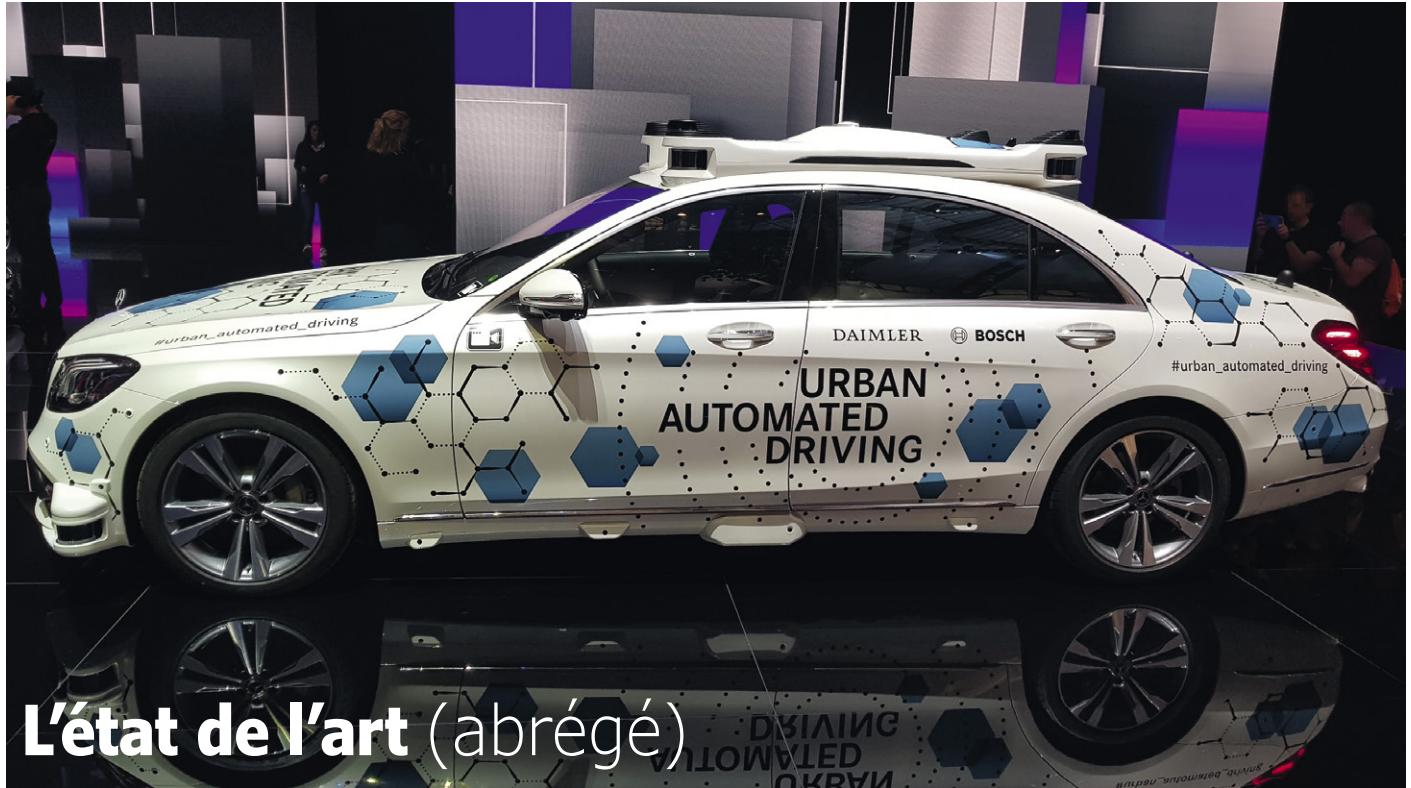


véhicules autonomes : où nous mènent-ils ?



(Source : Viacheslav Gromov, IAA)

L'état de l'art (abrégé)

Viacheslav Gromov (Allemagne)

La conduite autonome est à la mode et ça fait des gros titres américains avec des accidents graves impliquant le pilote automatique. Tandis que les grands constructeurs d'automobiles européens cherchent à s'allier pour rester compétitifs, en Chine et en Finlande, les bus autonomes sont en route. Où en sommes-nous aujourd'hui ? Que recherchons-nous en matière de mobilité et quels sont les défis sociaux ?

La conduite autonome est à la mode et ça fait des gros titres américains avec des accidents graves impliquant le pilote automatique. Tandis que les grands constructeurs d'automobiles européens cherchent à s'allier pour rester compétitifs, en Chine et en Finlande, les bus autonomes sont en route. Où en sommes-nous aujourd'hui ? Que recherchons-nous en matière de mobilité et quels sont les défis sociaux ?

