

Projet de Physique P6
STPI/P6/2020 – 02

Lidar pour la perception du véhicule autonome



Etudiants :

BEN ABDERRAHMANE Yassine

DUPIRE Clara

JAMMOT Adrien

PELLETIER Arsène

TERRIGEOL Emma

Enseignant-responsable du projet :

Abdelaziz BENSRAIR

Date de remise du rapport : *15/06/2020*

Référence du projet : *STPI/P6/2020 – 02*

Intitulé du projet : *LiDAR pour la perception du Véhicule Autonome*

Type de projet : *Documentation et veille technologique*

Objectifs du projet :

L'objectif de ce projet est de découvrir la technologie du LIDAR qui a une grande importance dans l'innovation dans le domaine de la voiture autonome. A travers ce sujet nous apprenons donc à mener un projet en groupe sur une longue période et à conduire des recherches documentaires précises. Ces compétences sont bien sûr très importantes pour les tâches que nous serons amenés à accomplir en tant qu'ingénieurs. Les différents rendus que nous serons amenés à produire nous permettront de développer des compétences de synthèse et de communication.

Mots-clefs du projet : *Recherche et développement, veille technologique, véhicule autonome, documentation.*

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail.....	7
2.1. Description de l’organisation adoptée pour le déroulement du travail.....	7
2.2. Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés.....	7
3. Concept du lidar et état de l’art.....	8
3.1. Fonctionnement général du LIDAR.....	8
3.2. LIDAR : Point de vue historique.....	9
3.3. LIDAR : Point de vue technologique.....	11
3.3.1. Lidar mécanique	11
3.3.2. Lidar MEMS.....	11
3.3.3. Lidar OPA.....	12
3.4. Avantages et inconvénient du LIDAR.....	12
4. Applications et évolutions futures.....	14
4.1. Véhicules autonomes.....	14
4.1.1. Définition du véhicule autonome	14
4.1.2. L’évolution du véhicule intelligent de ses débuts à aujourd’hui.....	14
4.1.3. Application du lidar dans le véhicule autonome.....	14
4.2. Autres applications.....	15
4.2.1. Pollution.....	15
4.2.2. Archéologie.....	16
4.2.3. Agriculture.....	16
4.3. Évolutions futures et perspectives.....	17
5. Conclusions et perspectives.....	19
6. Bibliographie et crédits d’illustrations.....	20
7. Annexes	22

NOTATIONS, ACRONYMES

LIDAR : Light Detection And Ranging

ABS : Antiblockiersystem (système anti-blocage des roues)

AFU : Assistance au Freinage d'Urgence

AFIL : Alerte de Franchissement Involontaire de Ligne

ToF : Time of Flight

FMCW : Frequency Modulated Continuous Wave

MIT : Massachusetts Institute of Technology

NCAR : National Center for Atmospheric Research

MEMS : Micro-Electro-Mechanical System

OPA : Optical Phase Array

ERGS : Experimental Route Guidance System

ESP : Electronic Stability Program

ALSM : Airborne Laser Swath Mapping

1. INTRODUCTION

Dans le cadre de notre deuxième année du cursus STPI (cycle préparatoire) à L'INSA de Rouen, nous devons effectuer un projet en physique. Ce projet s'effectue par groupe sur un travail de recherche bibliographique aboutissant à la rédaction d'un rapport et à la réalisation d'une affiche.

Aujourd'hui les voitures ne sont pas seulement des engins mécaniques, elles sont bardées de systèmes électroniques pouvant nous aider quotidiennement à nous garer, limiter notre consommation d'énergie ou nos émissions de particules fines. Ces systèmes sont aussi des alliés pour notre sécurité avec notamment l'ABS, l'AFU, l'AFIL ou les feux adaptatifs. Dans la quête de sécurité, les constructeurs automobiles développent des projets de voitures autonomes qui pourraient à l'avenir réduire de manière considérable les accidents sur les routes et augmenter notre sécurité et notre confort lors de nos déplacements. Cependant cela nécessite l'utilisation de nombreux instruments tels que les radars, les caméras ou les LIDAR.

Notre groupe s'est intéressé à la technologie LIDAR et en particulier à ses applications aux véhicules autonomes. Le premier objectif était d'établir un état de l'art technologique et historique, de présenter les différentes applications et enfin d'énoncer les limites de cette technologie. Le second était d'apprendre à travailler en groupe avec les contraintes que cela implique.

Nous commencerons par expliciter le principe de fonctionnement d'un LIDAR, avant de parler de l'histoire de cet instrument puis d'énoncer différentes technologies. Ensuite nous étudierons les avantages et les inconvénients du LIDAR dans les véhicules autonomes. Enfin nous travaillerons sur ses applications, principalement aux véhicules autonomes, et ses évolutions futures avant de conclure notre projet.

