhicule autonome et connecté



Pour tous les industriels, qu'ils soient constructeurs de véhicules, équipementiers, opérateurs de transport, éditeurs de logiciels ou fabricants de composants électroniques, l'évolution vers le véhicule autonome est inéluctable. Mais son déploiement à grande échelle ne sera possible qu'à la condition de trouver des réponses à quatre questions stratégiques, aujourd'hui non résolues, que nous développons dans la suite et pour lesquelles nous listons les points forts d'Inria.

4.1 Comment assurer la sécurité des systèmes et des communications fiables ?

Le véhicule autonome et connecté est un assemblage de systèmes – un « système de systèmes » – dont la majorité des composants seront des logiciels. Un premier défi sera donc d'assurer la sécurité du véhicule en étudiant la fiabilité et la tolérance aux pannes des systèmes qui le composent. Un second défi est de protéger ces systèmes contre les cyberattaques.

Deux verrous principaux doivent être levés :

- **La gestion des incertitudes**, dans des dispositifs embarqués qui interagissent avec l'environnement, que ce soit en matière de localisation, de perception, ou de prise de décision.
- **La sûreté de fonctionnement et la résilience** : quelles que soient les perturbations rencontrées, le système doit continuer à fonctionner avec le niveau de sécurité requis.

La solution passe par l'optimisation et la vérification des logiciels, les preuves formelles d'algorithmes, les tests, et la validation.

POINTS FORTS D'INRIA

Inria a développé depuis longtemps un savoir-faire dans la sécurité des systèmes, en particulier dans le domaine aéronautique. Cette expertise peut être adaptée au contexte de l'automobile. L'institut est également à la pointe dans la recherche sur la cybersécurité. Un sujet émergent sur lequel Inria est particulièrement bien placé concerne la collaboration entre intelligence artificielle et méthodes formelles pour la preuve et la vérification de logiciels et de systèmes. Inria a des collaborations très étroites avec les développeurs et industriels et les organes de normalisation et d'homologation.

4.2 Un véhicule autonome peut-il comprendre son environnement ?

La perception de l'environnement du véhicule au moyen de multiples capteurs est l'objet de nombreuses recherches, mais reste une question difficile dans le développement de systèmes de navigation. Les capteurs étant imparfaits, il est nécessaire de développer des schémas de fusion multicapteur robustes et efficaces, afin de réaliser une modélisation géométrique de l'environnement du véhicule, mais aussi une modélisation sémantique (l'identification des objets perçus : bandes et voies de circulation, panneaux, piétonnes, piétons, autres véhicules...) permettant une compréhension complète de la scène.

Deux voies de recherche doivent être explorées. La première est la fusion de données imprécises, incertaines, biaisées, retardées (latences) et asynchrones. La deuxième est l'élaboration de modèles permettant une analyse sémantique de la scène comportant la détection et l'analyse des comportements dynamiques.