L'assistance informatique dans les véhicules, telle que nous la connaissons aujourd'hui p. ex. sous forme d'alerte de changement de voie, a une longue histoire technologique, passionnante dès le début. Dès 1914, des avions bénéficiaient d'une stabilisation assurée par un pilote automatique gyroscopique, probablement le premier jalon de l'automatisation des commandes. Plus tard, les véhicules autonomes (appelés VA dans la suite de cet article) ont été conçus à des fins militaires (p ex. pour la détection de mines). En matière de prospective automo-

bile, nous raffolons de visions spectaculaires, qui nous feront hausser les épaules quelques décennies plus tard. Témoin le modèle filoguidé de la **fig. 1** [1].

Promesses

En 2019, les arguments de poids en faveur de la conduite autonome sont les suivants : sécurité (une erreur humaine est à l'origine d'environ 90 % des accidents), confort, mobilité totale pour tous et délestage des axes de circulation avec une meilleure efficacité environnementale. En matière de sécurité, souvent considérée comme l'argument primordial, on considère que les VA réduisent les causes relativement fréquentes d'accidents causés par les humains (inattention, alcool...) grâce aux procédés C2X (j'y reviens ci-dessous), tandis que seul un nombre réduit de nouveaux scénarios d'accidents apparaissent avec les VA, suite par exemple à des erreurs de calcul ou à des actes de piratage. Cependant, la

preuve irréfutable de cette sécurité accrue reste à administrer. Pour l'instant, les discussions continuent donc d'aller bon train, d'autant que le sujet interpelle aussi les sciences humaines. Avec un VA, le permis de conduire n'est plus requis, de sorte que des groupes sociaux aujourd'hui exclus de la circulation automobile pourraient désormais utiliser un tel VA. Dans les zones rurales p. ex., des minibus pourraient être appelés directement par des usagers.

Quant à l'allègement du trafic, avec une couverture du marché de 50 % et 90 % par les VA, des études prévoient une augmentation possible de l'utilisation des routes de respectivement 21 % et 80 % [2]. L'efficacité énergétique peut être augmentée de près de 40 %, par un meilleur contrôle du flux de trafic avec moins de freinages et d'accélérations, et une régulation des vitesses plus contraignante. Selon certains calculs, sur un trajet donné, une réduction de vitesse peut se traduire par un temps de parcours plus court.

Automatisation : concepts et degrés

Également prometteuses sont les technologies corrélées de communication de véhicule à véhicule (C2C) ou de véhicule à infrastructure (C2I). On parle aussi, selon les variantes, de C2X, avec le V de véhicule ou le C de c(h)ar. Les véhicules peuvent communiquer entre eux, p. ex. pour anticiper sur les embouteillages ; ou interagir avec l'infrastructure, ce qui pourrait se traduire par la suppression des panneaux de signalisation visibles et une optimisation des cycles de commutation des feux tricolores, et même leur complète élimination.

Les niveaux d'automatisation du véhicule sont définis comme le montre la **fig. 2**. C'est aux systèmes de niveau 1 désormais courants, tels que l'ABS et l'ESP, que l'on attribue, en partie au moins, la baisse du nombre de tués sur les routes ces dernières années. Les véhicules actuels peuvent déjà être équipés de systèmes semi-autonomes de niveau 2, tels que l'alerte de changement de voie ou l'assistant en cas de congestion. Le célèbre *Autopilot* de *Tesla* relèverait du niveau 3.

Outre les niveaux d'automatisation, les cas d'utilisation, c'est-à-dire les *modèles de mobilité*, doivent également être pris en compte. Pour les niveaux d'automatisation ci-dessus, de nombreux concepts sont envisageables. À commencer par un service de voiturier autonome : vous conduisez vous-même la voiture jusqu'au parking du centre commercial, vous la quittez pour faire vos courses tandis qu'elle cherche elle-même une place pour se garer. Plus ambitieux serait le véhicule à la demande : selon le prix, vous seriez transporté seul ou avec d'autres par une voiture que vous appelez depuis une application sur votre téléphone.