2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

2.1. Description de l'organisation adoptée pour le déroulement du travail

Afin de réaliser ce projet nous avons décidé de nous répartir les différentes parties à traiter :

- Yassine et Emma se sont chargés de l'historique et de l'état de l'art du LiDar.
- Arsène a travaillé sur les avantages et les inconvénients du Lidar.
- Clara s'est occupé de la partie concernant les applications du LiDar et évolutions futures .
- Adrien s'est chargé de la partie concernant les Perspectives ainsi que la conclusion du rapport.

2.2. Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés

Adrien	Arsène	Clara	Emma	Yassine
- Les Perspectives du LiDar. - Conclusion .	- Les avantages et les inconvénients du LiDar. -Montage Photos.	-Les applications du LiDar et évolutions futures. -Mise en forme Global du Rapport.	- Etat de l'art de point de vue technologique. - Introduction.	- Etat de l'art de point de vue historique. - Organisation du travail

La situation sanitaire mondiale nous a obligée à travailler à distance et donc à utiliser les outils de gestion de projet dans un exercice plus vrai que nature. Malgré le fait que nous ne pouvions pas nous voir à l'INSA, nous avons su tenir notre planning de travail dans ce contexte inédit.

Dans un premier temps, chacun a fait des recherches sur sa propre partie. Nous avons ensuite mis en commun notre travail et nous l'avons complété au fur et à mesure des semaines. Il y a une bonne entente au sein du groupe, c'est un groupe dynamique et réactif dans les tâches à réaliser.

Chaque semaine, nous nous réunissions avec notre professeur référent Mr BENSRAHAI pour échanger sur l'avancée du projet et lui poser des questions si nous en avions.

En règle générale, il était très agréable de travailler sur ce projet. Chacun était libre de choisir sa partie, sa gestion du travail.

3. CONCEPT DU LIDAR ET ÉTAT DE L'ART

3.1. Fonctionnement général du LIDAR

Le principe de fonctionnement d'un LIDAR repose le plus souvent sur le principe du ToF ou du temps de vol en français. Il s'agit d'envoyer une impulsion laser qui passe au travers d'un système de lentille, lorsque la lumière atteint sa cible un rayon est renvoyé en retour au système. Ce rayon passe au travers d'une optique de réception avant d'atteindre un photorécepteur. Ce dernier prend en compte la durée du trajet aller-retour du rayon et l'angle de ce signal pour déduire la distance à laquelle se situe la cible. Le capteur peut aussi prendre en compte des informations sur la réflectivité de notre objet. Toutes ces informations sont envoyées ensuite à une unité de traitement des signaux pour former un nuage de points à partir duquel le centre de contrôle peut prendre des décisions. ([1])

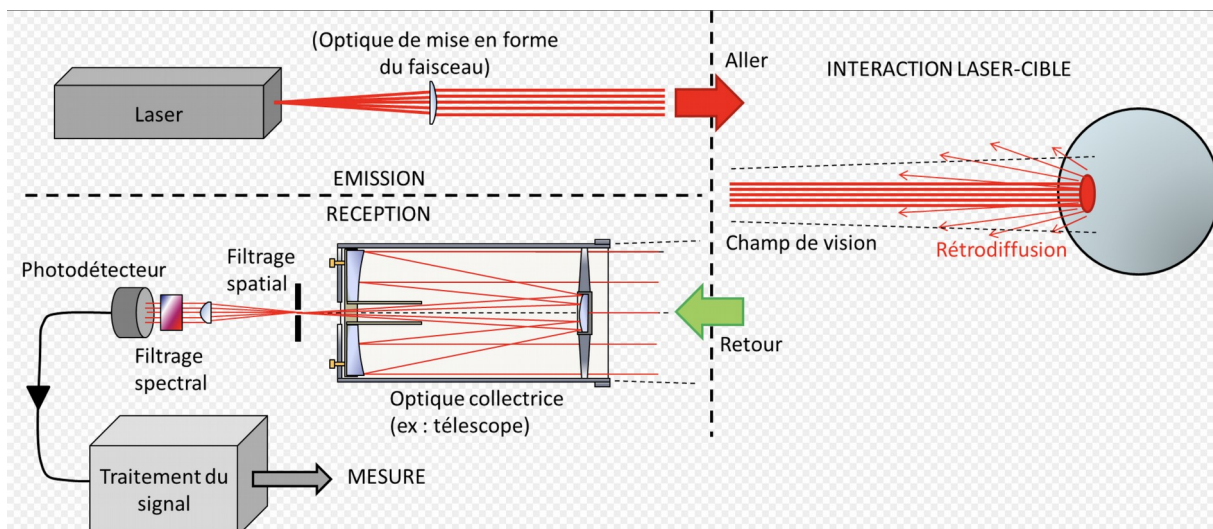
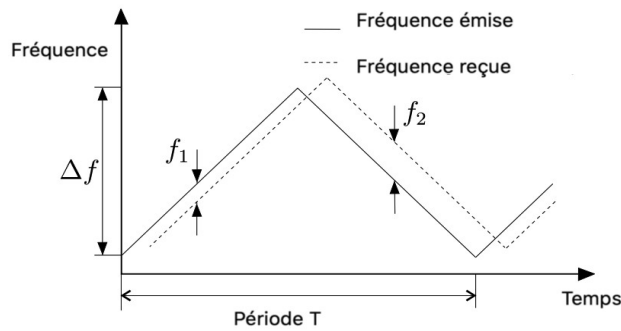