POINTS FORTS D'INRIA

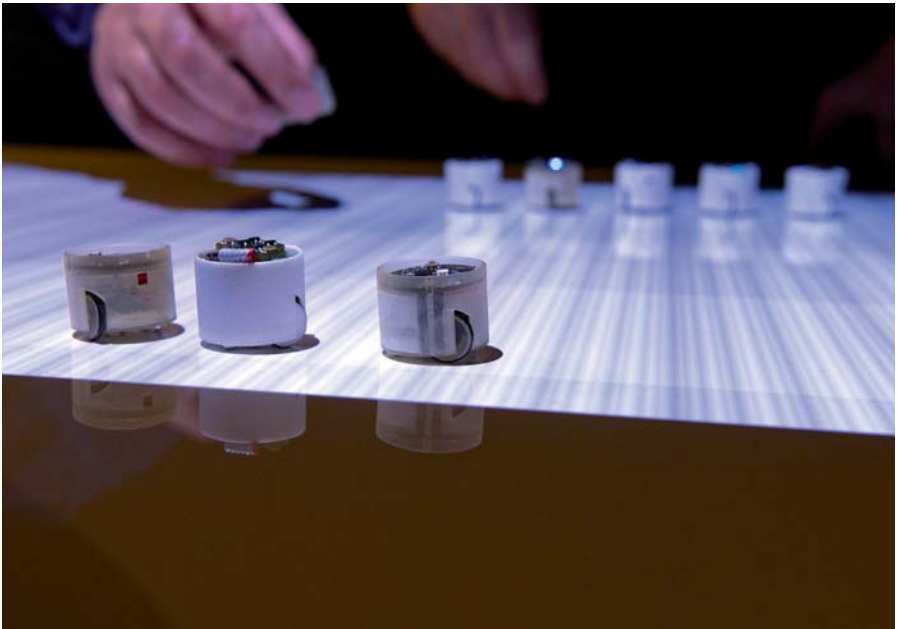
Inria a une expertise mondialement reconnue en perception de l'environnement à partir de divers types de capteurs ainsi qu'en fusion multicapteur. Ses équipes produisent des théories, algorithmes et logiciels avancés pour la perception, allant de la perception de la forme de l'environnement, de mouvements, jusqu'à la détection d'objets, leur reconnaissance, voire encore la détection de l'état émotionnel d'un interlocuteur ou d'une interlocutrice (par exemple, la conductrice ou le conducteur). Ainsi, Inria dispose de compétences et savoir-faire pour doter les VAC des capacités de perception géométrique et sémantique requises pour leur bon fonctionnement.

4.3 Un pilote automatique peut-il être intelligent ?

Lorsqu'un véhicule circule en mode totalement automatique, c'est son logiciel qui doit prendre les bonnes décisions assurant la conduite et la sécurité. Il doit analyser ce qu'il perçoit pour adapter de façon dynamique sa trajectoire. Les systèmes de décision avancés qui équiperont les véhicules autonomes seront par conséquent très complexes.

Les schémas de décision devront incorporer :

- **des modèles de comportement des différents usagères et usagers de la route**, mais aussi des interactions entre les usagères et usagers et le véhicule autonome. L'élaboration des systèmes décisionnels repose sur des techniques d'apprentissage de comportement, et sur des techniques d'intelligence artificielle (*deep learning*, apprentissage par renforcement, ...) dans lesquelles le système apprend par essais et erreurs. Il est donc nécessaire de collecter des quantités importantes de données couvrant divers scénarios, afin d'alimenter les algorithmes d'apprentissage ;
- **des modèles qui prennent en compte l'intégration du VAC dans le flot routier ;**
- **les interactions avec les autres usagères et usagers de la route : piétonnes, piétons, autres véhicules...** Par exemple, la gestion des priorités de passages dans les intersections ou les ronds-points, la négociation et la gestion des dépassements, etc. ;
- **le partage de la conduite entre le conducteur ou la conductrice et le (co)pilote automatique.** Ce domaine, appelé « arbitrage », est encore largement inexploré. Il nécessite la connaissance de l'état dynamique du conducteur ou de la conductrice, du système, de la tâche de conduite et des risques potentiels.



Le mouvement de chaque Zooïde est coordonné par un ordinateur central qui collecte en temps réel leur position; EP AVIZ, 2017 – © Inria/Photo G. Scagnelli

POINTS FORTS D'INRIA

Inria est l'un des acteurs majeurs en intelligence artificielle et ses différentes branches, qu'il s'agisse de l'apprentissage automatique, de la fouille de données, de la représentation de connaissances ou encore de techniques de raisonnement sous incertitudes. La réalisation de véhicules intelligents reposera, outre des approches de perception (voir plus haut) et raisonnement, sur la mise en œuvre de systèmes de collecte, traitement et stockage de données passant à l'échelle. Cela comprend naturellement le calcul haute performance et/ou distribué et la conception d'architectures de calcul dédiées, qui sont autant de domaines d'expertise d'Inria.

