

# Le véhicule autonome : Perception par LiDAR

Aurélie Bracco, Azzedine Benhamed, Laure Delon,  
Robin Langlois, Kousai Smeda, Souha Makni

4 juin 2018



Projet de physique P6  
Enseignant responsable : BENSRAIR Abdelaziz  
INSA de Rouen Normandie - STPI 2  
Année 2017-2018

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Le LiDAR : présentation générale</b>	<b>4</b>
1.1	Qu'est-ce qu'un LiDAR ?	4
1.2	Principe du LiDAR	4
1.3	Avantages et inconvénients du LiDAR	7
1.4	Les différentes applications du LiDAR	8
<b>2</b>	<b>Le LiDAR dans le véhicule autonome</b>	<b>13</b>
2.1	Qu'est-ce que le véhicule autonome ?	13
2.2	Application du LiDAR dans le véhicule autonome	13
2.3	Evolutions futures et perspectives	15

## Introduction

En tant qu'élèves ingénieurs en cycle préparatoire à l'INSA de Rouen, nous devons faire un projet de physique. Ce projet a pour but de nous apprendre à travailler en groupe en répartissant les tâches et en organisant notre travail tout en respectant les dates limites. Nous avons pour objectif de présenter un poster et une soutenance ainsi qu'un rapport présentant les résultats de nos recherches bibliographiques.

Ainsi nous avons choisi de nous concentrer sur une nouvelle technologie : le LiDAR dans le véhicule autonome.

Avec l'avancement des sciences et des nouvelles technologies les voitures deviennent de plus en plus perfectionnées. Mais une question subsiste : Comment réduire les accidents de la route sans perdre de temps sur les transports quotidiens? Le LiDAR, combiné à un véhicule autonome apparaît comme une solution dans la mesure où il permettrait de cartographier, grâce à de nombreux capteurs, l'environnement où se trouve la voiture et d'agir en conséquence. Ce qui permettrait idyllyquement d'éliminer toute erreur humaine.

Nous avons donc choisi de nous intéresser à cette problématique car il s'agit d'un sujet d'actualité qui est à l'origine de nombreuses recherches et qui ne cesse d'évoluer aussi bien en France que dans le reste du monde.

Pour traiter ce sujet, nous présenterons d'abord la technologie du LiDAR à travers une présentation générale, les différents avantages et inconvénients ainsi que les applications de cette technologie. Dans la deuxième partie, nous traiterons le véhicule autonome en commentant les avantages et inconvénients ainsi que les différentes perspectives futures.

# Chapitre 1

## Le LiDAR : présentation générale

### 1.1 Qu'est-ce qu'un LiDAR ?

Le mot 'LiDAR' est un acronyme de l'expression anglaise « light detection and ranging », soit en français : « détection et estimation de la distance par la lumière ». La technique du LiDAR repose sur la mesure à distance fondée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur. Le fonctionnement du LiDAR est similaire à celui du radar, la différence étant le domaine spectral des ondes électromagnétiques. La distance du LiDAR à un objet est mesurée en fonction du délai entre l'émission d'une impulsion laser et la réception de l'impulsion réfléchi. On peut également estimer la vitesse de déplacement d'un objet (effet Doppler-Fizeau) en mesurant le décalage de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchi. Il est aussi possible de mesurer d'autres paramètres à partir des interactions lumière/matière sur le trajet du faisceau.

Historique :

- 1960 : invention du laser dont les premiers lasers à rubis et le laser « Q-switched »
- 1971 : Mission Apollo 15 au cours de laquelle on cartographie la lune à l'aide d'un altimètre laser. L'utilité et la précision des systèmes LiDAR deviennent alors connues du grand public.
- 1976 : publication du livre "Laser Monitoring of the Atmosphere", par Ed. Hinkley, premier livre témoignant du développement de cette technologie.
- 2018 : en février, l'équipe du Docteur Luis Ministro Moyano découvre, grâce à la technologie du LiDAR, une cité Maya de plus de 2000 km<sup>2</sup> au Guatemala.

### 1.2 Principe du LiDAR

LiDAR est l'acronyme de « Light Imaging Detection And Ranging » ce qui signifie : détection de lumière et mesure à distance. C'est une technologie de mesure à distance basée sur l'analyse des propriétés d'un faisceau de lumière renvoyé vers son émetteur, ce qui permet de calculer un nuage de points et donc de cartographier un site avec une précision de quelques centimètres.

Le LiDAR utilise, pour mesurer les distances, de la lumière provenant du spectre infrarouge, ultraviolet ou visible. Il se différencie donc du radar qui utilise des ondes radio

ou du sonar. Leur principe reste cependant voisin, ils envoient une impulsion de radiation électromagnétique sur une cible ou un obstacle, ensuite l'onde est réfléchi vers la source. Grâce à la vitesse de propagation de l'onde émise et du temps qu'elle a mis pour atteindre la cible, il est possible de calculer la distance entre la cible et l'émetteur.