Avec ces nouveaux concepts de mobilité s'estompe la notion de véhicule individuel. En plus des effets positifs mentionnés, le VA idéal ne resterait pas à l'arrêt 23 h par jour, mais serait d'un usage intense, varié et flexible. À quoi s'ajoute un argument économique : selon les estimations, les systèmes redondants de niveau 5, coûteux en dépit de la produc-

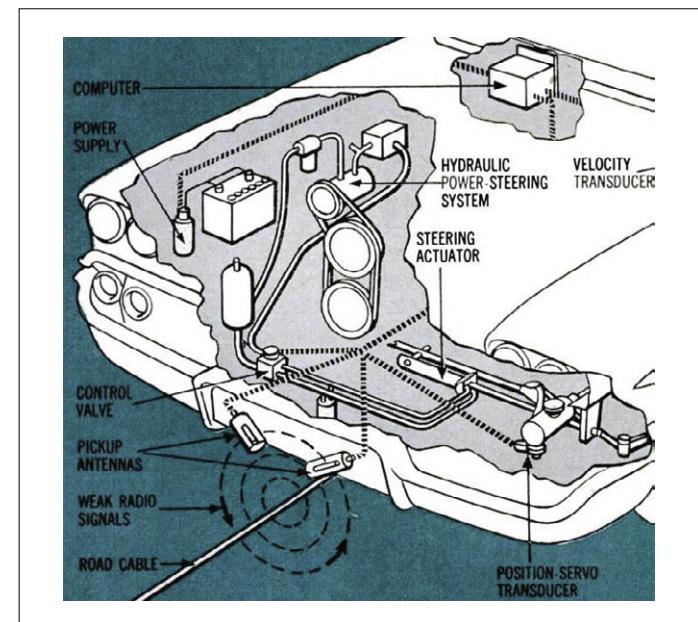


Figure 1. Un prototype de General Motors, basé sur la Chevrolet 58 et équipé de deux antennes près du sol. En 1958, le véhicule est « autonome » sur une piste d'essai, en fait il est filoguidé (source : Popular Science 05/1958).

tion en série, resteraient donc inabordables pour la plupart d'entre nous. Les grands groupes automobiles deviendraient aussi prestataires de services de mobilité.

Essayons maintenant d'expliquer sommairement la technique d'un VA.

Ça nous mènera loin

La première étape (aussi la plus critique pour les humains au volant) est la **perception**. L'environnement du véhicule doit être modélisé le plus précisément possible. Caméra, radar et lidar se

SAE level	Name	Narrative Definition	Execution of Steering and Acceleration/Deceleration	Monitoring of Driving Environment	Fallback Performance of Dynamic Driving Task	System Capability (Driving Modes)
Human driver monitors the driving environment						
0	No Automation	the full-time performance by the <i>human driver</i> of all aspects of the dynamic driving task, even when enhanced by warning or intervention systems	Human driver	Human driver	Human driver	n/a
1	Driver Assistance	the <i>driving mode-specific</i> execution by a driver assistance system of either steering or acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the dynamic driving task	Human driver and system	Human driver	Human driver	Some driving modes
2	Partial Automation	the <i>driving mode-specific</i> execution by one or more driver assistance systems of both steering and acceleration/deceleration using information about the driving environment and with the expectation that the <i>human driver</i> perform all remaining aspects of the dynamic driving task	System	Human driver	Human driver	Some driving modes
Automated driving system ("system") monitors the driving environment						
3	Conditional Automation	the <i>driving mode-specific</i> performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task with the expectation that the <i>human driver</i> will respond appropriately to a request to intervene	System	System	Human driver	Some driving modes
4	High Automation	the <i>driving mode-specific</i> performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task, even if a <i>human driver</i> does not respond appropriately to a request to intervene	System	System	System	Some driving modes
5	Full Automation	the full-time performance by an automated driving system of all aspects of the dynamic driving task under all roadway and environmental conditions that can be managed by a <i>human driver</i>	System	System	System	All driving modes

Figure 2. Les cinq niveaux d'automatisation brièvement définis (source : SAE International J3016).