Figure 1 : Schéma de fonctionnement d'un LIDAR

Il est important de mentionner que tous les LIDAR n'utilisent pas ce principe. Il existe aussi des technologies se basant sur la FMCW (ou onde continue à fréquence modulée). La différence réside dans l'émission du faisceau. Au lieu que ce dernier soit émis par impulsion, il est alors émis de manière continue avec une fréquence variant de manière cyclique au cours du temps. Lors de l'émission de l'onde, une partie est envoyée sur la cible et l'autre est enregistrée. Lorsque l'onde transmise revient au système, on somme l'onde enregistrée et celle reçue. La différence entre ces deux ondes permet de connaître la distance à laquelle se situe l'objet. On peut aussi connaître le mouvement de la cible selon l'axe d'émission du laser avec des calculs sur ces deux ondes. Une troisième information est celle de la direction de l'objet, qui est déduite de l'angle du signal retour (comme pour le principe ToF). En cumulant ces trois informations, on obtient une scène en 3 dimensions. ([2] et [3])



Point X Lite

Figure 2 : Graphique représentant la fréquence de l'onde transmise et de l'onde reçue selon le principe FMCW

Quelque soit le principe utilisé, les LIDAR doivent remplir des critères stricts pour une application aux véhicules autonomes :

- un champ de vision horizontal entre 80 et 120° et vertical entre 15 et 20°
- une résolution du champ de vision de l'ordre du cm et des résolutions angulaires de 0,1° en horizontal et 0,5° en vertical
- des prises de mesures allant jusqu'à 200 mètres au minimum
- 20 images par secondes du champ de vision (de la scène)
- des lasers n'altérant pas la rétine humaine
- l'ensemble ne doit pas être trop encombrant, avoir un coût attractif et pouvoir être fabriqué à échelle industrielle ([4])

3.2. LIDAR : Point de vue historique



Figure 3 : Frise chronologique de l'histoire du LIDAR

Peu après leur invention au début des années 1960, les premiers lasers à rubis naturellement impulsionnels de Théodore Maiman sont exploités pour la télémétrie fine à grande distance. Aux États-Unis, Louis Smullin et Giorgio Fiocco les emploient pour mesurer précisément la distance Terre-Lune en mai 1962 (Project Luna See), alors que Guy Goyer et Robert Watson les appliquent parallèlement à la mesure de la hauteur des nuages. Ils appellent leur système « radar optique » .

L'utilité et la précision des systèmes lidar deviennent connus du grand public en 1971 lors de la mission Apollo 1517, qui cartographie la Lune à l'aide d'un altimètre laser. Alors que le mot lidar avait originellement été créé par l'assemblage de « light » et « radar », on considère à partir de cette même époque que leur dénomination est plutôt l'acronyme de « Light Detection And Ranging » ou

« Laser Imaging Detection And Ranging », à l'instar de radar ou sonar. ([5])

Ensuite, une méthode de télédétection est de plus en plus utilisée en archéologie : les premières expériences, au début des années 2000, se situent en Grande Bretagne et en Allemagne.

Cette technique permet d'enregistrer les reliefs du sol au centimètre près (planimétrie), en occultant la couverture végétale. Un scanner embarqué dans un aéronef envoie des impulsions laser vers le sol et enregistre chaque écho réfléchi : ceux-ci décrivent la surface du sol, à travers branches et végétation.

Un traitement informatique abouti à la création d'un Modèle Numérique de Terrain sur lequel on discerne toutes les anomalies micro-topographiques permettant ainsi le repérage de vestiges archéologiques masqués par la forêt (murées, tertres, chemins, bâtiments, mines, etc.).

Le contrôle au sol de ces irrégularités de terrain reste toutefois indispensable afin de vérifier leur origine humaine et leur ancienneté. Moins efficace en terrain cultivé, le LiDAR permet cependant de repérer d'anciennes limites parcellaires ou des méthodes agricoles révolues. ([6])

Par la suite, son utilisation dans le domaine militaire et spatial s'est développé avec l'apparition du GPS. Aujourd'hui des calculs de distances sont toujours utilisés par la technologie LiDAR et ne cessent de se développer et de s'améliorer en particulier dans les domaines de la robotique et de l'automobile.