Pour fonctionner, la majorité des LiDARs sont composés d'un laser impulsionnel. C'est un laser qui produit des flashes de lumières régulièrement espacés dans le temps et de très courte durée, ce sont des impulsions. Contrairement à un laser classique qui produit un rayonnement continu dans le temps. Cet émetteur laser est la source émettrice qui va produire une propagation de la lumière dans l'atmosphère. Sur le trajet du faisceau, la lumière est en partie atténuée par diffusion et absorption par les molécules et particules présentes.

Les LiDARs sont composés d'une seconde partie comprenant un système pour diriger la ligne de visée et échantillonner l'atmosphère. Ce système est constitué d'un télescope de réception et d'une optique associée pour recevoir et filtrer la lumière diffusée pour fournir un signal LiDAR optique.

Enfin, la dernière partie est un instrument de conversion du signal LiDAR optique en signal LiDAR électrique. Il comprend deux sous-ensembles, dont un convertisseur analogique-numérique, qui permet d'effectuer des traitements et des analyses ultérieures (le signal devient un signal LiDAR numérique) et d'un ensemble informatique (calculateurs) permettant un traitement du signal en temps réel.

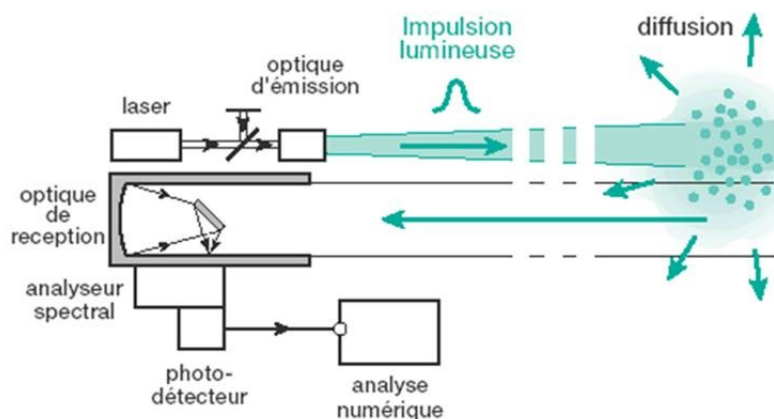


FIGURE 1.2.1 – Schéma de fonctionnement d'un LiDAR

Il existe différents types de LiDARs qui sont catégorisés par leur fonction. Par exemple :

- Le LiDAR à détection cohérente qui détecte un décalage en fréquence pour les mesures de vitesse. Pour traiter le signal, ce LiDAR estime sa fréquence instantanée dans le but de remonter à la vitesse de la cible. Il dispose d'une longueur d'onde 10000 fois plus courte que le radar, la sensibilité en vitesse est donc d'autant plus importante. Avec une émission laser continue, le LiDAR à détection est capable de sonder, sur de longues périodes, des vitesses inférieures au micromètre par seconde.

- Le LiDAR à absorption différentielle « DIAL » qui est utilisé pour la mesure des principaux gaz dans l'atmosphère. Pour effectuer ces mesures, il émet des impulsions à deux longueurs d'ondes, la première (« ON ») correspondant à une raie spectrale d'absorption d'une espèce moléculaire de l'atmosphère, la seconde (« OFF ») très proche mais hors de cette raie d'absorption. Ensuite, ces deux longueurs d'onde sont absorbées et à la réception on calcule la différence d'atténuation entre ON et OFF qui est proportionnelle à la concentration de l'espèce recherchée.

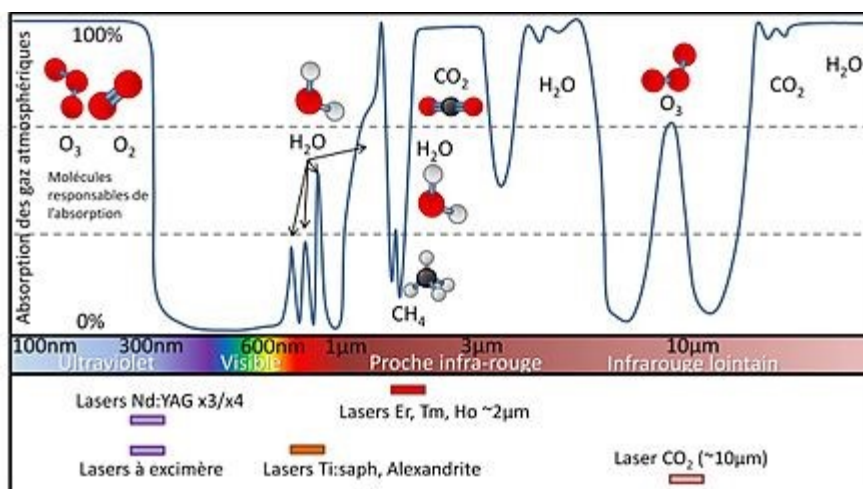


FIGURE 1.2.2 – Molécules gazeuses mesurables par le laser DIAL

- Le LiDAR flottant qui permet de calculer la vitesse du vent et de donner sa direction. Pour fonctionner un laser émet une onde lumineuse qui « rebondit » sur les particules qu'elle rencontre dans l'air. Cette onde rétrodiffusée est collectée par le télescope, ce qui permet d'en déterminer la différence de fréquence, et donc de calculer par effet Doppler la vitesse des particules, soit du vent.
- Le LiDAR à fluorescence qui permet d'analyser un objet ou matériau sans contact avec ce dernier afin d'éviter de le dégrader.
- Le LiDAR à rétrodiffusion ou LiDAR atmosphérique qui est l'un des plus vieux LiDARs et qui sert à mesurer la puissance du rayonnement optique rétrodiffusé par les particules de l'atmosphère.

