الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Département : Génie Électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de Master en Électronique

Spécialité

Systèmes Embarqués

Étude sur le développement et l'évolution de la voiture autonome

Réalisé par

Hannah Melissa KHELIL, Mohamed ZELLAT

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2022)

Composition du Jury :

Président	M. Amar REZOUG	M. C. A.	ENST
Promoteur	M. El-Hadi KHOUMERI	M. C. B.	ENST
Examinateur	M. Nouredine CHERABIT	M. A. A.	ENST
Examinateur	Mme. Karima REBAI	M. C. B.	ENST

Année universitaire 2021 – 2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Département : Génie Électrique Et Informatique Industrielle

Mémoire de Master en Électronique

Spécialité

Systèmes Embarqués

Étude sur le développement et l'évolution de la voiture autonome

Réalisé par

Hannah Melissa KHELIL, Mohamed ZELLAT

Présenté et soutenu publiquement le (06/07/2022)

Composition du Jury :

Président	M. Amar REZOUG	M. C. A.	ENST
Promoteur	M. El-Hadi KHOUMERI	M. C. B.	ENST
Examinateur	M. Nouredine CHERABIT	M. A. A.	ENST
Examinateur	Mme. Karima REBAI	M. C. B.	ENST

Année universitaire 2021 – 2022

Remerciements

Louanges à Allah le Tout Puissant.

Qu'Il nous pardonne et nous guide vers le droit chemin.

Nous tenons à rendre hommage et à remercier nos parents et nos familles qui ont toujours été présents et qui nous ont soutenu durant tout notre cursus.

Merci à Monsieur El-Hadi Khoumeri de nous avoir encadrés, conseillés, orientés et nous avoir poussés à persévérer dans nos efforts.

Nous remercions les membres du jury d'avoir donné de leur temps afin d'examiner cet humble travail.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble du corps professoral et administratif de l'École Nationale Supérieure de Technologie pour la richesse, la qualité de leur enseignement et les grands efforts qu'ils ont déployés pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Enfin, merci à toutes celles et ceux qui nous ont aidés dans l'accomplissement de ce mémoire.

Table des matières

Table des figures i

Liste des abréviations ii

Introduction générale 1

1 Définition du terme «voiture autonome» 2

2 Classification des voitures autonomes 2
2.1 Niveaux 0, 1 et 2 : Les fonctionnalités d'aide à la conduite 2
2.2 Niveaux 3, 4 et 5 : Les fonctionnalités de conduite automatique 2

3 L'histoire des voitures autonomes 4

4 Fonctionnement des voitures autonomes 7
4.1 Caméras 8
4.2 Stéréovision 8
4.3 Lidar 9
4.4 Radar 9
4.5 Sonar 10
4.6 Centrale inertielle 11
4.7 Odomètre 11

5 Perspectives d'évolution des voitures autonomes 11

6 Avantages, obstacles et inconvénients des voitures autonomes 12
6.1 Avantages des voitures autonomes 12
6.2 Obstacles et inconvénients des voitures autonomes 13

7 Technologies utilisées dans les voitures autonomes 13
7.1 Baidu 13
7.2 BMW 14
7.3 Google Car 14
7.4 Tesla 15
7.5 Volvo 16

Conclusion générale 17

Bibliographie 18

Table des figures

1 Niveaux d'autonomie de véhicule selon la *SAE* [5] 3
2 Fonctionnement d'une voiture autonome [17] 7
3 Résumé graphique de la stéréovision [17] 8
4 Capteurs lidar [17] 9
5 Résumé graphique du lidar [17] 10
6 Résumé graphique du radar [17] 10
7 Résumé graphique du sonar [17] 11
8 Voiture Jidu Robo-01 de Baidu [20] 13
9 Voiture BMW Vision iNext [25] 14
10 Google Car analysant son environnement [26] 15
11 Vision de Tesla [26] 16
12 Voiture Ride Pilot de Volvo [28] 16

Liste des abréviations

ACC	***A**daptive **C**ruise **C**ontrol*
IA	**I**ntelligence **A**rtificielle
IEEE	***I**nstitute of **E**lectrical and **E**lectronics **E**ngineers*
LIDAR	***LI**ght **D**etection **A**nd **R**anging*
RADAR	***RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging*
SAE	***S**ociety of **A**utomotive **E**ngineers*
SONAR	***SO**und **Na**vigation **R**anging*
SUV	***S**port **U**tility **V**ehicle*
V2I	***V**ehicle **to** **I**nfrastructure*
V2V	***V**ehicle **to** **V**ehicle*

Introduction générale

Chaque année, il y a plus de 1,3 million de morts à cause des accidents de la route. À ce rythme, le nombre de décès risque d'atteindre les 2,4 millions en 2030 [1]. Ces accidents sont principalement causés par le facteur humain : non-respect du code de la route, utilisation du téléphone portable durant la conduite, somnolence, ...

Face à ce constat alarmant, les constructeurs automobiles tentent de développer des solutions pour réduire le risque d'accidents tout en préservant le confort du conducteur. C'est l'un des facteurs qui les a poussés à s'intéresser à la voiture autonome (qui a pour caractéristique principale de minimiser l'implication du conducteur) mais aussi en raison de son potentiel impact économique, social et même écologique.

Pour ce mémoire de Master, nous nous intéresserons à l'évolution des voitures autonomes et aux différentes technologies utilisées par les entreprises automobiles (Tesla, BMW, ...).

Ce travail nous permettra également de mieux cerner notre sujet de projet de fin d'études intitulé : «Étude et Simulation d'une Voiture Autonome Utilisant l'Apprentissage Approfondi (Deep Learning) : Application sur le Simulateur Udacity».

Ce mémoire est articulé en sept temps. Nous commencerons par introduire la notion de voiture autonome. Nous expliquerons ses différents niveaux d'autonomie. Ensuite, nous verrons l'évolution de ces voitures. Puis, nous nous intéresserons à leur fonctionnement et à leurs perspectives d'évolution. Nous citerons les avantages, les inconvénients et même les obstacles que rencontrent la popularisation de celles-ci, et enfin, les types de technologie utilisés de voitures autonomes qui sont (ou arriveront bientôt) sur le marché.

Mots-clés : Voiture autonome, véhicule entièrement automatisé, conduite autonome, véhicule à délégation de conduite.

1 Définition du terme «voiture autonome»

Appelée *self-driving*, sans conducteur, automatisée, robotisée ou encore à conduite déléguée, la voiture est dite «autonome» si elle est capable d'effectuer la plupart ou la totalité des opérations de conduite sans un contrôle actif ou une surveillance continue par un être humain [2].

Elle peut être aussi définie en tant que «voiture équipée d'un système de pilotage automatique qui lui permet de rouler sans intervention humaine dans des conditions de circulation réelles» [3].

Le terme autonome, rappelons-le, est emprunté du grec *autonomos*, c'est à dire «qui se régit par ses propres lois ou qui agit de soi-même» [4].

2 Classification des voitures autonomes

Afin de catégoriser les voitures autonomes, la *SAE* International [1] a mis en place une échelle de 6 niveaux dite «échelle d'autonomie» largement adoptée. Cette échelle, décrite dans la figure 1, est détaillée comme suit [5] :

2.1 Niveaux 0, 1 et 2 : Les fonctionnalités d'aide à la conduite

Les niveaux 0, 1 et 2 ont en commun le contrôle permanent de la conduite par l'être humain même si des fonctionnalités d'aide à la conduite sont engagées. Ces fonctionnalités doivent être continuellement supervisées par le conducteur.