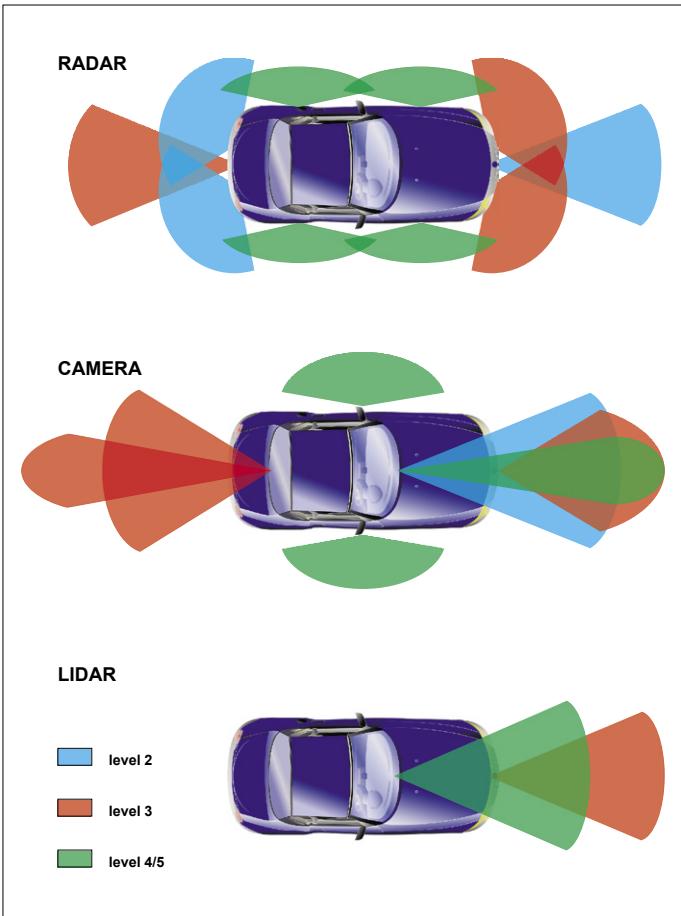


Figure 3. Selon Infineon, l'augmentation du nombre de capteurs avec des niveaux d'automatisation croissants pourrait ressembler à ceci. D'autres capteurs, p. ex. à ultrasons, ne sont pas pris en compte ici (source : Infineon).

complètent et jouent un rôle central dans tout VA. Exemple : la caméra est le seul moyen courant de reconnaître les couleurs et les feux de circulation conventionnels, mais le radar détecte des objets avec précision, même par mauvaise visibilité. Afin de tirer de chaque situation le meilleur parti possible, on utilise la *fusion des données des capteurs* qui consiste à pondérer les données selon le contexte et les circonstances instantanées, de sorte que les informations soient fiables.

La **fig. 3** montre un exemple de la façon dont les trois principaux types de capteurs sont utilisables en fonction du niveau d'automatisation. Selon le fabricant et la phase de développement, les spécifications varient considérablement. Les cônes des capteurs radar et lidar vont, dans l'axe du faisceau, de quelques mètres à plusieurs centaines de mètres. La résolution angulaire et donc la quantité totale de données sont également décisives. Avec les caméras HD courantes, des focales grand-angulaires de 6 à 25 mm sont généralement possibles. L'utilisation de caméras stéréoscopiques n'est pas rare non plus. Pour qu'il puisse être question de perception, il faut aussi estimer les mouvements à venir des objets (p. ex. la trajectoire d'un autre véhicule) au moyen de tous les vecteurs nécessaires. Cette **prédition** est une tâche très exigeante au cours de laquelle sont prises en compte diverses hypothèses probables. Un exemple de prévision apparaît sur la **fig. 4**. Apollo est une plateforme ouverte pour VA du géant chinois Baidu à laquelle se sont associés certains géants occidentaux de l'automobile. Le projet est sur *Github* [3].

La perception implique aussi un classement correct des *objets*. Ici ces objets sont les usagers de la route ainsi que les panneaux de signalisation, les feux de signalisation, le marquage routier, les obstacles et bien davantage. Une technique de classification utile est la segmentation sémantique, qui sépare les zones de certaines classes (en couleurs sur la **fig. 5**). Cette segmenta-