Nous nous intéresserons principalement au télémètre laser qui fonctionne comme un radar et qui a pour fonction de mesurer des distances comme expliqué précédemment. Ce LiDAR utilise la télémétrie laser temps de vol. Comme montré sur le schéma ci-dessous, un faisceau laser est émis, il se réfléchit sur la cible et est détecté par le LiDAR. Un chronomètre mesure le temps entre son émission et sa détection ce qui permet de calculer des distances. Le télémètre à balayage utilise cette technique et un miroir rotatif ce qui lui permet de calculer la distance d'un multitude de points et donc de cartographier en 3D l'environnement. Il est notamment utilisé dans les véhicules autonomes.

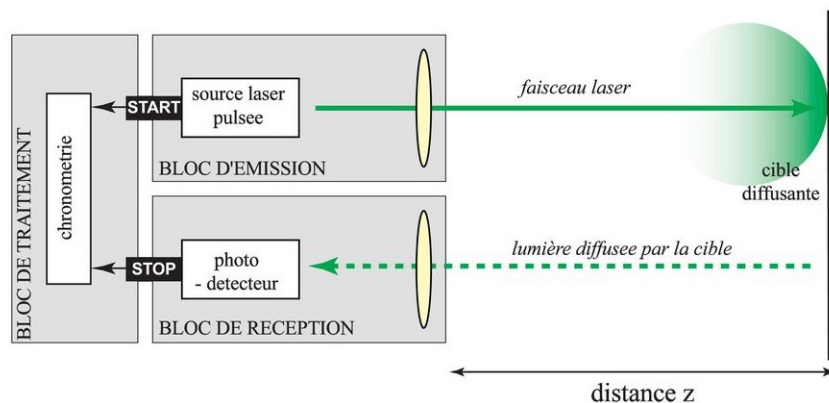


FIGURE 1.2.3 – Schéma de principe d'un télémètre à détection directe

### 1.3 Avantages et inconvénients du LiDAR

Un des avantages du LiDAR est que les données recueillies par le LiDAR peuvent être rassemblées rapidement avec une extrême précision, grâce aux très courtes durées d'impulsion.

De plus, les données de surface ont une densité d'échantillonnage plus forte. La densité d'échantillonnage élevée améliore les résultats dans certaines applications telles que la délimitation d'une plaine inondable.

D'autre part, le LiDAR permet de rassembler des données d'altitude dans une forêt dense détection de plusieurs obstacles grâce à la réflexion de l'impulsion du laser, alors que la photogrammétrie ne parvient pas à révéler la surface précise du terrain en raison de la densité du couvert forestier, d'où l'intérêt de l'utilisation du LiDAR lors de certaines fouilles archéologiques en pleine forêt .

Le radar optique LiDAR utilise un capteur d'éclairage actif dont les données peuvent être récupérées jour et nuit, et ces données peuvent être intégrées à d'autres sources de données.

Enfin, les données LiDAR ne connaissent pas de distorsions géométriques comme un radar latéral.

Quant aux inconvénients, le premier est le prix élevé du LiDAR, ainsi à l'heure actuelle les prix peuvent atteindre les 75000\$, mais la tendance est à la baisse, selon les fabricants les prochains modèles seront moins chers. Ainsi le fabricant de LiDAR Velodyne LiDAR a dévoilé un nouveau modèle plus puissant, le VLS-128 qui succède ainsi au HDL-64. La présidente de Velodyne LiDAR, Marta Hall, a déclarée que les "coûts sont réduits considérablement et encore plus lorsque les volumes de commandes sont élevés", une réduction de l'ordre de 50%.

De plus, les capteurs LiDAR d'une portée inférieure à 1 km ne peuvent enregistrer des données que dans de bonnes conditions météorologiques sans pluie, sans brouillard, sans fumée, et sans neige.

D'autre part, les LiDARs sont sensibles aux attaques par saturation, qui est une attaque consistant à illuminer le LiDAR par un faisceau de lumière aussi puissant que le

sien, il ne perçoit alors plus certains objets environnants. Autrement dit, ces objets « disparaissent » en quelque sorte de la vue du LiDAR, qui se retrouve « aveuglé ».