Les trois premiers niveaux se distinguent les uns des autres par les fonctionnalités suivantes :

- **Niveau 0** : Le niveau 0 englobe les véhicules ayant des fonctionnalités envoyant des signaux de danger et d'aide temporaire.
- **Niveau 1** : Les véhicules du niveau 1 ont une fonctionnalité d'assistance de conduite : soit le contrôle latéral (contrôle d'angle) ou longitudinal (contrôle de vitesse).
  Une voiture de ce niveau possède soit un régulateur de vitesse adaptatif (aussi appelé *ACC* pour *Adaptive Cruise Control*) soit le contrôle de la direction.
- **Niveau 2** : Les véhicules du niveau 2, contrairement à ceux du niveau 1, possèdent les deux fonctionnalités d'assistance de conduite : le contrôle latéral et longitudinal. Donc, le véhicule est équipé du régulateur de vitesse adaptatif et du contrôle de la direction.

2.2 Niveaux 3, 4 et 5 : Les fonctionnalités de conduite automatique

Les véhicules de niveau supérieur (3, 4 et 5) ont comme particularité commune que la personne assise sur le siège conducteur ne conduit pas lorsque les fonctionnalités de conduite automatique sont engagées.

[1] La *Society of Automotive Engineers International* est leader en matière de mise en contact et de formation des ingénieurs tout en promouvant, développant et faisant progresser l'ingénierie aérospatiale, automobile et des véhicules utilitaires

Le niveau 3 d'autonomie se différencie des autres niveaux du fait que si la fonctionnalité le demande, l'humain doit conduire. Alors que chez les véhicules de niveau 4 et 5, les fonctionnalités d'aide de conduite automatique ne demanderons pas à l'humain de reprendre la main.

La conduite autonome des niveaux 3 et 4 ne se fait que si toutes les conditions nécessaires sont réunies.

Les fonctionnalités de chacun de ces niveaux sont ainsi :

- **Niveau 3** : Comme exemple de véhicules de ce niveau, on peut citer ceux dotés de la fonction de *trafic jam chauffeur* (ou chauffeur dans les embouteillages) permettant, uniquement si la vitesse est modérée, le contrôle automatique du véhicule.
- **Niveau 4** : Pour le niveau 4, on peut citer comme exemple, les taxis locaux sans chauffeur dans un circuit prédéfini. La *SAE* précise que les pédales et le guidon peuvent être installés ou non dans les véhicules de ce niveau.
- **Niveau 5** : Dans le niveau 5, le plus avancé, le véhicule opère, en présence ou pas d'humains, d'une manière complètement autonome. De plus, le volant ou la pédale ne sont plus nécessaires dans l'habitacle.

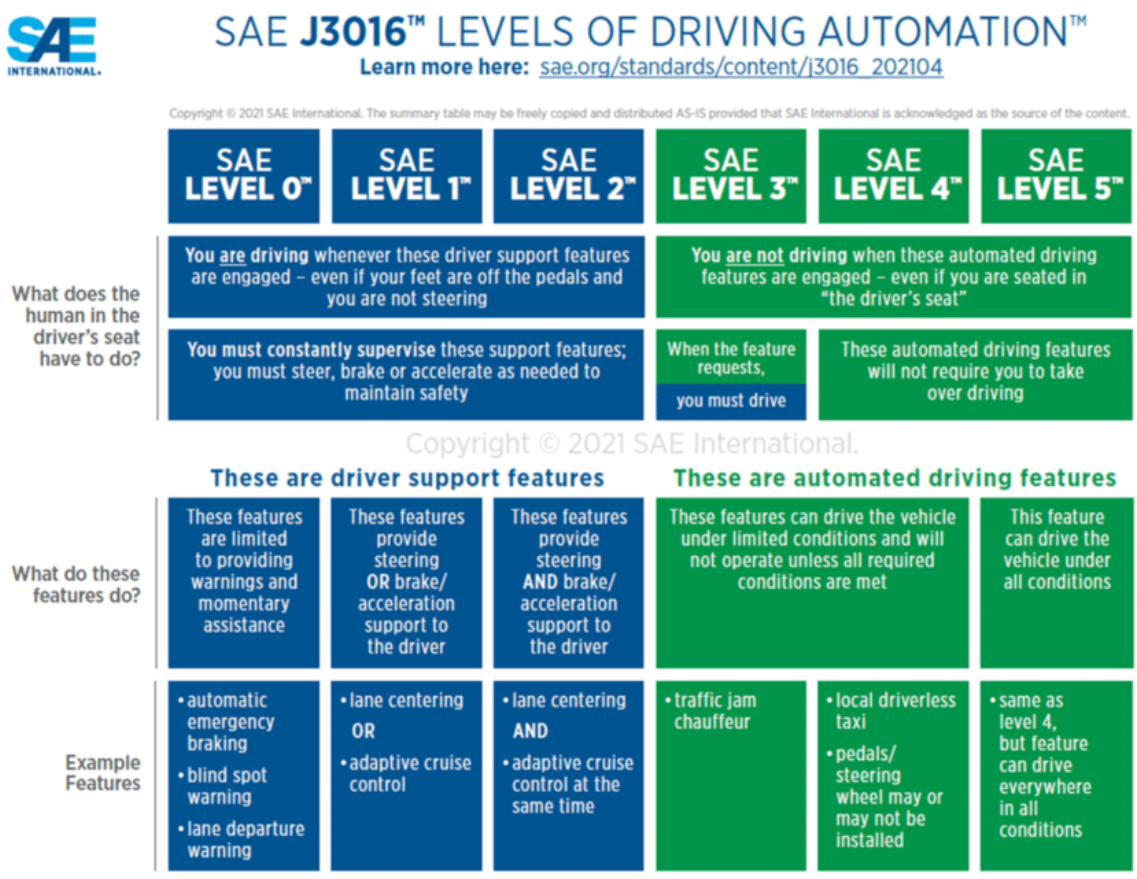


Fig. 1 : Niveaux d'autonomie de véhicule selon la *SAE* [5]

3 L'histoire des voitures autonomes

Divers événements historiques ont contribué à façonner les véhicules semi-autonomes modernes. Nous présentons ici un historique de l'évolution de ces véhicules et les différents progrès techniques qui ont mené aux véhicules actuels d'après [6] et [7] sauf mention contraire.

Dès les années 1920, des voitures radiocommandées ont fait l'objet de démonstrations aux États-Unis.

En 1925, Francis R. Houdina, ingénieur électricien, a réalisé une voiture radiocommandée baptisée «American Wonder». Une démonstration de la circulation sans conducteur mais dirigée à distance a été faite dans les rues de New-York, malgré un trafic dense.

En 1926, le même ingénieur a équipé de petits moteurs électriques et d'une antenne réceptrice une voiture de type Chandler-1926.

Un distributeur de voitures, Achen Motors, à son tour, a utilisé la voiture de Houdina en tant qu'attraction.

Sponsorisé par General Motors, une première exposition de voitures guidées a été réalisée à l'exposition universelle de 1939.

Dans son livre intitulé *Magic Motorways*, Bel Geddes fait la promotion des progrès dans la conception des transports et des autoroutes et projette déjà l'exclusion des humains du processus de conduite pour les années 1960.

Durant les années 1950, RCA Labs a créé en laboratoire un système de voiture miniature guidée et contrôlée par des fils électriques au sol. Leland M. Hancock, ingénieur de la circulation au département des routes du Nebraska, et son directeur L.N. Ress, également ingénieur se sont intéressés à ce système miniature et ont décidé de le réaliser dans des installations réelles.