Figure 4 : Prévission chronologique du LIDAR

Le terme lidar couvre une très grande variété de systèmes de mesure à distance par laser. Mais ces systèmes sont parfois désignés autrement. Actuellement, on trouve encore l'acronyme « LADAR » (Laser Detection And Ranging), qui est plutôt utilisé dans le domaine militaire sur des cibles dures ou dans la littérature anglo-saxonne. On trouve également l'acronyme « ALSM » (Airborne Laser Swath Mapping) pour les applications spécifiques de topographie aéroportée.

En français, l'expression « radar laser » est improprement employée par analogie, surtout pour les jumelles de contrôle de vitesse en sécurité routière.

Alors que le terme radar n'est souvent plus traité comme un acronyme (il n'est pas écrit en lettres majuscules et s'accorde au pluriel), la dénomination de son équivalent optique ne fait l'objet d'aucun consensus. Si bien que l'on peut trouver dans différentes publications de référence, parfois même dans le même document, « LIDAR », « lidar », « Lidar » ou « LiDaR ». ([5])

3.3. LIDAR : Point de vue technologique

De multiples technologies LIDAR existent sur le marché ou sont en cours de développement. Nous allons présenter 3 technologies importantes, utilisées ou qui ont pour objectif d'être utilisées pour les véhicules autonomes. Nous commencerons par la plus ancienne et terminerons par la plus récente qui n'est pas encore commercialisée.

3.3.1. Lidar mécanique

Les premiers instruments LIDAR utilisés sur des véhicules autonomes sont les LIDAR mécaniques. Cette appellation provient de leur principe de fonctionnement. Il s'agit d'un système optique (miroir et/ou lentille) en rotation pouvant diriger le rayon laser dans toutes les directions souhaitées. En les plaçant sur le toit des véhicules, il est possible d'obtenir des champs de vue de 360°.

On peut citer deux modèles assez répandus: les Galvo et les polygones LIDAR. Les polygones LIDAR sont constitués d'un miroir polygone en rotation sur lui-même (axe Y), au centre du système, permettant de diriger le laser dans toutes les directions. Avec ce système, il est facile de commander la vitesse de balayage de l'environnement. Les Galvo ont un miroir en rotation autour de l'axe Z (comme indiqué sur le schéma en annexe 1), ce qui permet de balayer l'environnement sur l'axe vertical. L'ensemble du système étant en rotation sur l'axe Y, on peut former un champ de vue sur 360°. Leurs principes de fonctionnement est schématisé dans les annexes 1 et 2.

Les LIDAR Galvo sont assez volumineux, peu esthétiques, coûtent assez cher et sont plus fragiles que les LIDAR avec un miroir polygones. De plus, leur fabrication à grande échelle est difficile à mettre en place. Ceci explique le fait que de nombreuses entreprises se soient tournées vers le développement des miroirs polygones pour produire en plus grande quantité avec des prix plus attractifs.

Cependant, l'aspect mécanique et le fait qu'une partie du système soit en constant mouvement rendent ces produits plus susceptibles aux vibrations et chocs lors du mouvement du véhicule mais aussi aux pannes et à l'usure prématurée de certaines composantes. Plusieurs groupes de recherches développent donc des systèmes minimisant ces mouvements, que l'on nomme Etat-Dur ou Solid-State. ([7])

3.3.2. Lidar MEMS

La deuxième technologie LIDAR qui est de plus en plus vendue depuis ces deux dernières années est celle des LIDAR MEMS. Cette dernière se base sur un miroir oscillant sur un ou plusieurs axes, à la fréquence de résonance ou non. Le miroir bouge grâce à des impulsions électromagnétiques, on applique une légère tension aux bornes de celles-ci pour créer ces petites vibrations. Les vibrations du miroir permettent de faire varier l'angle de réflexion de la lumière incidente pour illuminer la scène autour du véhicule. Cependant pour que la détection des rayons retour soit la plus précise possible, il faut qu'ils soient collimatés, c'est-à-dire parallèles les uns aux autres. Pour cela on utilise une lentille placée devant le laser. De plus, le miroir étant très petit, on utilise un deuxième système de lentille pour pouvoir diffuser les rayons réfléchis sur une plus large plage, les rayons retour passent au travers

d'un troisième système de lentille pour atteindre le photodétecteur qui est souvent une photodiode. Le système est représenté en annexe 3. ([4])