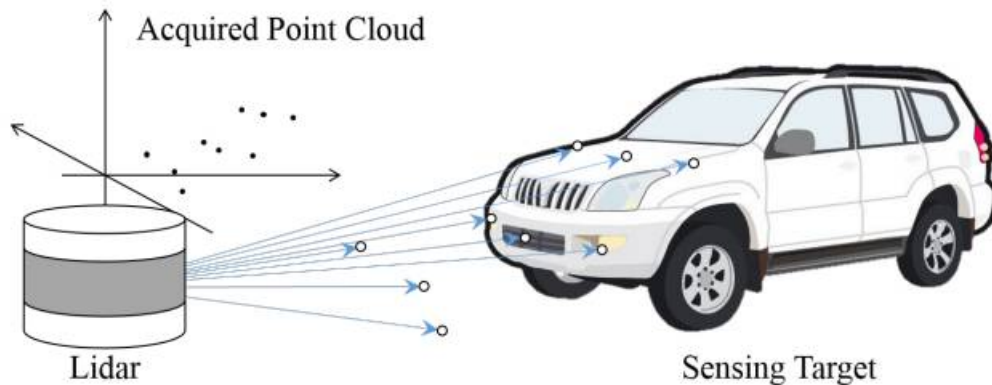


FIGURE 1.3.1 – Illustration d’une attaque par saturation

Enfin, il faut savoir que la plupart des dispositifs de LiDAR sont protégés par des verres incurvés. Or, un faisceau de lumière capable de générer un faux nuage de points peut alors exploiter le phénomène physique de la réfraction, afin de changer la direction dans laquelle se trouvent ces points, c’est ce qu’on appelle le spoofing.

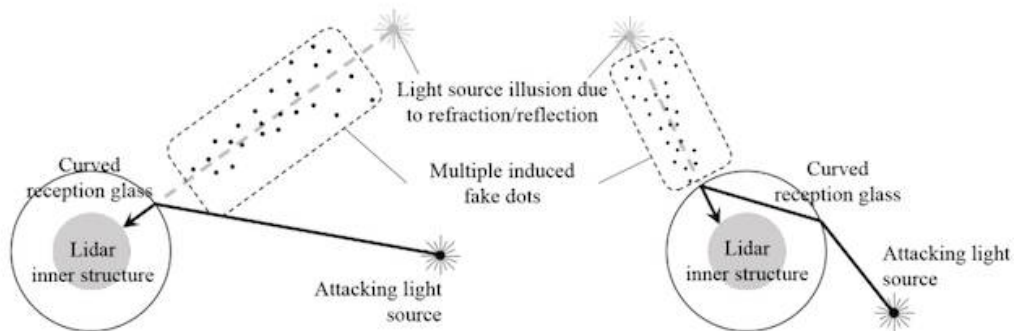


FIGURE 1.3.2 – Illustration du spoofing

## 1.4 Les différentes applications du LiDAR

Le LiDAR possède des applications dans une multitude de secteurs très variés, des domaines de la physique mais également de la biologie ou encore de la vidéo.

En agriculture, des robots autonomes équipés de LiDARs peuvent créer une carte d’un champ pour déterminer le meilleur endroit où planter certaines graines ou mettre de



l'engrais, à l'aide de critères comme l'exposition au soleil. Cela permet donc de maximiser le rendement. Un LiDAR couplé à du machine learning peut aussi permettre d'identifier les espèces de plantes. Le LiDAR peut également être utile pour des tracteurs autonomes à des endroits où le signal GPS passe difficilement.

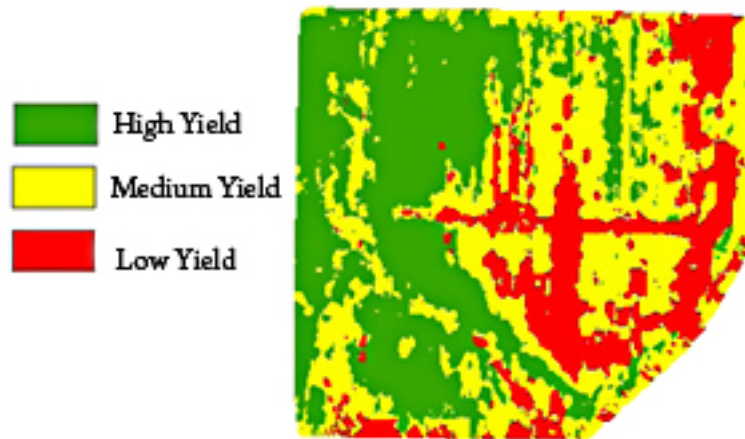


FIGURE 1.4.1 – Exemple d'analyse du rendement à l'aide d'un LiDAR

Cette technologie permet également des découvertes en archéologie. En effet, un LiDAR permet de cartographier les lieux de recherche et de voir des choses cachées par la végétation. Cela a permis par exemple la découverte en juin 2013 de la cité perdue Mahendraparvata, au Cambodge ou encore ce qui s'apparente à des réseaux routiers mayas en 2016.

Cela a aussi des applications dans la conservation des forêts. Grâce au LiDAR, on peut mesurer toutes sortes de caractéristiques sur les arbres pour surveiller leur état, et produire des cartes forestières. Par exemple l'organisation Save-the-Redwoods mène un projet de cartographie des séquoias en Californie, afin de les protéger et d'assurer la biodiversité des forêts.

Le LiDAR a conduit à beaucoup d'avancées en géologie et sciences du sol, en détectant certaines caractéristiques topographiques, ce qui permet de modéliser des phénomènes comme l'élévation du sol. On s'en sert également en sismologie.