En 1957, RCA Labs et l'état du Nebraska ont démontré avec succès le système précédent sur un tronçon de route d'environ 122 mètres. Le système comprenait des circuits de détection expérimentaux enterrés dans la chaussée et une série de lumières le long de la route. Les circuits détecteurs pouvaient envoyer des impulsions pour guider la voiture et déterminer la présence de tout véhicule et même sa vitesse sur le circuit.

En 1960, General Motors a présenté une série de voitures expérimentales Firebird dotées de systèmes de guidage électroniques et capables de s'intégrer à la circulation. Un projet de développement de véhicules sans conducteur activés par des dispositifs électroniques est lancé par le laboratoire des systèmes de communication et de contrôle de l'université de l'Ohio, projet réalisable sur route dans un délai de 15 ans.

Au Royaume-Uni, une Citroën DS, sans conducteur, activée par des systèmes électroniques est testée avec succès sur une route à 130 km/h sans déviation de direction ni de vitesse. La logique automatisée intelligente, indispensable à la voiture autonome, est l'objet de recherches préliminaires menées par l'université de l'Illinois du début au milieu des années 1970.

Durant les années 1980, Ernst Dickmanns de l'université de Munich robotise une fourgonnette Mercedes-Benz. Ce véhicule parvient à rouler à 60 km/h en l'absence de circulation. Devant le succès des avancées technologiques, des projets sur les véhicules autonomes, sont financés à hauteur de l'équivalent de 750M€ de 1987 à 1995 (projet Prometheus). Aux États-Unis, le projet ALV développe l'utilisation du Lidar pour la vision par ordinateur et le contrôle robotique dirigeant le véhicule. L'université Carnegie Mellon lance l'utilisation des

réseaux de neurones pour la direction et le contrôle des véhicules autonomes.

En 1991, le congrès américain adopte un projet de loi sur l'autorisation de transport appelé ISTEA [2] qui charge l'USDOT [3] de faire réaliser un véhicule autonome et un système routier automatique avant 1997.

En 1994, des véhicules semi-automatiques, donc avec intervention humaine, sont réalisés par Daimler-Benz et Ernst Dickmanns. Ces véhicules intégrés à la dense circulation parisienne parcourent plus de 1000 km sur autoroute.

En 1995, le véhicule Mercedes-Benz, semi-autonome, utilisant une vision par ordinateur saccadée pour la conduite en temps réel, parcourt plus de 1590 km aller-retour de Munich à Copenhague souvent à 175 km/h et 95% du temps en conduite en mode autonome.

L'utilisation des réseaux de neurones sur les véhicules Daimler-Benz par l'université Carnegie Mellon permet le contrôle du volant mais, par sécurité, un conducteur actionnait le frein et l'accélérateur. Le véhicule parcourt 5000 km sur un circuit de crosscountry, 98% du temps de manière autonome.

En 1996, la Lancia Thema d'Alberto Broggi de l'université de Parme, équipée de 2 caméras vidéo utilisant des algorithmes de vision stéréoscopique, parcourt 1900 km en mode autonome durant 94% du temps et à 90 km/h en moyenne.

En 1997, le véhicule de transport automatisé ParkShuttle, premier véhicule sans conducteur, a fait l'objet de deux projets pilotes aux Pays-Bas. Il n'a ni chauffeur ni steward et n'a ni pédales ni volant ; mais, il a une voie réservée et il cède le pas aux piétons, voitures et autres cyclistes. Ce véhicule vérifie sa position sur la route grâce à des points de référence matérialisés par des aimants sur la chaussée.

En 1998, au Japon, Toyota adapte un système régulateur de vitesse, l'ACC, sur un véhicule de série.

Depuis 2005, le progrès technique est surtout l'affaire d'équipes de spécialistes habituées à travailler en groupe et sur commande. Leur méthode permet la répartition des tâches et la prévision des résultats de leur recherche. Le gouvernement américain, intéressé par les potentialités des voitures autonomes, a financé 3 efforts militaires notamment le Demo I, II et III. Des prix de 1M$ sont proposés à toute équipe d'ingénieurs qui pourra créer une voiture autonome capable de terminer un circuit défini dans le désert de Mojave. C'est durant les challenges organisés par le Darpa que le prototype de capteur lidar a été utilisé par David Hall de la société Velodyne. Le lidar est depuis intégré dans les nouveaux véhicules autonomes.

En 2006, la voiture BMW Série 3 arrivait à faire le tour du circuit de Hockenheim [8].

En 2008, des véhicules autonomes sont utilisés dans le système de transport minier Australien et notamment avec les véhicules Komatsu.

En 2011, les deux véhicules Spirit of Berlin et MadeInGermany, dirigés par le groupe AutoNOMOS et développés par l'université libre de Berlin, ont assuré le trafic interurbain en Allemagne.

En mars 2012, l'état du Nevada est le premier à autoriser l'exploitation des voitures autonomes sur la voie publique dès le 1er mai 2012. Le premier test de conduite y a été administré à un véhicule de Google. La Floride et la Californie sont les deuxième et troisième états à autoriser ces tests.

[2] *Intermodal Surface Transportation Efficiency Act*

[3] *U.S. Department of Transportation*, le département des transports américain

En 2013, à Parme, le véhicule autonome italien VisLab satisfait un test positif comprenant ronds-points, feux de circulation, passages piétons et autres.

En août 2013, Daimler R&D réalise la Mercedes-Benz de classe S équipée de caméras stéréo et de radars. Cette voiture réalise un parcours de 100 km. La Mercedes classe S est disponible à la vente avec les options suivantes : conduite autonome, maintien de la voie, accélération et freinage, stationnement, prévention des accidents. Elle est destinée pour la ville et l'autoroute et peut atteindre les 200 km/h.

Toujours en août 2013, Nissan dédie un terrain d'essai à la voiture autonome. Une voiture électrique Leaf est équipée de la technologie de voiture autonome et participe aux démonstrations en Californie. Cette voiture obtient une plaque d'immatriculation qui lui permet de s'intégrer au trafic sur route afin de permettre au constructeur l'évaluation des performances de son logiciel.

En 2014, la SAE organise la normalisation, établit le système de classification à 6 niveaux et définit les termes relatifs aux systèmes de conduite automatisée des véhicules routiers.

Encore en 2014, des prototypes de véhicules autonomes avec perception à 360° de l'environnement sont en mesure d'éviter les accidents. Durant la même année et pour la première fois, un prototype BMW roule en mode autonome à Las Vegas prouvant la maîtrise de la conduite en situation critique. Dès lors, les voitures autonomes peuvent se garer en toute autonomie [8].

En mars 2015, en réponse aux questions sur le statut juridique de la voiture autonome et sur la responsabilité en cas d'accident, le représentent de Tesla a indiqué «le conducteur est seulement libéré des tâches fastidieuses de la conduite, il demeure pilote du véhicule». Tesla a largement diffusé la capacité de conduite autonome aux voitures existantes avec des mises à jour de son programme [9]. Ces voitures sont semi-autonomes, avec des conducteurs humains censés rester engagés et prendre le relais s'ils détectent un problème potentiel. Il n'est pas encore clair si cette approche semi-autonome est durable car les personnes ont tendance à faire confiance aux capacités de la voiture et ils sont moins susceptibles de prêter attention à la route, et qui plus est, quand le besoin se fait le plus sentir (comme lors des circuits en ville ou avec une météo capricieuse).

En 2017, Google Car, rebaptisée Waymo, a commencé à embarquer des passagers dans des véhicules autonomes de leur programme appelé *Trusted Tester Program*, en Arizona [10].

En juillet 2018, Daimler (propriétaire de la marque Mercedes-Benz) et Bosh ont annoncé leur collaboration pour le lancement de taxis autonomes en Californie pour le deuxième semestre de l'année 2019 [11].