4.4 Comment valider un système aussi complexe ?

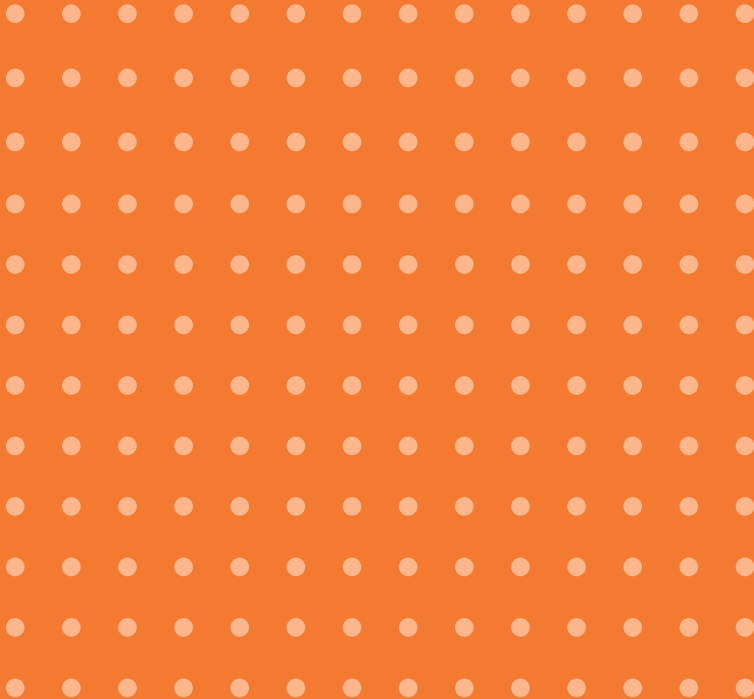
Pour évaluer la fiabilité d'un véhicule autonome, il faudrait disposer de données réelles représentant les nombreux scénarios auxquels il risque d'être confronté. Ces données manquent, et il est impossible d'effectuer les millions de kilomètres qui permettraient de les recueillir. La conception d'un véhicule autonome passera donc nécessairement par le prototypage virtuel et la simulation. Aujourd'hui, les simulations mises en œuvre pour la conception des véhicules se limitent aux organes mécaniques et électroniques. Le développement d'outils capables de simuler simultanément toutes les briques technologiques, incluant les comportements des humains, mais également les différentes conditions météorologiques par exemple, reste un véritable défi.

POINTS FORTS D'INRIA

Un simulateur « universel » n'existe pas et est à concevoir dans ce domaine. Inria est bien armé pour y arriver, grâce à ses chercheurs et ses chercheuses spécialisés en modélisation et simulation de phénomènes physiques complexes, en calcul haute performance, en rendu visuel ou encore en visualisation scientifique.



Annexe



L'implication d'Inria au service du VAC – domaines scientifiques et équipes concernées

Inria développe des recherches sur les véhicules autonomes depuis plus de deux décennies et sur le véhicule autonome et connecté depuis plusieurs années. Si ces activités étaient initialement menées principalement par des équipes de robotique, cela concerne désormais un nombre de plus en plus grand d'équipes d'autres domaines, comme ce livre blanc le montre. Le tableau suivant fournit un aperçu des domaines scientifiques en lien avec le VAC qui sont abordés chez Inria et donne une liste des 35 équipes déjà actives dans ce domaine.

Il les regroupe en trois grandes catégories :

- **Navigation autonome** : algorithmes et fonctions nécessaires à la prise de décision et à la navigation, depuis le capteur jusqu'à la locomotion.
- **Intégration – systèmes embarqués** : aspects liés à l'intégration pratique des logiciels, à la fiabilisation et aux architectures fonctionnelles et matérielles et au temps réel mais aussi à la connectivité et la cybersécurité.
- **Modélisation – intégration large échelle** : modélisation du trafic et des interactions VAC – usagers. Aspects collecte et fouille de données, télédiagnostic, simulation large échelle, offres de mobilité intelligente etc.

Il est utile de préciser qu'il existe beaucoup d'autres équipes potentiellement concernées par ce vaste sujet qu'est le VAC. Inria a la capacité de les mobiliser en fonction des projets et des initiatives qui ne manqueront pas d'éclorre tant dans le monde académique – on peut penser par exemple à des projets de recherche financés par la Commission européenne – que dans le monde industriel où des alliances rapprochant constructeurs, équipementiers et acteurs du numérique ont déjà vu le jour.