L'une des premières applications du LiDAR a été la météorologie, où de tels appareils permettent de mesurer énormément de choses comme les vents, la composition de l'air, ou de localiser les nuages.

La police utilise de plus en plus des LiDARs au lieu des radars pour mesurer la vitesse des véhicules et faire respecter les limitations de vitesse. L'estimation de la vitesse est plus rapide, permet de mesurer la vitesse d'un véhicule seul et d'enregistrer une image de la plaque d'immatriculation. Il est aussi possible de mesurer les distances entre véhicules.



FIGURE 1.4.2 – Exemple d'utilisation d'un LiDAR pour mesurer la vitesse

Dans le secteur militaire, le LiDAR permet de détecter les mines, de détecter les attaques chimiques à grande distance, de voir des cibles camouflées ou encore d'utiliser des véhicules militaires autonomes comme en juin 2010 où un hélicoptère Boeing AH-6 a pu faire un vol autonome en évitant les obstacles.

Dans le domaine minier, le LiDAR permet de mesurer le volume des minerais, ou encore de permettre à des robots de minage de détecter et d'éviter les obstacles.

En astronomie, le LiDAR a permis de mesurer la distance Terre-Lune, à l'aide de réflecteurs préalablement placés à la surface de la Lune, avec une précision millimétrique. Ainsi, des tests de la relativité générale ont pu être faits. On a également pu établir une topographie très précise de la surface de Mars, et détecter de la neige dans son atmosphère en septembre 2008. Enfin, le LiDAR permet aussi de mesurer la densité de certains constituants dans l'atmosphère.

En mécanique des roches, on utilise le LiDAR pour caractériser la masse des roches, leur espacement, la pente ou encore l'infiltration de l'eau.

En robotique, la technologie du LiDAR permet la perception de l'environnement et la classification d'objets. Dans le domaine de l'aérospatial, le LiDAR permet de mesurer des distances, et d'effectuer des opérations de proximité sur les stations spatiales. Il permet aussi des études atmosphériques depuis l'espace.



FIGURE 1.4.3 – Utilisation des LiDARs en robotique

Le LiDAR est utilisé dans le calcul de superficie de terrains ou de mesures de profondeurs marines, toujours avec une précision dépassant rarement l'échelle du centimètre.

Le LiDAR a des applications dans d'autres moyens de transport telles que le train ou l'avion, pour assurer la sécurité des trajets.

Il permet également d'optimiser les fermes éoliennes en mesurant précisément la vitesse des vents ou les turbulences. Cela permet bien sûr d'améliorer le rendement de manière significative.

De même, cela permet également d'optimiser les installations de panneaux solaires photovoltaïques.

Dans le secteur du jeu vidéo, cela permet de reproduire des paysages réels dans les jeux de manière très fidèle. C'est utilisé notamment dans des jeux de course de simulation pour intégrer des circuits existants. Le jeu Scanner Sombre, sorti en 2017 par Introversion Software, est un jeu d'exploration de grottes qui met le système LiDAR au cœur du gameplay.

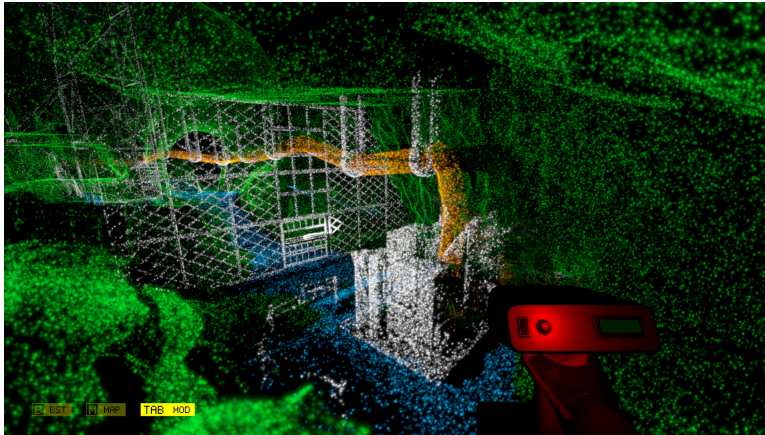


FIGURE 1.4.4 – Image du jeu Scanner Sombre

On peut voir des applications dans le domaine de la vidéo, comme par exemple dans le clip « House of Cards » de Radiohead qui a été réalisé grâce à un LiDAR et un scanner 3D à lumière structurée.

## Chapitre 2

# Le LiDAR dans le véhicule autonome

### 2.1 Qu'est-ce que le véhicule autonome ?

Une voiture est dite autonome si elle est équipée d'un système de pilotage automatique qui lui permet de circuler sans intervention humaine dans des conditions de circulation réelles. Un véhicule autonome est doté de capteurs numériques (par exemple de LiDAR), de radars et de caméras qui lui servent à modéliser son environnement en trois dimensions et à identifier les éléments qui le composent (marquage au sol, signalisations, bâtiments véhicules, piétons ...) dans le but de circuler en respectant les règles de circulation et d'éviter les obstacles. L'ensemble des informations détectées sont interprétées par un programme d'intelligence artificielle qui décide des manœuvres à effectuer (direction, freinage, accélération, clignotants...). La voiture autonome promet d'améliorer la sécurité routière, de fluidifier le trafic et de libérer le conducteur du stress de la route.