Toujours en juillet 2018, les 600 Chrysler minivans de Waymo ont parcouru 13 millions de kilomètres sur les routes publiques soit l'équivalent de 40000 kilomètres par jour [11].

En septembre 2018, Renault-Nissan et Mitsubishi ont proposé trois modèles de voitures autonomes [11].

En 2019, le constructeur japonais Toyota a présenté la navette autonome qui a participé à la fluidification de la circulation dans Tokyo lors des jeux olympiques de 2020 [12].

En 2020, la start-up AutoX fondée par Alibaba a lancé à Shanghai un RoboTaxi complètement autonome [13]. Luminar a, de son côté, signé, avec Volvo Cars, son premier contrat de production de véhicules autonomes pour particuliers [14].

En 2021, Waymo étend son *Trusted Tester Program* à la ville San Francisco [10].

Les véhicules autonomes de Google et les voitures semi-autonomes de Tesla circulent aujourd'hui dans les rues de nombreuses villes.

Le 27 avril 2022, les deux entreprises Baidu et Pony ont reçu l'autorisation d'effectuer des courses pour particuliers à bord de leurs voitures autonomes sans conducteur dans une zone délimitée à Pékin [15].

4 Fonctionnement des voitures autonomes

Les véhicules autonomes, pour circuler et éviter les obstacles, emploient de multiples capteurs, actionneurs, algorithmes, systèmes d'apprentissage automatique et de puissants processeurs :

- Les capteurs radar surveillent la position des véhicules à proximité.
- Les caméras vidéo détectent les feux de circulation, lisent les panneaux de signalisation, suivent les autres véhicules et recherchent les piétons.
- Les capteurs lidar font rebondir les impulsions lumineuses de l'environnement de la voiture afin de déterminer avec précision les distances, détecter les bords de route et identifier les marques sur la voie.
- Les capteurs sonar sont chargés de détecter les bordures de la route et les autres véhicules, notamment lors du stationnement.
- Un logiciel utilise ensuite toutes ces entrées, pour déterminer le chemin à suivre et le comportement à adopter par le véhicule. Ce même logiciel envoie des commandes aux actionneurs qui contrôlent la vitesse, le freinage et la direction de la voiture [16].

La figure 2 résume ces propos.

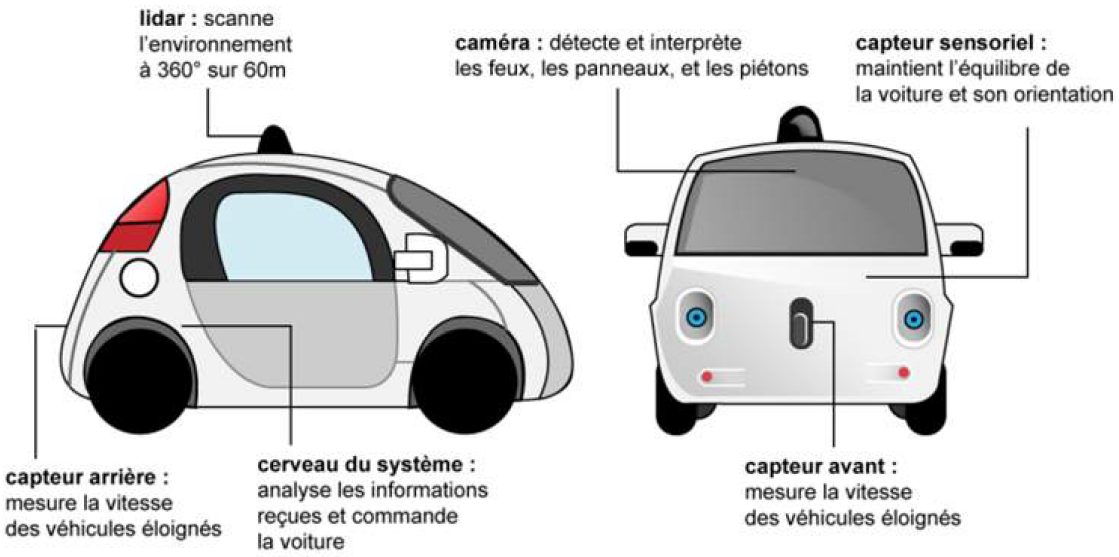


Fig. 2 : Fonctionnement d'une voiture autonome [17]

Il est possible de retrouver un ensemble de capteurs dans la voiture autonome fournissant les mêmes informations, ce qui laisse penser qu'il existe une certaine redondance dans les données. Cependant, la disponibilité des mêmes informations permet au calculateur de disposer d'informations plus fiables [17]. Les véhicules autonomes combinent, ainsi, différentes

technologies de capteurs afin de complémenter les avantages et minimiser les inconvénients de chacune.

Nous nous intéresserons, dans ce qui suit, à certains des capteurs les plus courants.

4.1 Caméras

Les caméras, positionnées à différents emplacements du véhicule, servent à remplacer la vision du conducteur. Une voiture autonome peut être équipée de différents types de caméras : monovision, stéréo, infrarouge voire 3D.

Chaque caméra prend, pendant la conduite, plusieurs clichés à la suite ; ces clichés seront évalués par un algorithme pour une utilisation précise ; les caméras 3D sont utilisées pour localiser et identifier les obstacles et les trottoirs.

La caméra frontale est placée devant afin de détecter les panneaux de signalisation, les véhicules à l'avant et les piétons. Certaines caméras se logent dans les rétroviseurs et à l'arrière de la voiture pour couvrir les angles morts.

Afin d'obtenir une image de son environnement, la caméra 3D émet des rayons infrarouges modulés. Ces rayons seront réfléchis par tout obstacle dont l'image, après mesure du déphasage de la lumière réfléchie, sera en 3D [17].

4.2 Stéréovision

La stéréovision consiste à reproduire une image en trois dimensions à l'aide de plusieurs caméras. À cette fin, deux caméras sont généralement utilisées pour visualiser la même scène sous des angles différents. Ensuite, la position relative de chaque point de la scène est calculée à partir des images capturées par les caméras. Cela nécessite un algorithme de traitement d'images pour détecter des objets similaires dans les deux images capturées [18]. La figure 3 résume les avantages et les inconvénients de la stéréovision.

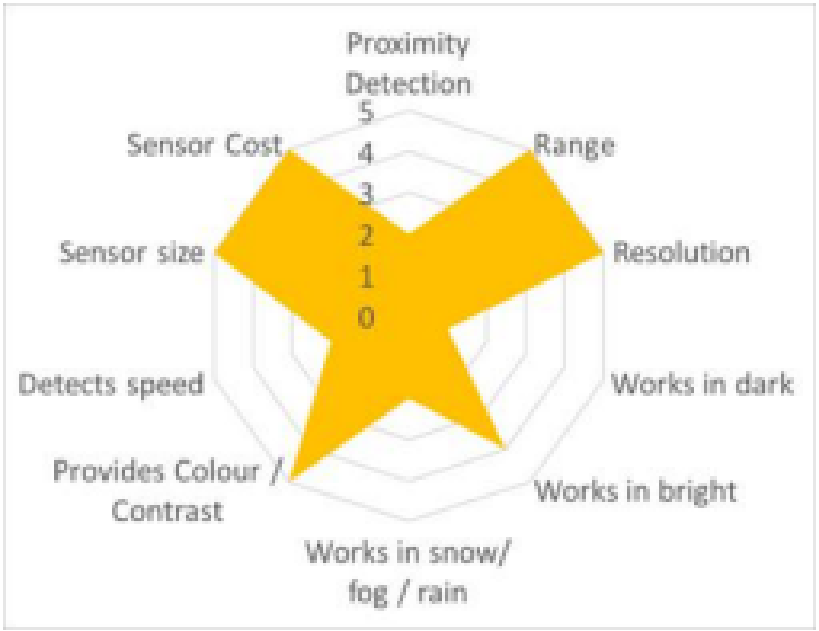


Fig. 3 : Résumé graphique de la stéréovision [17]

4.3 Lidar

Le mot lidar vient l'acronyme anglais pour *Light Detection And Ranging* ou *Laser Imaging Detection And Ranging* qui peut être traduit par détection et portée laser ou détection et portée de la lumière. Il désigne l'appareil qui mesure la distance entre lui et les objets environnants en utilisant la réflexion de la lumière dans le spectre infrarouge à ultraviolet, comme illustré figure 4.