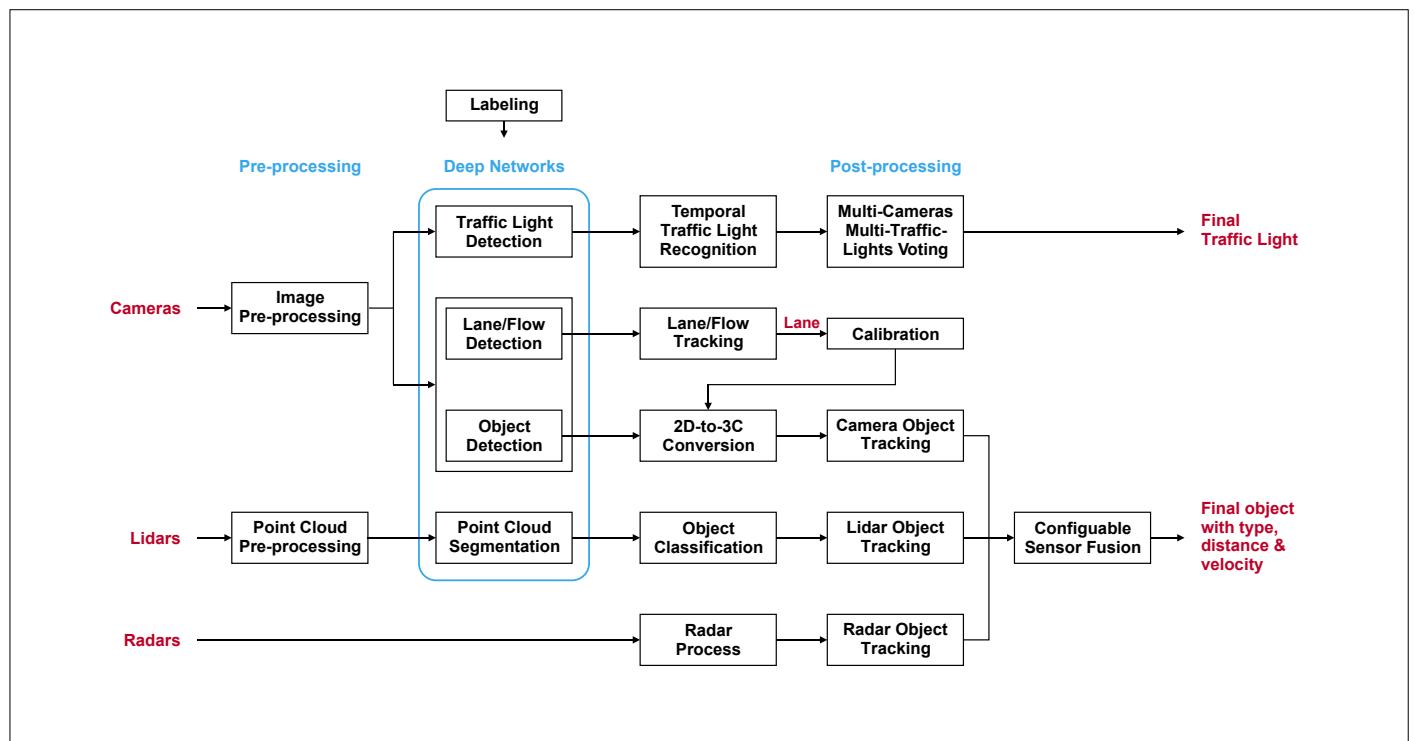


Figure 4. La structure de l'unité de perception d'Apollo. La reconnaissance d'objets avec des données métriques et la reconnaissance de feux tricolores s'effectuent le plus souvent en parallèle (source : Apollo).



Figure 5. Deux types de classification courants : segmentation sémantique à gauche et reconnaissance d'objets à droite (à gauche avec l'autorisation de MathWorks, à droite avec l'aide de Rolf Gerstendorf).

tion est utile pour la détection des routes et pour l'estimation de la surface des autres objets. L'apprentissage machine et en particulier les réseaux de neurones artificiels se prêtent bien à la classification grâce à leur robustesse et à leur aptitude pour la reconnaissance de formes. Trois incertitudes doivent être prises en compte lors de la classification des objets : *l'incertitude d'état* résultant d'erreurs de mesure des capteurs, *l'incertitude d'existence* avec la question de l'existence de l'objet reconnu et *l'incertitude de classe*, qui concerne l'exactitude de la classe attribuée. Surtout pour le dernier point, l'estimation approximative et la prise en compte de l'incertitude sont plutôt complexes.

Une autre tâche perceptive est la **localisation** du véhicule dans son environnement. Afin de trouver une réponse au centimètre près à la question *où suis-je ?*, les données métriques (objet) obtenues à partir de la perception sont généralement comparées à une carte à haute résolution (HD) stockée (**fig. 6**). On utilise notamment les méthodes de comparaison des nuées de points mesurés, connues de la robotique. En termes simples, cela signifie que les différences sont minimisées ou que certains objets typiques (repères) sont reconnus lorsque les données du capteur centré sur le véhicule d'origine sont superposées sur la carte. Bien entendu, les données de positionnement GPS ainsi que les données de mouvement de l'unité de mesure inertie (IMU) interne sont également utilisées. Pour estimer l'état, même en cas d'inexactitudes (ou biais) ou d'absence totale de données de capteurs, on utilise des filtres de Kalman (étendus) et d'autres méthodes (*fusion des données des capteurs, hybridation de capteurs*) dont le principe consiste à combiner ce que l'on *observe* à ce que l'on *sait* déjà.