Historique :

- 1977 : le laboratoire de robotique de Tsukuba au Japon fit fonctionner une automobile automatique sur un circuit dédié (reconnaissance de marquage au sol et vitesse de 30km/h).
- 1984 : Mercedes-Benz testa une camionnette automatique équipée de caméras sur un réseau routier sans trafic (100 km/h).
- 1986 : le projet ALV (Autonomous Land Vehicle) aboutit à un démonstrateur autonome capable de suivre une route à 30 km/h.

### 2.2 Application du LiDAR dans le véhicule autonome

Les véhicules autonomes sont équipés d'un certain nombre de capteurs tels que des caméras, des capteurs ultrasons, des radars et des LiDARs. Les informations captées sont par la suite traitées par des programmes d'intelligence artificielle qui, en fonction des obstacles entourant le véhicule, décident des manœuvres à effectuer en contrôlant la voiture. Avant de nous intéresser au fonctionnement du LiDAR dans la voiture autonome, il est

nécessaire de comprendre comment les capteurs se complètent et permettent l'obtention d'une information complète.

Utiliser un véhicule autonome consiste à entrer une destination et à s'y rendre sans effectuer aucune manœuvre. Ainsi, pour permettre cela, un ordinateur de bord calcule l'itinéraire de la voiture en fonction de sa position. Le véhicule est équipé de caméras et de capteurs infrarouge permettant de détecter les marquages au sol, les panneaux et les piétons de jour comme de nuit et ainsi d'adapter la vitesse et l'allure du véhicule. De plus, des radars situés à l'avant et à l'arrière du véhicule permettent le stationnement du véhicule et la détection des obstacles environnant le véhicule autonome et ainsi d'ajuster sa trajectoire. Ces radars peuvent voir la route jusqu'à 200 mètres devant le véhicule et 70 mètres derrière. Les voitures autonomes sont également équipées d'un odomètre permettant de mesurer la vitesse du véhicule ainsi que la distance parcourue par ce dernier. Intéressons-nous au capteurs LiDAR, indispensables à la voiture autonome.

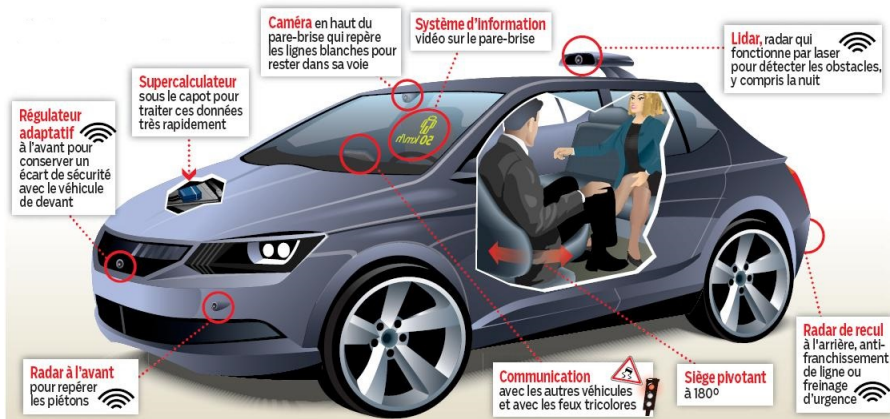


FIGURE 2.2.1 – Les fonctions clé du véhicule autonome

Le LiDAR, comme décrit précédemment, utilise un laser afin de mesurer des distances en analysant les propriétés d'un faisceau lumineux qui est réfléchi vers son émetteur. Ce dernier est positionné sur le toit du véhicule et permet de cartographier l'environnement entourant le véhicule, comme le montre l'image ci-dessous.

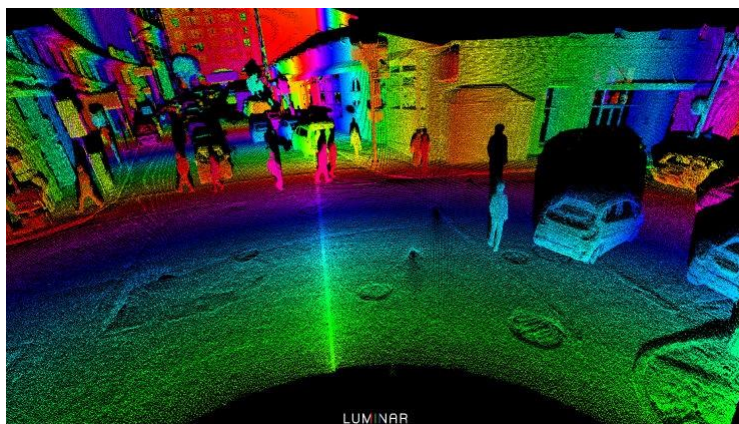


FIGURE 2.2.2 – Exemple d’environnement cartographié grâce à un LiDAR

Afin de faciliter la conduite autonome des véhicules, le LiDAR peut être assimilé à l’odométrie. Il s’agit d’une technique permettant d’estimer la position d’un véhicule en mouvement. Autrement dit, l’odométrie permet d’estimer la position future d’un véhicule en fonction de sa position actuelle. Ainsi, grâce au LiDAR, le temps mis par l’onde laser à être réfléchi permet de connaître la position du véhicule autonome par rapport à l’obstacle le plus proche.