Navigation autonome		
FONCTIONS	DOMAINES	ÉQUIPES-PROJETS INRIA
Perception et interprétation de l'environnement	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Apprentissage automatique · Modélisation · Filtrage numérique · Fusion de données multicapteurs · Fusion multialgorithmes · Aide à la décision 	CHROMA FLOWERS HEPHAISTOS LARSEN MNEMOSYNE RAINBOW RITS STARS
Localisation globale et locale	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Filtrage numérique · Fusion multisensorielle · Filtrage numérique · Modélisation cinématique/dynamique · Aide à la décision 	CHROMA HEPHAISTOS LARSEN NON-A RAINBOW RITS
Planification globale et locale d'itinéraires et de trajectoires, customisation des profils de conduite	<ul style="list-style-type: none"> · Apprentissage automatique · Robotique · Aide à la décision · Planification, optimisation 	CHROMA FLOWERS MNEMOSYNE NON-A RITS SEQUEL
Contrôle, Commande, Autopilote	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Robotique · Aide à la décision · Contrôle non linéaire, robuste · Commande centralisée/décentralisée 	DISCO HEPHAISTOS NECS RAINBOW RITS SEQUEL
Evaluation des risques, véhicule auto-apprenant, décision d'actions, profilage de conducteurs et de conductrices	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Décision sous incertitudes · Inférences heuristiques et statistiques · Apprentissage automatique · Décision distribuée · Robotique 	CHROMA LARSEN RITS SEQUEL
Interactions véhicule-usagers de la route, modélisation du comportement	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Modélisation des interactions V2V et véhicule-usagers · Systèmes multiagents 	CHROMA LARSEN NECS RITS

Intégration – Systèmes embarqués

FONCTIONS	DOMAINES	ÉQUIPES-PROJETS INRIA
Intégration, conception d'architectures temps réel ou distribuées	<ul style="list-style-type: none"> · Architectures temps réel · Sécurité logicielle · Preuves formelles · Résilience des systèmes, tolérance aux fautes · Architectures reconfigurables, distribués · Parallélisme 	AOSTE DIVERSE EVA SPADES TOCCATA
Ordonnancement de tâches et de processus, planification distribuée, autodiagnostic, superviseurs	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Apprentissage automatique · Aide à la décision · Planification, optimisation · Modélisation de connaissances 	AOSTE NEO RITS SPADES TAMIS
IHM, ergonomie	<ul style="list-style-type: none"> · Robotique · Interaction, interfaçage · Ergonomie, facteurs humains 	LOKI TAU
Monitoring des conducteurs, arbitrage (partage de conduite)	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Aide à la décision · Modélisation de connaissances 	RITS
Modélisation de systèmes – intégration à large échelle		
Modélisation et gestion du trafic (routier, mais aussi piétonnier)	<ul style="list-style-type: none"> · Physique statistique · Analyse macroscopique : gestion de flotte, reconstruction de trafic · Analyse microscopique : description locale du trafic, formation de bouchons · Modélisation stochastique de systèmes · Optimisation (de flux), optimisation énergétique 	ACUMES COFFEE COMMANDS INOCs MAGNET MEXICO NECS NEO RITS
Sémantique des situations de conduite et contextes routiers	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Apprentissage automatique · Modélisation de connaissances 	CHROMA