La solution de la carte HD interne est à double tranchant. D'une part, elle permet une identification, une localisation et une planification rapides et efficaces. Les informations obtenues à partir de la carte permettent d'utiliser plus efficacement les algorithmes de reconnaissance des panneaux de signalisation ou des feux de circulation, car les informations obtenues à partir de la carte peuvent être utilisées pour les aligner sur une seule *région d'intérêt* (ROI) du champ du capteur. Un gros inconvénient est la taille et le degré d'actualité de la carte. Avec

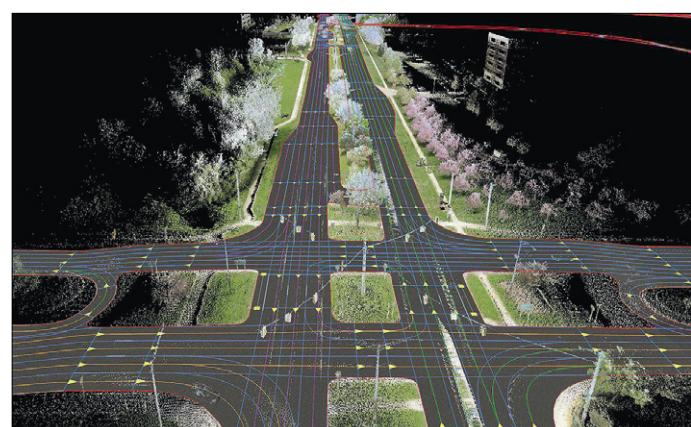


Figure 6. Vue partielle de la carte HD d'Apollo. Les nuées de points typiques du lidar en particulier peuvent être vues ici en blanc, alors qu'aucun objet classé n'est montré ici. (source : CB insights).

une infrastructure idéale, la carte devrait être constamment mise à jour à partir du réseau dans la mémoire interne dans le rayon spécifié, ce qui est un processus fort chronophage. Et, pour que le système fonctionne comme prévu, la carte doit être le plus à jour possible. Les véhicules qui passent dans la même zone sont censés mettre à jour pour les autres la carte résidant dans le nuage (c'est là un aspect de l'apprentissage continu). Il serait bien sûr avantageux, à l'avenir, de se passer complètement de carte HD interne, du moins dans sa forme actuelle. Pour l'instant, rien n'est certain.

Si la position et les environs sont connus, la trajectoire, généralement quelques dizaines de mètres, est **planifiée**. La voie la plus favorable est choisie parmi une série de voies possibles, une fois toutes les autres exclues par optimisation de certains facteurs et en tenant compte des contraintes physiques, normatives et autres. Pour que cela soit efficace, les options d'itinéraire peuvent être divisées en segments, généralement des sections de voie. Bien sûr, à la base, la destination et le trajet intégral doivent être connus (navigation totale).

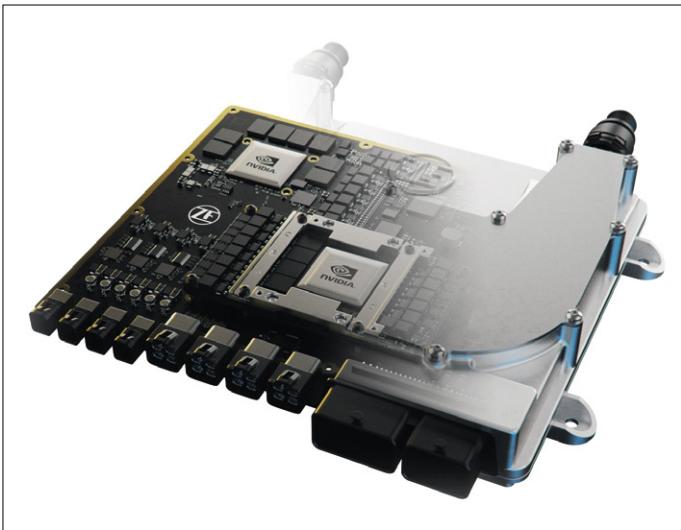


Figure 7. ProAI RoboThink de ZF basé sur NVIDIA DRIVE Xavier (ou autres puces si nécessaire). Souvent la dissipation de chaleur est aussi un défi lors de la conception de ce type de système - ici le refroidissement à eau est indiqué (source : ZF).



Figure 8. Les systèmes de simulation basés sur des moteurs 3D sont courants sur VA - ici un exemple d'AAI avec quelques composants de base tels que des panneaux de signalisation routière ou des bâtiments à assembler sur le côté gauche (image : AAI).