Le fonctionnement du lidar se fait en traitent la réflexion des faisceaux laser à l'émetteur dont les rayons sont toujours cohérents. La distance à un objet est calculée grâce aux rayons émis par le laser pulsé, puisque connaissant la vitesse de la lumière, il est possible de calculer la distance de la voiture à d'éventuels obstacles [17].

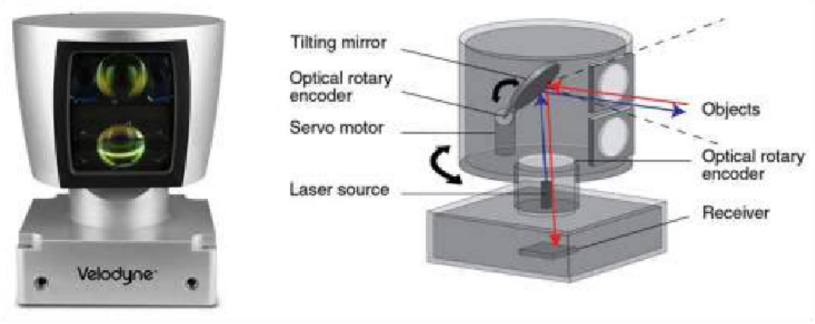


Fig. 4 : Capteurs lidar [17]

Le *Lidar* est l'un des capteurs les plus importants et les plus coûteux utilisés dans les véhicules autonomes. Ce qui rend ce produit spécial, c'est sa capacité à effectuer des numérisations à grande échelle.

En fait, il peut même balayer plus de 100 mètres autour d'une voiture et générer une carte spatiale 3D précise et instantanée du monde qui l'entoure. Cela signifie que les voitures peuvent utiliser ces données pour prendre des décisions sur la façon de réagir dans différentes situations.

Cependant, la quantité d'informations générées par les conducteurs peut être énorme, ce qui peut être problématique. Dans le cas de la vision par ordinateur, les véhicules autonomes seront équipés de processeurs puissants capables de gérer toutes les informations obtenues en temps réel [17]. La figure 5 illustre les forces et les faiblesses du lidar.

4.4 Radar

Le radar pour *Radio Detection And Ranging* (détection et télémétrie radio), contrairement au lidar, utilise des ondes radio, mais ne peut pas calculer la vitesse des objets autour de la voiture. Cet appareil envoie des ondes sonores de 27 GHz à 77 GHz et selon le même principe que le lidar, utilise le temps de propagation aller-retour, afin de déterminer la vitesse et la distance qui sépare la voiture de l'obstacle. Il existe deux grands types de radars dans le monde de l'automobile :

- D'une part, le radar à courte portée (d'environ 30 mètres) utilisé de basse vitesse.
- D'autre part, le radar à longue portée, (environ 200 mètres), qui est utilisé à grande vitesse.

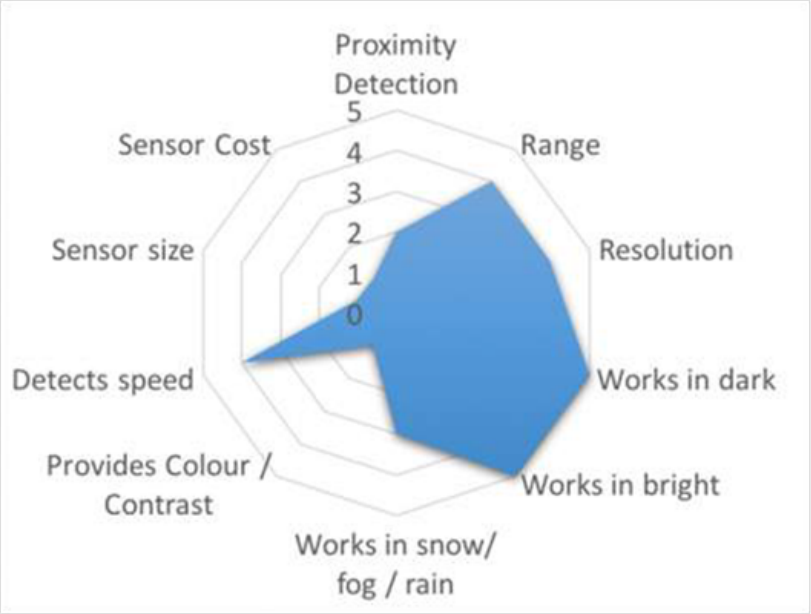


Fig. 5 : Résumé graphique du lidar [17]

Si deux capteurs sont placés côte à côte, on obtient une cartographie 3D comme le ferait la vision humaine. Le radar capte environ 30 images par seconde qui sont analysées par différents algorithmes [17].

Le radar est l'un des appareils les plus utilisés pour ses nombreux avantages (figure 6), mais suivant une étude recensée ces effets négatifs sur la santé des personnes exposées ont été mis en évidence (maux de tête, douleurs musculaires, ...) [19].



Fig. 6 : Résumé graphique du radar [17]

4.5 Sonar

Le sonar (pour *Sound navigation Ranging*) utilise le même principe d'écholocation associé au Radar. Le sonar transmet des ondes sonores en dehors de la plage reconnaissable par l'oreille humaine. Il se compose d'un émetteur et d'un récepteur. Et grâce à l'écho des ondes,

il est capable de créer un espace tridimensionnel autour du véhicule permettant ainsi de détecter efficacement les obstacles. Le sonar est couramment utilisé dans les environnements marins car ses ondes sonores se propagent plus rapidement dans l'eau. C'est pourquoi, il n'opère que sur de courtes distances à l'air libre [17]. La figure 7 résume les avantages et les inconvénients du sonar.

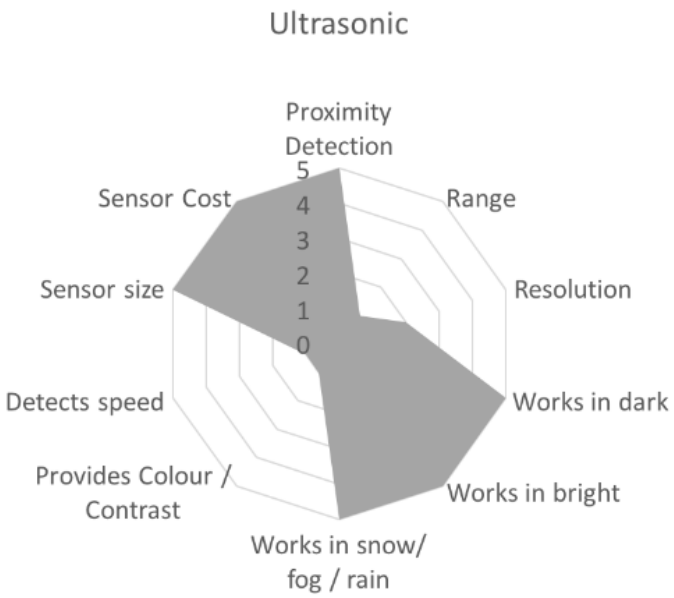


Fig. 7 : Résumé graphique du sonar [17]

4.6 Centrale inertielle

La centrale inertielle est un équipement constitué de trois gyromètres et de trois accéléromètres. Le rôle des gyromètres est de calculer la vitesse et la position du véhicule. Tandis que les accéléromètres déterminent les trois composantes vectorielles spécifiques, à savoir le vecteur déplacement dans un repère tridimensionnel classique. La centrale inertielle joue le même rôle que le GPS. Cependant, elle ne nécessite pas de se connecter à Internet pour son fonctionnement, ce qui peut s'avérer important en cas de panne de la fonction GPS due au problème de connexion à Internet [17].