Cependant, il est important de noter que le concept de « machine learning » est nécessaire à la mise en circulation des véhicules autonomes. En effet, ces derniers doivent parcourir un grand nombre de kilomètres afin d’enrichir leur base de données en images et expériences.

## 2.3 Evolutions futures et perspectives

La technologie LiDAR change constamment et constitue un élément essentiel pour le véhicule autonome. Cependant, il s’agit du composant le plus coûteux de la voiture autonome. Cette technologie a évolué, désormais elle n’est plus en phase de recherche et expérimentation mais le but principal est de réduire son coût de production afin de produire en grande quantité. De nombreuses entreprises travaillent pour réduire le prix du LiDAR, notamment l’entreprise Velodyne qui a lancé le VLP-16, un petit capteur précis et abordable. Le développement du LiDAR est un point très important dans la généralisation du véhicule autonome, mais il existe de nombreux autres freins à cette généralisation.

D’abord, une évolution indispensable au développement du véhicule autonome est un changement au niveau législatif. En effet, la loi doit s’assouplir pour permettre aux voitures entièrement autonomes de circuler. Les Etats Unis sont un des pays (avec le Japon et l’Allemagne) ayant le plus dérégulé les essais de voitures autonomes sur les routes ouvertes, certains états autorisent les véhicules totalement autonomes sur les voies publiques. Ces pays, en assouplissant leur loi, attirent de nombreux investisseurs dans le marché du véhicule autonome, on assiste ainsi à une course mondiale à la dérégulation.

Cependant, le problème législatif réside en cas d’accident, la loi devra définir qui est

responsable. En France, il n'y a pas encore ce problème ; la responsabilité revient au conducteur puisque les voitures totalement autonomes ne sont pas autorisées à circuler. Il est évident que les contrats d'assurance automobile devront aussi être adaptés, la responsabilité au volant va progressivement passer du conducteur au constructeur.

Le facteur humain est à l'origine de 90 % des accidents automobiles, ainsi l'automatisation des véhicules permet d'augmenter la sécurité sur les routes. Mais avec la conduite autonome, les conducteurs réduisent leur attention et perdent leurs réflexes. Ainsi, même si ces véhicules réduisent énormément les risques d'accident, l'incapacité du conducteur à prendre le relais si besoin (par manque d'attention) rehausse ce risque. En attendant que le véhicule soit totalement autonome, il faudra intervenir à certains moments de la conduite, et la question qui va se poser sera : comment ramener le conducteur à sa conduite ?

De plus, le véhicule autonome pose une question d'ordre moral. En effet, alors qu'un conducteur fait un choix moral au volant en cas d'accident (Qui sauver ? De qui privilégier la sécurité si il faut faire un choix ?) ; pour un véhicule autonome c'est l'algorithme qui devra faire ce choix.

Enfin, le facteur humain est un point essentiel qu'il faut améliorer dans la généralisation du véhicule autonome. En effet, pour une commercialisation à grande échelle, il est indispensable que les futurs acheteurs aient confiance en ces véhicules pour leur confier leur vie. D'après un sondage fait en 2016 par [Aramisauto.com/TNS Sofres](http://Aramisauto.com/TNS_Sofres) , "57% des Français appréhendent le manque de fiabilité de la voiture autonome." Il faut donc encore améliorer l'image de la conduite autonome. Ceci n'étant pas facile puisque les rares accidents incluant ces véhicules sont mis en avant par la presse. Enfin, un autre frein au développement des voitures autonomes, qui n'est pas négligeable, est que la plupart des conducteurs apprécient la conduite, ils ont envie de conduire.

Il y a donc de nombreux points à améliorer avant de parvenir à une généralisation du véhicule autonome, que ce soit au niveau du LiDAR ou même sur l'idée d'une conduite autonome.





FIGURE 2.3.1 – Le véhicule autonome : véhicule du futur ?

## Conclusion

Ce projet nous a permis de découvrir le LiDAR, un capteur extrêmement performant, ainsi que son application principale, qui est la voiture autonome. Cependant, nous avons pu voir que cette technologie s'avère être essentielle dans l'évolution de bien des domaines. Mais c'est celui de la voiture autonome qui a le plus d'impact et qui possède le plus d'enjeux actuellement. Le LiDAR pourrait bien jouer un rôle fondamental dans le futur du transport, à savoir le transport autonome. Il permet à la voiture autonome de détecter tout ce qui se trouve à sa portée et de cartographier son environnement très efficacement. En effet, il fonctionne grâce à des émissions laser, ce qui est d'abord très rapide car c'est des rayons lumineux, mais aussi très précis. Néanmoins, nous avons vu que cela n'était pas sans inconvénient : tout d'abord, le capteur est donc sensible aux phénomènes lumineux, comme la réfraction ou la saturation qui perturbe le LiDAR et lui donne des observations faussées, mais surtout son prix. Le coût du LiDAR est à l'heure actuelle l'un des principaux freins pour sa démocratisation et l'accessibilité des voitures autonomes. Mais la baisse de son coût de fabrication est l'un des axes principaux de recherche sur le LiDAR, et son prix est voué à diminuer au fil des années. Il ne fait nul doute que le LiDAR finira par s'imposer dans la plupart des secteurs, plus encore qu'aujourd'hui.