La dernière étape avant les actionneurs est la **commande**, c'est-à-dire la commande qui exécute dans le monde réel le mouvement de la trajectoire précédemment planifiée. Pour ce faire, elle doit être en mesure de répondre en temps réel aux perturbations et toujours prendre en compte les capacités physiques du véhicule (par exemple son inertie). De nombreuses techniques sont utilisées, depuis les régulateurs simples et de nombreux régulateurs proportionnels intégrés (PID) bien connus, jusqu'aux processus fortement modélisés. Les principaux actionneurs sont l'accélération, le freinage et l'essieu directeur, les technologies mécatroniques nécessaires à cet effet pouvant être utilisées, dont les systèmes d'entraînement par câble (*Drive-by-Wire DbW*) courants aujourd'hui. Selon le constructeur, les systèmes de ces véhicules répartissent différemment leurs composants matériels et logiciels. Il existe des concepts mixtes avec des composants fortement séparés au niveau du matériel ou avec des éléments centraux de grande taille et fortement redondants. Ceci s'applique également à l'interaction des composants du système délibératif et réactif. En particulier, il faut tenir compte de la capacité et de l'efficacité en temps réel tributaires des limites de la capacité de calcul et de stockage.

Il existe néanmoins de nombreuses similitudes fondamentales. Le prétraitement des données des capteurs pendant la perception, par exemple, est souvent laissé aux FPGA ou (en production en série) aux ASIC en raison de la forte parallélisation. Les unités centrales de calcul, comme le montre la **fig. 7**, avec de grands GPU et beaucoup de puissance de calcul parallèle, sont également utilisées. Le modèle présenté ici, dans lequel jusqu'à quatre unités sont interconnectées, est l'un des plus puissants du marché. Une puissance de calcul combinée jusqu'à 600 Téra-OPS (soit 600 billions de pas de calcul par seconde) peut être atteinte !

Pour la mise au point et l'homologation des modèles de VA, on estime que plusieurs milliards de kilomètres seront nécessaires au lieu des dizaines de millions de kilomètres pour les essais habituels. En effet, sur un VA le conducteur n'est plus un élément compensateur d'erreur. C'est donc au système lui-même d'assurer seul le niveau de sécurité requis. De plus, on attend des nouveaux systèmes un niveau de sécurité supérieur de beaucoup à celui de l'équipage véhicule + chauffeur actuel. Comme il est exclu de parcourir sur route un nombre aussi élevé de kilomètres, une grande partie de la mise au point des VA, de leur apprentissage, de la simulation et du test échoit au logiciel (*Software-in-Loop*, SiL) et au banc de tests (*Vehicle-in-Loop*, ViL). Pour le SiL, les environnements virtuels tridimensionnels à haute résolution bénéficient des acquis du monde des jeux et du graphisme (**fig. 8**). Pour ne pas se perdre dans l'infini des situations de conduite possibles, on fait appel à des méthodes qui ne retiennent que les situations les plus critiques et les plus fréquentes en matière de sécurité. Les exigences de sécurité les plus strictes s'appliquent également aux systèmes eux-mêmes, comme c'est le cas pour la classe ASIL-D, avec une probabilité de défaillance inférieure à 1/108 h. De nombreuses nouvelles normes de sécurité sont en préparation.

Il faut encore souligner qu'on escompte encore de nombreuses améliorations tant en termes de performances que de prix, en particulier avec les algorithmes, les capteurs et les semi-conducteurs puissants.

Défis inédits

Les réticences sociales, ou sociétales si l'on préfère, sont l'un des principaux obstacles que cette technologie aura encore à franchir. Chez la plupart des gens, la crainte d'une erreur informatique semble encore plus grande que celle d'une attaque de pirate informatique.

Le point le plus sensible est probablement celui de l'éthique, qui tôt ou tard devra prendre une forme juridique. Si dans de nombreux accidents le conducteur humain n'a presque aucune latitude pour réagir moralement, la machine, elle, doit en être capable ! En situation de dilemme (*choisir la trajectoire d'évitement par la droite qui épargnera la petite fille sur son vélo ou celle de gauche qui épargnera le piéton vieillard*), un réseau complexe d'interrogations d'ordre éthique peut émerger dans la machine, et les réponses qu'elle donnera dépendront des normes fondamentales de la société (à l'échelle globale !) qui conçoit, produit et utilise ces VA.

La commission d'éthique mise en place pour les VA en Allemagne a interdit les critères comme l'âge ou le sexe (âge, sexe,...), mais admet la réduction des risques de blessure des personnes (Règle 9) [**4**]. Le problème peut être abordé en profondeur et plus techniquement : quels capteurs doivent être pris en compte dans de telles décisions ? Faut-il aller jusqu'à l'état des

pneus, l'état de la route et d'autres paramètres (déjà relevés aujourd'hui par des capteurs) ? Il y a matière à discussion. Si le véhicule ne peut plus freiner et que la collision est inévitable, mais qu'il faut décider si ce sera avec le motocycliste casqué ou celui qui ne porte pas de casque, comment le véhicule doit-il agir ? Les chances de survie du porteur du casque sont plus grandes, mais pourquoi dans cette situation cela devrait-il se traduire pour lui par un *risque d'accident* plus élevé ? En outre, il y a des discussions sur le rôle passif du véhicule, une variable aléatoire, sur la définition des «*conditions de sécurité*», sur le catalogue de scénarios à valider et d'innombrables autres sujets. Dans ces prises de décision doivent toujours être pris en compte la redondance/sécurité et le temps de calcul.