Cette technologie peut-être utilisée de différentes manières. Si l'on fait vibrer le miroir à sa fréquence de résonance on peut obtenir des angles de déviation plus importants et travailler avec des hautes fréquences. De plus, le contrôle du scan est beaucoup plus simple. Cependant, cela engendre un durcissement ou un adoucissement des fréquences retours reçus. Lors du traitement de données, le nuage de point est alors d'autant moins précis que les ondes sont modifiées. La solution est donc de faire bouger les miroirs à des fréquences inférieures à la fréquence de résonance. Pour que les angles de scan soient tout aussi grands, on ajoute des systèmes de lentilles. On qualifie alors ces LIDAR MEMS de non-linéaire. On peut aussi différencier les LIDAR travaillant sur un ou deux axes (respectivement 1D et 2D). Alors que l'approche 2D effectue un scan aussi bien horizontal que vertical, l'approche 1D dévie un rayon laser vertical et effectue un scan horizontal. ([8]) (voir en annexe 4). Actuellement, c'est l'approche 1D linéaire (donc utilisant la fréquence de résonance) qui est la plus développée car la fréquence de scan est plus importante. De plus ces technologies sont plus résistantes aux chocs et perturbations extérieures.

3.3.3. Lidar OPA

Pour terminer sur cette partie, nous allons rapidement expliciter le fonctionnement des OPA. Ces LIDAR ne sont qu'au stade de la recherche et ne remplissent pas encore toutes les conditions nécessaires à une utilisation dans une voiture autonome, mais les laboratoires se veulent optimistes et estiment une application aux véhicules autonomes d'ici 1 à 2 ans. Le principe est de diriger le faisceau laser en le faisant traverser une surface ajustable. En passant au travers de celle-ci, les rayons sont retardés les uns par rapport aux autres avec le même décalage de temps. Cela permet de diriger les rayons dans un sens donné avec le même angle. Plus il y a de rayons décalés, plus la direction de ces dernières est précise, on appelle cela des "antennes". L'enjeu est donc de développer un matériau avec de nombreuses antennes et dont le décalage de temps entres-elles est facile et rapide à effectuer (schéma en annexe 5). Les technologies actuelles se basent sur des cristaux liquides, du silicium photonique ou des fines grilles pouvant être déplacées les unes par rapport aux autres. Seulement, le nuage de point formé ne va pas au delà de quelques dizaines de mètres. Ces LIDAR ont cependant l'avantage de ne posséder aucune partie en mouvement, les rendant beaucoup moins sujets aux problèmes mécaniques et donc plus robustes. ([9] et [10])

De nombreuses technologies LIDAR se font donc concurrence pour des applications dans l'automobile. Les start-up dans ce domaine se font de plus en plus nombreuses et chacune essaye de développer son propre système. Aujourd'hui, l'instrument miracle n'existe pas encore. Les recherches continuent et des milliards sont investis pour trouver une technologie fiable, facile à produire et à faible coût.

3.4. Avantages et inconvénient du LIDAR

Un des avantages du LIDAR est qu'il peut collecter très rapidement des données. Il peut prendre environ 10 000 points dans l'espace par secondes. Cela lui permet de retranscrire en direct tout l'environnement statique et dynamique avec un temps de latence très court. De plus, le LIDAR a une très bonne précision, de part le nombre de points qu'il peut prendre dans l'espace par secondes, ce qui permet une forte densité d'échantillonnage, mais aussi grâce à la précision du laser. En effet, celui-ci a une incertitude d'environ seulement 6 mm à 50m. ([11])

Contrairement à une caméra, le LIDAR fonctionne parfaitement de jour comme de nuit. En effet, un capteur d'éclairage actif lui permet de voir son environnement sans qu'il ait besoin de source de lumière extérieure.

Un autre avantage que le LIDAR a face à la caméra ou au radar est qu'il n'a pas d'angle mort. Il peut prendre des informations en 3 dimensions et à 360° autour de lui. De plus, le rendu 3D de cet appareil lui permet de différencier plus facilement les différents objets tels que les piétons.

Enfin, le LIDAR peut être intégrer avec d'autres capteur (sonar, caméra,...), cela permet donc de combler certaines lacunes qu'il pourrait avoir. ([12])

Nous allons maintenant nous pencher sur ses inconvénients.

Comme nous l'avons vu plus tôt, le LIDAR a une très bonne précision, même à une grande distance. Mais, cela n'est possible seulement si l'environnement le permet. En effet, en cas de fortes pluies, de nuages bas, de brouillard, de fumée ou même en cas d'obstacles transparents, le rayon du laser peut être dévié ou atténué, ce qui rend vite le LIDAR inutilisable dans ces conditions.

De plus, le LIDAR demande une analyse de quantité de données très volumineuse. Il faut analyser chaque donnée pour créer un rendu en trois dimensions et avec l'énorme quantité de données recueillies, cela peut prendre du temps ou du moins requiert beaucoup de ressources.