Offres de mobilité intelligente	<ul style="list-style-type: none"> · Optimisation · Apprentissage automatique · Aide à la décision 	COATI GANG KAIROS MAGNET NECS NICS
Cartographie étendue ou collaborative	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Apprentissage automatique · Aide à la décision 	RITS
Validation et certification	<ul style="list-style-type: none"> · Preuve automatique · <i>Model checking</i> 	AOSTE MEXICO TAMIS
Constitution de bases de test, génération de scénarios	<ul style="list-style-type: none"> · Apprentissage automatique · Aide à la décision · Modélisation de connaissances 	MEXICO TAU
Stratégies de maintenance, télédiagnostic	<ul style="list-style-type: none"> · Traitement du signal, d'images · Apprentissage automatique · Robotique 	
Fouille de données, <i>Big Data, crowd-sensing</i> mobile	<ul style="list-style-type: none"> · Apprentissage automatique · Aide à la décision · Analyse statistique 	MAGNET MODAL SEQUEL SPIRALS
Communications V2X, Cybersécurité	<ul style="list-style-type: none"> · Protocoles et réseaux IP, standards · VANETs et réseaux mobiles · Algorithmique distribuée · Routage dynamique, <i>GeoNetworking</i> · Optimisation dans les réseaux · Cryptologie et chiffrement 	EVA FUN NEO PETRUS TAMIS
Simulation de systèmes	<ul style="list-style-type: none"> · Simulation de systèmes complexes · Simulation de trafic, de communication et de dynamique véhicule · Génération de scénarios de conduite 	DIVERSE RITS TAU
Conception de la route intelligente	<ul style="list-style-type: none"> · Modélisation physique · Traitement du signal, d'images 	I4S

Glossaire

■ ACC (*Adaptive Cruise Control*)

Technologie qui adapte la vitesse du véhicule de manière à garder une distance de sécurité avec le véhicule précédent.

■ ADAS (*Advanced Driver Assistance Systems*)

Dispositifs permettant d'assurer tout ou partie des tâches de conduite avec un niveau d'automatisation entre 2 et 4 (selon la classification SAE).

■ AFNOR (*Association française de normalisation*)

<https://www.afnor.org>

■ CACC (*Cooperative Adaptive Cruise Control*)

Technologie de contrôle adaptatif de la vitesse basée sur les télécommunications et non plus sur des capteurs (voir ACC).

■ CEN (*Comité européen de normalisation*)

Le CEN est une association qui réunit les organismes de normalisation nationaux de 34 pays Européens, dont l'AFNOR pour la France.
<https://www.cen.eu>

■ ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*)

Organisme qui produit des standards pour les technologies de l'information et de la communication.
<http://www.etsi.org/>

■ IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

Association professionnelle constituée d'ingénieurs électriciens, d'informaticiens, de professionnels du domaine des télécommunications, etc. Elle a pour but de promouvoir la connaissance dans le domaine de l'ingénierie électrique.
<https://www.ieee.org/>

■ IETF (*Internet Engineering Task Force*)

Groupe informel, international, ouvert à tout individu, qui participe à l'élaboration des standards Internet. L'IETF produit la plupart des nouveaux standards d'Internet.
<https://www.ietf.org/>

■ IHM (*Interface Humain-machine*)

Ensemble des dispositifs matériels* et logiciels permettant à un utilisateur d'interagir avec un système informatique.

■ ISO (*International Organization for Standardization*)

Organisation internationale de normalisation ; le membre Français est l'AFNOR.
<https://www.iso.org/fr/home.html>

■ SAE (*Society of Automotive Engineers*)

SAE est une organisation mondiale composée de scientifiques, d'ingénieurs et de professionnels qui œuvrent pour faire évoluer le véhicule automoteur et la connaissance des systèmes. Elle a proposé la classification en 5 niveaux d'autonomie du véhicule.
<http://fr.sae.org/>

■ V2I (*Vehicle to Infrastructure communications*)

Réseau de communications entre les véhicules et l'infrastructure.

■ V2V (*Vehicle to Vehicle communications*)

Réseau de communications entre les véhicules.

■ V2X (*Vehicle to X communication*)

Terme générique pour la communication entre un véhicule et X (d'autres véhicules, infrastructure, passagers, etc.).

■ VAC (*Véhicule Autonome et Connecté*)

Véhicule capable de se déplacer de manière partiellement ou totalement autonome et connecté à l'infrastructure routière, à d'autres véhicules et/ou aux autres usagers de la route à l'aide de moyens de télécommunication sans fil.

■ VANET (*Vehicular Ad-Hoc Network*)

Réseau de communication *ad hoc* formé entre un groupe de véhicules à portée les uns des autres et entre les véhicules et les équipements fixes à portée.