Nous avons également pu acquérir bien d'autres qualités tout au long de la réalisation de ce projet physique, notamment celles relevant du travail d'équipe comme la communication au sein du groupe, la répartition des tâches, l'organisation et la cohérence. . . Nous avons également développé nos compétences dans la recherche bibliographique, comme la vérification des sources et la sélection des informations. Ces enseignements pourront nous être utiles dans notre vie future où nous serons potentiellement amenés à les réutiliser.

## Bibliographie

- <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/advantages-of-using-LiDAR-in-gis.html>
- <https://www.lesnumeriques.com/voiture/velodyne-LiDAR-devoile-LiDAR-a-128-faisceaux-laser-n68095.html>
- <http://www.ulyces.co/camille-hamet/LiDAR-lhistoire-dune-revolution-technologique/>
- <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00483129/document>
- <https://www.numerama.com/tech/270900-voiture-autonome-un-institut-coreen-montre-comment-un-LiDAR-peut-etre-aveugle.html>
- <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/univers-LiDAR-4342/>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/LiDAR>
- <http://vehiculesautonomes.insa-rennes.fr/le-vehicule-autonome/histoire/>
- <https://leddartech.com/fr/automobile/>
- <http://www.cea.fr/comprendre/Pages/nouvelles-technologies/essentiel-sur-voiture-autonome.aspx>
- <http://www.vipress.net/voiture-autonome-de-treuve-course-aux-capteurs-LiDAR/>
- <https://news.autojournal.fr/news/1501516/voiture-autonome-technologie-radar-LiDAR-cam%C3%A9ra>
- <http://tpe-voiture-autonome.kazeo.com/les-principaux-capteurs-dune-voiture-autonome-a123093210>
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Odom%C3%A9trie>
- <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/voiture-voiture-autonome-15601/>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule\\_autonome#Principes](https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_autonome#Principes)

## Index des illustrations

- **Figure de la page de garde**  
<http://www.automobile-entreprise.com/Voiture-autonome-Renault-s-associe,5692>
- **Figure 2.0.1 : Schéma de fonctionnement d'un LiDAR**  
<http://m.20-bal.com/law/15701/index.html?page=2>
- **Figure 2.0.2 : Molécules gazeuses mesurables par le laser DIAL**  
<https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:LiDARDIAL.jpg>
- **Figure 2.0.3 : Schéma de principe d'un télémètre à détection directe**  
<http://docplayer.fr/18865974-Etude-et-realisation-d-un-telemetre-laser-par-temps-de-vol.html>
- **Figure 3.0.1 : Illustration d'une attaque par saturation**  
<https://www.numerama.com/tech/270900-voiture-autonome-un-institut-coreen-montre-comment-un-LiDAR-peut-etre-aveugle.html>
- **Figure 3.0.2 : Illustration du spoofing**  
<https://www.numerama.com/tech/270900-voiture-autonome-un-institut-coreen-montre-comment-un-LiDAR-peut-etre-aveugle.html>
- **Figure 4.0.1 : Exemple d'analyse du rendement à l'aide d'un LiDAR**  
[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/LiDAR\\_field\\_yield.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b8/LiDAR_field_yield.jpg)
- **Figure 4.0.2 : Exemple d'utilisation d'un LiDAR pour mesurer la vitesse**  
<http://www.kiasoulforums.com/2-soul-general-discussion-gen-1/104138-2010-any-power-near-rear-view-mirror-area.html>
- **Figure 4.0.3 : Utilisation des LiDARs en robotique**  
<http://versionfinal.com.ve/tecnologia/steve-el-robot-guardian-de-un-centro-comercial-de-estados-unidos-video/>
- **Figure 4.0.4 : Image du jeu Scanner Sombre**  
[https://www.indiemag.fr/sites/default/files/jeux/s/scanner-sombre/galerie/galerie-scanner-sombre\\_2.jpg](https://www.indiemag.fr/sites/default/files/jeux/s/scanner-sombre/galerie/galerie-scanner-sombre_2.jpg)
- **Figure 6.0.1 : Les fonctions clé du véhicule autonome**  
<https://www.lorientlejour.com/article/1107844/de-nombreux-defis-encore-a-relever.html>
- **Figure 6.0.2 : Exemple d'environnement cartographié grâce à un LiDAR**  
<http://mars.cs.umn.edu/research/equipment.php>
- **Figure 7.0.1 : Le véhicule autonome : véhicule du futur ?**  
<https://economyandmarkets.com/markets/will-pay-tickets-self-driving-cars/>