Le LIDAR est de plus sensible aux attaques par saturation. C'est à dire que lorsqu'il reçoit un faisceau de lumière ayant une puissance identique à la sienne, il va être comme aveuglé et ne va pas voir certains objets.

Enfin, le LIDAR peut être très onéreux. Dans une voiture autonome, le seul prix du lidar coûte environ 68 000 euros et un véhicule autonome coûte entre 270 000 et 360 000 euros. Cette technologie n'est donc toujours pas accessible. Le LIDAR peut être très coûteux car il est difficile d'en produire à grande échelle. ([13])

4. APPLICATIONS ET ÉVOLUTIONS FUTURES

4.1. Véhicules autonomes

4.1.1. Définition du véhicule autonome

Un véhicule autonome est un véhicule capable de circuler sur le réseau routier en toutes circonstances sans intervention d'un conducteur. Cette technologie s'est beaucoup développée ces dernières années mais elle pose encore de nombreuses questions d'ordre légal : en cas d'accident qui serait en tort ? Mais aussi d'ordre moral : dans une situation où la voiture aurait à choisir entre percuter un obstacle et risquer la vie du conducteur ou percuter un piéton, qui doit-elle choisir ? Ces questions sont encore un frein à la mise en commercialisation de cette technologie qui est pourtant vue comme un secteur d'avenir et qui est soutenue par de grands groupes comme Google, Tesla ou Amazon. Certaines voitures sont déjà partiellement autonomes car elles sont équipées de certains systèmes de navigation qui dans certaines conditions peuvent prendre le relais sur le conducteur, par exemple pour l'aide au stationnement ou pour suivre les lignes blanches sur l'autoroute. ([14])

4.1.2. L'évolution du véhicule intelligent de ses débuts à aujourd'hui

Les premiers programmes de systèmes de transport intelligent (ou STI) ont commencé à se développer dans les années 60, grâce aux avancées technologiques dans le domaine de l'informatique et à l'ERGS aux États-Unis. Leur objectif premier était l'aide à la conduite, sous forme d'un calcul d'itinéraire effectué à chaque intersection par un ordinateur central.

D'autres projets sont nés à la même époque tels que le programme CACS au Japon, ou bien le système ALI en Allemagne.

Néanmoins tous ces projets ont rencontré le même problème : les infrastructures informatiques n'étaient pas encore assez développées pour fournir un service convenable et fluide.

Il a donc fallu patienter jusqu'aux années 80, et le développement des technologies pour voir apparaître de nouveaux projets. On remarque notamment le projet PROMETHEUS en 1986, et l'IVHS America en 1988. Ces deux projets partageaient une vision commune axée sur l'optimisation de la sécurité, un meilleur usage de l'énergie, une diminution de la pollution.

D'autres technologies ont aidé à mettre en place la notion de véhicule intelligent telles que le GPS, sur lequel se basent aujourd'hui les cybercars pour se diriger, les systèmes d'aide à la conduite, principalement des systèmes de sécurité active tels que l'ABS, l'ESP, un stabilisateur électronique de trajectoire évitant la perte de contrôle du véhicule lors de manœuvres trop brusques. Et tous les secteurs de piétons, les contrôles de phares intelligents, les alertes de franchissement de ligne, les systèmes anti collisions... Ces différentes innovations ont posé les fondations qui ont mené au véhicule intelligent que l'on connaît aujourd'hui.

4.1.3. Application du lidar dans le véhicule autonome

Comme nous l'avons déjà dit, l'utilisation d'un LIDAR permet d'obtenir une cartographie 3D de son environnement avec une assez grande précision. La disposition d'un tel équipement sur le toit d'une voiture donne donc une vision à 360° autour du véhicule. Toutes les entreprises qui travaillent sur les véhicules autonomes utilisent des LIDAR, sauf Tesla qui se repose sur d'autres capteurs pour ses véhicules. Dans l'idéal, un véhicule ne serait pas équipé uniquement d'un LIDAR mais d'une batterie d'équipements dont toutes les données permettraient d'éviter le maximum de situations à

risque. Le rôle du LIDAR dans cet ensemble de capteurs est d'être plus précis sur des grandes distances et de « scanner » tout autour du véhicule à la différence d'une caméra. ([15])