4.7 Odomètre

Appareil qui mesure la vitesse d'une voiture en fonction de la vitesse de la roue ainsi que du nombre de tours effectués par celle-ci. Sur la base de ces informations, cet appareil peut déterminer la distance parcourue par la voiture [17].

5 Perspectives d'évolution des voitures autonomes

- D'ici 2023, la filiale AutoX d'Alibaba prévoit d'étendre l'utilisation de son RoboTaxi dans d'autres municipalités en Chine, voire aux États-Unis [13]. De son coté, Baidu envisage de lancer son modèle Jidu Robo-01 [20]. La compagnie Cruise, quant à elle, prévoit de lancer une production en série en 2023 [21].

- D'ici 2024, Jaguar et Daimler prévoient la commercialisation d'un véhicule autonome. Ford prévoit qu'il aura le premier véhicule autonome de masse, mais n'a pas communiqué de date cible précise [22].
- D'ici 2025, la plupart des nouveaux véhicules de la compagnie General Motors seront dotés de fonctions de conduite automatisée ainsi que de la technologie de communication entre véhicules [22].
- D'après *Past reports*, le géant Apple devrait lancer sa propre voiture autonome aux environs de 2025. La multinationale n'a cependant divulgué aucune information officielle à ce sujet [23].
- D'ici à 2035, l'institut *Navigant Research* [4] prévoit que les véhicules autonomes gagneront progressivement du terrain sur le marché et que les ventes de ce type de véhicule atteindront 95,4 millions d'unités par an, soit 75 % de toutes les ventes de véhicules légers [22]. La plupart de ces véhicules seront entièrement autonomes [7].
- Les experts membres de l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) estiment eux que ce même pourcentage (de 75% de véhicules autonomes) ne serait atteint qu'à l'horizon de 2040 [22].

6 Avantages, obstacles et inconvénients des voitures autonomes

6.1 Avantages des voitures autonomes

Les véhicules autonomes présentent plusieurs avantages, notamment :

- La simplification de la conduite : l'éventuelle personne occupant le siège conducteur sera soulagée physiquement et mentalement. Le temps imparti à la conduite pourra être valorisé par d'autres activités plus productives [24].
- La diminution du nombre d'accidents implique moins de morts et moins de blessés ainsi qu'une diminution importante des coûts qu'ils causent [11].
- L'augmentation de la capacité des routes et la réduction des embouteillages du fait d'une meilleure gestion de la circulation [22].
- Les coûts globaux de transports pourront être réduits de 40% [16].
- Grâce à une circulation plus fluide entraînée par l'avantage précédent, les véhicules autonomes permettront de consommer moins de carburant et de prolonger la durée de vie de leurs composants. Cela induira, à terme, à une diminution de la pollution de l'environnement [22].
- Un véhicule autonome constitue une aide certaine voire une délivrance aux personnes à mobilité réduite, à ceux ayant des déficiences d'acuité visuelle et aux personnes âgées [7], [24].
- Les véhicules autonomes diminueront les problèmes que rencontrent presque tous les citadins : Le stationnement. Ainsi, le véhicule pourra déposer ses passagers suivant leur destination puis d'aller chercher un parking de lui-même. Il pourra revenir récupérer ses passagers quand ceux-ci le demanderont [7].
- Les véhicules autonomes alimentés d'une source énergie renouvelable permettront de réduire de manière drastique la pollution de l'air et les gaz à effet de serre [22].

[4] Aujourd'hui connu sous le nom de *Guidehouse Insights*

6.2 Obstacles et inconvénients des voitures autonomes

Malgré des avantages considérables évidents, la voiture autonome rencontre de nombreux obstacles à sa généralisation et à son adoption par le grand public [22] :

- La perte d'emploi des transporteurs, des livreurs et autres travailleurs dont le rôle essentiel est la conduite de véhicules.
- La sensibilité du système de navigation de la voiture aux conditions météorologiques.
- Les indications manuelles des policiers ou lors de travaux temporaires peuvent ne pas être reconnues par les voitures autonomes.
- Des bugs dans les logiciels de conduite autonome peuvent causer des accidents.
- Risques de piratage du véhicule durant le partage d'informations via les protocoles de communication V2V (véhicule à véhicule) et V2I (véhicule à infrastructure).
- Les zones de travaux temporaires qui ne sont répertoriées dans aucune carte ni base de données perturbent la circulation des véhicules autonomes.
- L'intelligence artificielle (IA) embarquée dans les voitures autonomes n'est toujours pas en mesure de gérer les environnements chaotiques des centres-villes.
- Nécessité de mise en œuvre d'un cadre juridique et d'établissement de réglementations gouvernementales pour les voitures autonomes.

7 Technologies utilisées dans les voitures autonomes

7.1 Baidu

Le géant chinois Baidu prévoit de lancer en 2023 son premier modèle de voiture autonome Iidu Robo-01, illustré figure 8, en partenariat avec Geely. Cet SUV [5] embarque plusieurs capteurs (12 caméras, 2 lidars, 5 radars et 12 capteurs ultrason) et deux processeurs Nvidia Orin X pilotant le tout.

Le véhicule Jidu Robo-01 est aussi équipé d'un système optique matriciel pour communiquer avec les autres usagers de la route.

L'habitacle du véhicule est composé d'un grand écran et d'un volant compact et rétractable qui permet d'atteindre le niveau 4 inédit d'autonomie. La commande de l'ensemble multimédia de ce véhicule peut se faire par simple geste, voix ou lecture sur les lèvres du pilote [20].



Fig. 8 : Voiture Jidu Robo-01 de Baidu [20]

[5] *Sport Utility Vehicle*

7.2 BMW

Le géant BMW prévoit de produire une voiture autonome appelée *BMW Vision iNext* (figure 9) que le conducteur pourra choisir de conduire ou de se laisser conduire. Pour ce faire, BMW associera les technologies d'assistance à la conduite à celle de la conduite automatisée dans la fonctionnalité nommée : *BMW Personal CoPilot*. La conduite automatique se fait en mode *Ease*. Le conducteur du véhicule prendra la main en activant le mode *Boost*.

Le volant pourra se rétracter (en touchant le logo BMW de celui-ci ou par commande vocale) laissant ainsi plus d'espace au conducteur [8].