La question éthique pourrait aussi être abordée d'une manière abstraite et plus générale : est-il admissible qu'à partir d'un certain degré de garantie en matière de sécurité, le législateur puisse forcer les citoyens à ne plus utiliser que des VA ? Il faut bien considérer que si un trafic mixte peut, selon l'interaction des véhicules ordinaires avec les VA, peut perturber considérablement le trafic régulé automatiquement, mais une adaptation technique appropriée devrait rétablir l'harmonie. Que reste-t-il dès lors de la liberté et du plaisir de conduire ? En Allemagne, le Comité d'éthique a clairement rejeté cette contrainte... j'entends vos soupirs de soulagement !

Sur le plan juridique, la question de la responsabilité est un autre sujet passionnant. Même si pour l'heure, en cas d'erreurs, la responsabilité du fabricant continue de s'appliquer comme auparavant, et même s'il appartient au conducteur – en vertu de la première législation mondiale en date sur les VA promulguée en Allemagne dès 2017 – de décider s'il peut ou pas laisser le pilote autonome en service dans la situation actuelle du trafic, de nouvelles situations imprévisibles ne cessent de surgir. Exemple : l'apprentissage des machines fonctionne, entre autres, en recourant à des probabilités universalisées, qui doivent, dans des situations inconnues, permettre à la machine de réagir de façon appropriée. Que se passe-t-il si la «boîte noire» se trompe dans l'évaluation de la situation et commet une erreur ?

Les experts pensent que du fait de sa portée sociale, la problématique des VA ne peut être traitée que dans un cadre global. Ceci explique l'existence de plates-formes telles qu'*Apollo* ou des célèbres coopérations (internes) entre p. ex. *Daimler* et *BMW*. L'établissement de règles et de réglementations communes (et explicitement politiques) est inévitable et contribuera significativement au succès technologique. Les environnements logiciels inter-fournisseurs, tel le projet jeune et ouvert *OpenADx* de la *Fondation Eclipse* en coopération avec *Bosch* et de nombreux

L'auteur



Développeur et journaliste indépendant dans le domaine de l'électronique, Viacheslav Gromov écrit des articles et des livres pour divers éditeurs. Il a entamé ses études supérieures bien avant d'entrer à l'université grâce à un programme pour enfants surdoués. Ses domaines d'expertise sont l'intelligence artificielle (Edge AI), les µC (ARM/Wireless) et les FPGA, sur lesquels il a non seulement écrit des manuels pour des universités ou des fabricants de semi-conducteurs, mais il a également participé à des programmes internationaux, en Afrique du Sud et dans la Silicon Valley. Il a fondé une société pour développer des solutions locales d'intelligence artificielle pour des installations industrielles et des systèmes à fusion de données normatifs (brevet en instance) pour la conduite autonome (readers@gromov.de).

autres participants, sont un bon début [5].

Les conditions pour un développement rapide de cette technologie ne sont pas les mêmes dans tous les pays. Aux États-Unis règne une certaine liberté pour tester les véhicules sans conducteur, et en Chine, les données de formation, de test et de simulation nécessaires sont beaucoup plus faciles d'accès – toutes les autoroutes sont même cartographiées en HD pour les VA.

Tout le monde pressent qu'avec les VA le concept même de trafic routier doit être reconstruit de fond en comble. La planification des transports dans les zones aussi bien urbaines que rurales se trouve ainsi confrontée à des défis inédits.

Les difficultés techniques et structurelles sont ardues en effet, mais cette technologie est propulsée vigoureusement dans le monde entier par les investissements, les subventions et les nouvelles réglementations. La réflexion englobe aussi le cadre plus large et les répercussions indirectes sur d'autres secteurs. Il en sortira forcément quelque chose.

191147-02 VF

Liens

- [1] „Autonomes Fahren – Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte“, M. Maurer et al., Springer Open, 2015: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-45854-9>
- [2] „Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations“, D. J. Fagnant et al., 2015, Elsevier: <https://www.aamva.org/WorkArea/DownloadAsset.aspx?id=6738>
- [3] Projet Apollo: <http://apollo.auto/>
- [4] Rapport du Comité d'éthique allemand sur la conduite automatique et en réseau, BMVI, juin 2017: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/bericht-der-ethik-kommission.pdf>
- [5] OpenADx: <https://openadx.eclipse.org/>