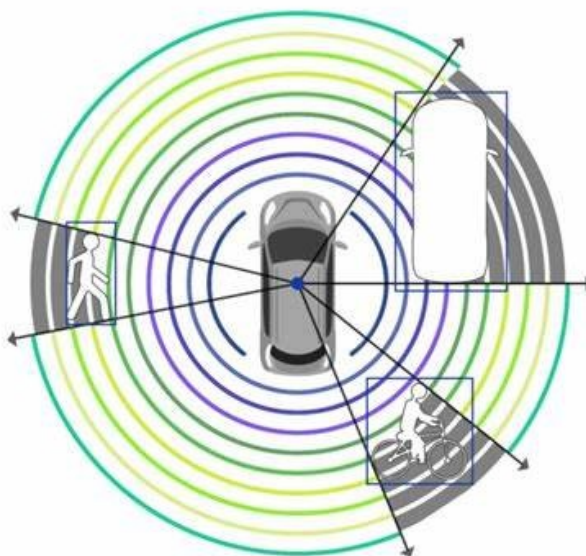


Figure 5 : Représentation des détections potentiels du LIDAR

4.2. Autres applications

4.2.1. Pollution

Une première application du LIDAR est l'analyse de la pollution. La pollution atmosphérique est le résultat d'un apport de gaz et de particules dans l'atmosphère, provenant de l'activité humaine ou naturelle. On peut citer par exemple quelques polluants : l'oxyde de soufre, le monoxyde de carbone, les hydrocarbures, etc. La pollution automobile participe de façon majeure à la dégradation de la qualité de l'air (en particulier dans les villes). Enfin, l'activité industrielle participe elle aussi à l'émission de polluants dans l'atmosphère.

Ces émissions ne cessent d'augmenter aujourd'hui, il est donc important de développer des instruments de mesure qui permettent de contrôler la concentration des différents polluants.

Le Lidar à absorption différentielle (ou lidar DIAL) permet de fournir une information quantitative sur la concentration d'une substance chimique étudiée dans l'espace sondé par le faisceau laser. Ainsi, on comprend que cet outil semble adéquat dans le cadre de l'évaluation de la pollution à la fois atmosphérique et automobile. Il présente des avantages uniques : il permet la détection de plusieurs polluants à l'état de traces ainsi que leur localisation (pouvant aller jusqu'à plusieurs kilomètres) ; les mesures sont quasi-instantanées ; il permet une surveillance globale des sites industriels, et donc de détecter et localiser des fuites mais aussi de contrôler des sites stockant des produits dangereux ; en cas d'accident, la détection est rapide ; il permet un contrôle continu des émissions des polluants dans l'air. On peut régler la longueur d'onde du Lidar DIAL en fonction du composant que l'on cherche à évaluer dans l'air (voir annexe 6). ([16])

4.2.2. *Archéologie*

Le Lidar trouve aussi une application en archéologie, car cette technologie permet aux archéologues d'accéder à des vestiges de bâtiments et de sites difficiles d'accès mais aussi à repérer, lorsqu'ils sont par exemple recouverts par la végétation. En effet, cet outil permet de s'affranchir des obstacles physiques et de rendre visibles des objets et des sites qui seraient restés cachés.

Le lidar permet donc, dans ce domaine, de localiser des vestiges dans des zones forestières ou inaccessibles ; de détecter des vestiges par des anomalies du relief ; d'étudier un site à plus grande échelle et donc d'avoir une vision globale ; d'estimer la dégradation des vestiges.

Toutefois, le Lidar n'est pas restreint au milieu forestier et peut aussi être utilisé pour repérer des micro reliefs dans les prairies. Fournissant une cartographie très fine, une fois ses données traitées, des traces agraires mais aussi des vestiges paléogéographiques (anciens chenaux, ...) peuvent être révélés. Cependant, les données lidar sont plus difficiles à traiter en milieu cultivé car les micro reliefs sont moins bien conservés à cause des labours répétés. ([17])

C'est notamment grâce au Lidar embarqué sur des drones que des ruines Maya ont pu être découvertes à Tikal au Guatemala en janvier 2018. Il s'agit de dizaines de milliers de ruines, qui étaient jusqu'alors cachées par une végétation dense. Le Lidar a donc permis une avancée considérable dans le monde de l'archéologie. Mais cette technologie ne peut remplacer la fouille.