Fig. 9 : Voiture BMW Vision iNext [25]

7.3 Google Car

Google est acteur majeur de cette course aux voitures autonomes. Chris Urmson, qui dirigeait en 2015 le programme de développement de voitures de Google, a exposé dans une conférence TED [6] une vidéo montrant à quoi pourrait ressembler le monde à l'intérieur d'une voiture autonome conçue par Google. Il a montré à quel point le logiciel embarqué est précis, en particulier lorsqu'il s'agit de distinguer les cyclistes des autres véhicules, ou lorsqu'un danger imminent apparaissait . Dans la Figure 10, les voitures entourant la Google Car (en blanc) sont affichées en violet. Le cycliste à une intersection à droite est affiché en rouge, et dans une image plus détaillée ci-dessous, Google Car peut également prévenir et prévoir les accidents , selon ses concepteurs. Dans l'image ci-dessous, le cycliste se décale vers la gauche en direction de la voiture de Google. Ce mouvement anormal, pouvant constituer un danger, est signalé par un point d'exclamation sur un véhicule en mouvement [26]. La démonstration d'Urmson ayant pour but de montrer que le système de conduite autonome a permis de détecter un obstacle soudain qu'un conducteur humain aurait pu ne pas voir.

[6] https://www.ted.com/talks/chris_urmson_how_a_driverless_car_sees_the_road

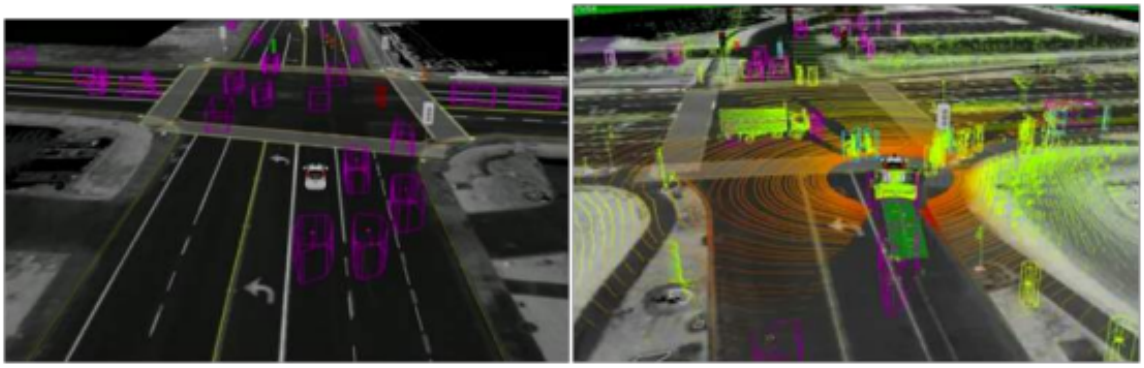


Fig. 10 : Google Car analysant son environnement [26]

7.4 Tesla

Elon Musk semble être aujourd'hui le plus avancé des constructeurs avec sa société Tesla. Pour le prouver et montrer les progrès de ses équipes, il a mis en ligne une vidéo [7] en novembre 2016 montrant des voitures Tesla analysant leur environnement, une façon de mieux comprendre les capacités d'analyse de l'ordinateur interne de ces véhicules permettant de distinguer le panneau d'un piéton ou d'un véhicule. Dans la figure 11, on a un aperçu de la technologie Testa qui permet au véhicule de faire la distinction entre les obstacles sur sa trajectoire (en vert) et les autres obstacles (en bleu). Le système avec lequel elle peut aussi reconnaître le degré de dangerosité des obstacles. La caméra frontale, outre sa position par rapport à la route, a pour mission la différenciation des cibles en course et notamment les piétons [26].

Toute cette capacité d'analyse ne serait possible sans les fonctions d'Autopilot qu'offre Tesla. Ces fonctions sont basées essentiellement sur :

- huit caméras positionnées autour de la voiture, afin de couvrir l'intégralité de son environnement à diverses distances.
- un système de traitement d'images.
- un système de calcul, 40 fois plus puissant que celui de la précédente génération de voiture de la même maison.

Cependant, il convient de signaler que même si les fonctionnalités de l'Autopilot permettent de maintenir la voiture Tesla dans sa voie, d'accélérer ou de freiner, elles ne la rendent pas autonome [27].

[7] https://vimeo.com/192179727



Fig. 11 : Vision de Tesla [26]

7.5 Volvo

Volvo prévoit de présenter à ces clients de Californie (avant d'étendre la mise sur le marché) son système d'assistance avancé pour la conduite autonome appelé *Ride Pilot* (figure 12). Mais, dès la validation de la sureté du système, Volvo mettra celui-ci en option sur son prochain SUV 100% électrique.

Volvo développe en partenariat avec Zenseact (entreprise spécialisée dans les logiciels de conduite autonome) un système permettant d'effectuer des mises à jour à distance de leur logiciel responsable notamment de la gestion de : cinq radars, huit caméras, seize capteurs ultrasons et du capteur Iris Lidar de l'équipementier Luminar [14].



Fig. 12 : Voiture Ride Pilot de Volvo [28]

Conclusion générale

Vu le nombre alarmant et toujours croissant des accidents de la route, les constructeurs automobiles se penchent vers l'industrie des véhicules autonomes espérant de la sorte lutter contre ce fléau.

Dans ce mémoire, nous avons vu l'évolution des voitures autonomes : de leur début en tant que voitures semi-autonomes jusqu'à l'arrivée de l'intelligence artificielle qui a permis leur expansion fulgurante. Nous avons constaté leurs nombreux avantages : libérer le conducteur, le soulager du stress et contribuer à la diminution des accidents de la route.

Cependant, il persiste plusieurs inconvénients ou obstacles à leur généralisation, dont celui juridique relatif à la responsabilité pénale, question majeure : Qui sera le responsable en cas d'éventuel accident, car le risque zéro accidents n'existe pas ?

En attendant la réponse à cette question, les constructeurs ne cessent de rivaliser d'ingéniosité pour trouver le système qui rendra la voiture le plus autonome possible. Nous avons pu remarquer durant la réalisation de ce Master, que l'un des axes principaux de recherche est l'intelligence artificielle (IA) notamment l'apprentissage approfondi.

Cette recherche nous a servi de première approche pour pouvoir traiter notre sujet de projet de fin d'étude intitulé :" Étude et simulation d'une voiture autonome utilisant l'apprentissage approfondi (Deep Learning) : Application sur le simulateur Udacity".

Bibliographie

[1] *Planetoscope - Statistiques : Mortalité - Morts d'accidents de la route dans le Monde*. adresse : https://www.planetoscope.com/mortalite/1270-.html (visité le 07/06/2022).

[2] G. Kermorgant et O. Siary, « Is the Law Ready for Autonomous Cars ? », en, in *Energy Consumption and Autonomous Driving*, J. Langheim, éd., sér. Lecture Notes in Mobility, Cham : Springer International Publishing, 2016, p. 89-98, isbn : 978-3-319-19818-7. doi : 10.1007/978-3-319-19818-7_10.

[3] É. Larousse, *Définitions : voiture - Dictionnaire de français Larousse*, fr. adresse : https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/voiture/82405 (visité le 06/06/2022).

[4] Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales, *AUTONOME : Définition de AUTONOME*. adresse : https://www.cnrtl.fr/definition/academie9/autonome (visité le 29/05/2022).

[5] *SAE J3016 automated-driving graphic*, en, Last Modified : 2020-05-15T14:03:15-04:00. adresse : https://www.sae.org/site/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic (visité le 28/04/2022).

[6] *Histoire des voitures autonomes*, en. adresse : http://stringfixer.com/fr/History_of_autonomous_cars (visité le 27/05/2022).

[7] K. Bimbraw, « Autonomous Cars : Past, Present and Future - A Review of the Developments in the Last Century, the Present Scenario and the Expected Future of Autonomous Vehicle Technology : » en, in *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Colmar, Alsace, France : SCITEPRESS - Science, 2015, p. 191-198, isbn : 978-989-758-122-9. doi : 10.5220/0005540501910198. adresse : http://www.scitepress.org/DigitalLibrary/Link.aspx?doi=10.5220/0005540501910198 (visité le 20/05/2022).

[8] *BMW Personal CoPilot : la conduite autonome | BMW.fr*, fr-FR. adresse : https://www.bmw.fr/fr/topics/univers/bmw-conduite-autonome.html (visité le 12/06/2022).

[9] M. McHugh, « Tesla's Cars Now Drive Themselves, Kinda », en-US, *Wired*, oct. 2015, Section : tags, issn : 1059-1028. adresse : https://www.wired.com/2015/10/tesla-self-driving-over-air-update-live/ (visité le 12/06/2022).

[10] *Autonomous Driving FAQ Let's Talk Autonomous Driving*, en-US. adresse : https://ltad.com/about/autonomous-driving-faq.html (visité le 11/06/2022).

[11] J. Berrada, « Analyse et optimisation technico-économiques des nouveaux services de mobilité basés sur l'usage des véhicules autonomes », en, p. 255,

[12] Toyota, *Toyota | Touch : la magie de la mobilité : e-Palette*, fr. adresse : https://www.toyota.fr/decouvrez-toyota/start-your-impossible/solutions-de-mobilite/e-palette (visité le 14/06/2022).

[13] J. Cusack, *How driverless cars will change our world*, en. adresse : https://www.bbc.com/future/article/20211126-how-driverless-cars-will-change-our-world (visité le 04/06/2022).

[14] *Volvo Cars présente son système d'assistance à la conduite autonome Ride Pilot en Californie*, fr-fr. adresse : https://www.media.volvocars.com/fr/fr-fr/media/pressreleases/292917/volvo-cars-presente-son-systeme-dassistance-a-la-conduite-autonome-ridepilot-en-californie (visité le 12/06/2022).

[15] *Baidu et Pony.ai peuvent proposer des courses à bord de leurs véhicules autonomes sans chauffeur*. adresse : https://www.usine-digitale.fr/article/baidu-et-pony-ai-peuvent-proposer-des-courses-a-bord-de-leurs-vehicules-autonomes-sans-chauffeur.N2000042 (visité le 12/06/2022).

[16] G. T., *Qu'est-ce qu'une voiture autonome ?*, fr-FR, avr. 2022. adresse : https://www.ferrari-by-logic3.com/voiture-autonome/ (visité le 13/06/2022).

[17] D. Albert, M. Fassi, J.-F. Robin et al., « Vehicule Autonome : Etat de l'art, capture et traitement de l'information embarquees », fr, Institut national des sciences appliquées de rouen, rapp. tech., 2017, p. 27.

[18] N. Naas et S. Riad, « Détermination de la position d'un objet à l'aide d'un couple de caméras », fr, Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de master en Informatique, Université Abd Elhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2012. adresse : http://e-biblio.univ-mosta.dz/bitstream/handle/123456789/9359/MINF02.pdf.

[19] *Ondes électromagnétiques : quels effets sur le corps humain ?*, fr. adresse : https://www.pediact.com/blog/ondes-electromagnetiques-quels-effets-sur-le-corps-humain (visité le 19/06/2022).

[20] *JIDU Robo-01, la voiture autonome de Baidu*, fr, juin 2022. adresse : https://www.automobile-propre.com/jidu-robo-01-la-voiture-autonome-de-baidu/ (visité le 12/06/2022).

[21] *Le match Ford-GM de la voiture autonome*, fr, Section : Tech, juin 2021. adresse : https://www.autonews.fr/hi-tech/le-match-ford-gm-de-la-voiture-autonome-98693 (visité le 13/06/2022).

[22] J. Ondruš, E. Kolla, P. Vertaľ et Ž. Šarić, « How Do Autonomous Cars Work ? », en, *Transportation Research Procedia*, LOGI 2019 - Horizons of Autonomous Mobility in Europe, t. 44, p. 226-233, jan. 2020, issn : 2352-1465. doi : 10.1016/j.trpro.2020.02.049. adresse : https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146520300995 (visité le 13/05/2022).

[23] K. Melnick, *The Apple Car Could Feature VR Technology And No Windows*, en-US, mai 2022. adresse : https://vrscout.com/news/the-apple-car-could-feature-vr-technology-and-no-windows/ (visité le 29/05/2022).

[24] N. Monot, « Des systèmes d'aide à la conduite au véhicule autonome connecté », fr, Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 2019. adresse : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02347511/document.

[25] G. Susannah, *2021 BMW iNext could have more than 600km of electric range*, en-AU, sept. 2020. adresse : https://www.drive.com.au/news/2021-bmw-inext-could-have-more-than-600km-of-electric-range/ (visité le 20/06/2022).

[26] R. Panfili, *Comment les voitures autonomes voient le monde qui les entoure*, fr-FR, Section : Tech & internet, jan. 2017. adresse : http://www.slate.fr/story/134897/voitures-autonomes-monde (visité le 13/06/2022).

[27] Tesla, *Autopilot de Tesla*, fr-FR. adresse : https://www.tesla.com/fr_FR/autopilot (visité le 14/06/2022).

[28] W. Christian, *What Is Volvo Ride Pilot ?*, en-US, jan. 2022. adresse : https://www.edmunds.com/car-news/what-is-volvo-ride-pilot.html (visité le 12/06/2022).

ملخص

كجزء من أطروحة الماستر لدينا ، أجرينا بحثًا وثائقيًا عن السيارات ذاتية القيادة. ساعدنا هذا البحث على فهم هذه المركبات بشكل أفضل وتصنيفها وفقًا لمستوى استقلاليتها. لقد رأينا أيضًا تطورها بمرور الوقت بالإضافة إلى آفاقها المستقبلية. كنا مهتمين بكيفية عملها وفي التقنيات المختلفة التي تستخدمها الشركات في هذا المجال (Tesla ، BMW ، Google ، ...).

كان هذا البحث بمثابة النهج الأول للتمكن من معالجة موضوع مشروعنا في نهاية الدراسة بعنوان: "دراسة ومحاكاة سيارة ذاتية القيادة باستخدام التعلم العميق: التطبيق على محاكي Udacity ".

كلمات مفتاحية :

CNN ، الذكاء الاصطناعي ، محاكي Udacity ، الرؤية الحاسوبية

Résumé

Dans le cadre de notre mémoire de Master, nous avons réalisé une recherche documentaire sur les voitures autonomes. Cette recherche nous a aidé à mieux connaître ces véhicules et à les catégoriser selon leur niveau d'autonomie. Nous avons aussi vu leur évolution dans le temps ainsi que leurs perspectives futures. Nous nous sommes intéressés à leur fonctionnement et aux différentes technologies utilisées par les entreprises du domaine (Tesla, BMW, Google, ...).

Cette recherche nous a servi de première approche pour pouvoir traiter notre sujet de projet de fin d'étude intitulé : "Étude et Simulation d'une Voiture Autonome Utilisant l'Apprentissage Approfondi (Deep Learning) : Application sur le Simulateur Udacity".

Mots-clés : Voiture autonome, véhicule entièrement automatisé, conduite autonome, véhicule à délégation de conduite.

Abstract

In this Master thesis, we conducted a literature search on autonomous cars which helped us to understand and categorise them according to their autonomous level. We also had an oversight on both their evolution and their future perspectives. We looked into how they work and the different technologies used by the companies operating in this field (Tesla, BMW, Google, ...).

This research was also a first step towards tackling our engineering graduation project titled "Study and Simulation of an Autonomous Car Using Deep Learning : Implementation on the Udacity Simulator".

Keywords : Autonomous car, fully automated vehicle, autonomous driving, self-sriving car.