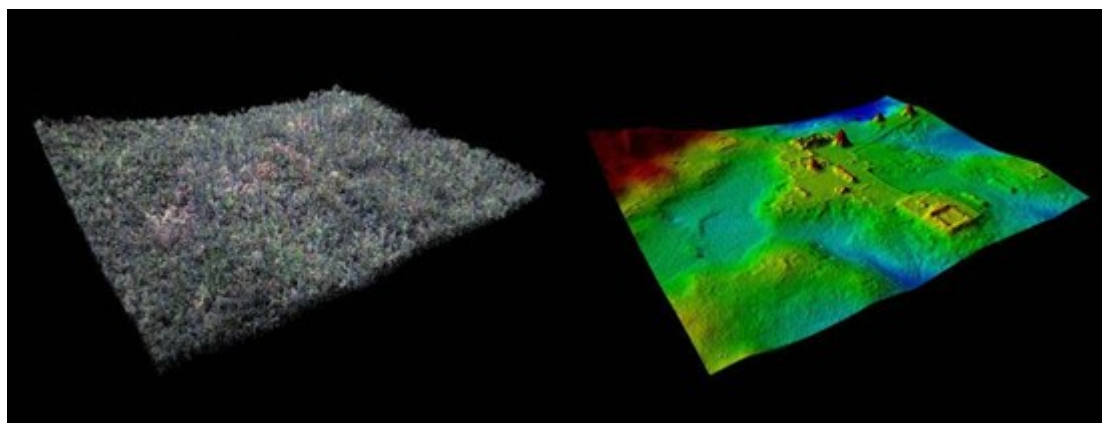


Figure 6 : A gauche, une photo classique du site El Zotz, et à droite, une image créée grâce aux données lidar

4.2.3. *Agriculture*

Le Lidar trouve, enfin, de nombreuses applications dans le secteur agricole. En effet, grâce aux données collectées grâce à des lidars embarqués sur des drones, les agriculteurs peuvent réaliser des cartes précises des ressources naturelles autour de la zone exploitée ainsi que le terrain en lui-même. Grâce à cette modélisation 3D, l'agriculteur peut alors être en mesure de discerner le terrain exact de la ferme et d'identifier la zone de captage d'eau et le flux d'érosion. La technologie Lidar joue un rôle déterminant dans la prévention de l'érosion des sols grâce à la cartographie 3D et à la modélisation d'une terre agricole donnée. En obtenant le terrain exact de la ferme et en connaissant les contours d'une ferme, les agriculteurs peuvent trouver des mesures préventives pour réduire ou éliminer l'érosion du sol.

La technologie Lidar peut également être utilisée pour collecter des données qui peuvent identifier le type de sol exact d'une certaine terre agricole. Ces informations sont importantes pour l'agriculteur car elles l'aident à savoir quel type de cultures peut être cultivées sur cette ferme, quel engrais doit être appliqué, mais aussi à connaître le meilleur moment pour planter.

On comprend donc son utilité dans l'agriculture de précision. L'agriculture de précision est la planification d'un site agricole particulier dans le but d'augmenter la productivité de ce site en améliorant les rendements globaux. Les données collectées sont donc essentielles à cette pratique. ([18])

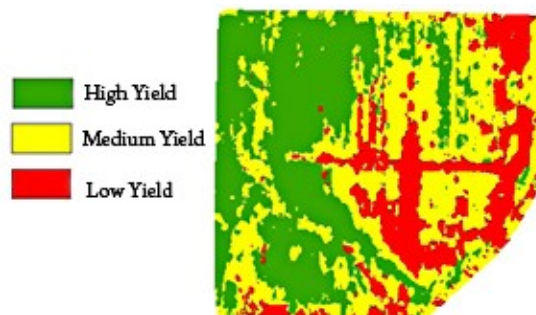


Figure 7 : Analyse du rendement d'un terrain agricole

4.3. Évolutions futures et perspectives

Le Lidar est une technologie récente, en pleine expansion, et qui constitue aujourd'hui et dans le futur un élément essentiel pour le bon fonctionnement des véhicules autonomes. Cet outil tend maintenant à se perfectionner et à évoluer pour pouvoir être commercialisé massivement dans le futur à l'international. Nous allons aborder certaines évolutions que le Lidar pourrait acquérir et les domaines qui posent encore problème.

D'abord, nous avons pu voir que l'un des inconvénients majeurs du Lidar est son prix. En effet, c'est l'un des constituants les plus coûteux de véhicule autonome : en 2019, le prix moyen d'un Lidar pour le véhicule autonome s'élevait à 10 500 dollars selon une analyse de marché réalisée par IDTechEx. L'objectif est donc de réduire le coût des composants de celui-ci, ce sur quoi travaillent aujourd'hui des grosses entreprises comme Velodyne mais aussi des startups, en adoptant par exemple l'utilisation de semi conducteur CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor). De plus, on peut supposer que la baisse des prix pourrait permettre aux constructeurs automobiles de réaliser des véhicules plus sûrs, car il serait alors abordable de placer plus de capteurs sur la voiture.

Un autre point qui pose problème à l'utilisation quotidienne de la technologie Lidar est sa perte de précision lorsque les conditions météorologiques ne sont pas optimales. Les algorithmes de vision peinent à s'adapter lors des intempéries : la pluie, la neige perturbent l'environnement qui change alors à tout instant. Un autre point que les Lidar peinent à détecter et à prendre en compte sont les reflets, les effets de flous, et plus généralement tout trompe-l'œil, qu'un humain peut facilement détecter mais un algorithme plus difficilement. Enfin, les changements brusques de luminosité posent aussi problème. L'objectif est donc de concevoir et réaliser des capteurs capables de surpasser ces obstacles.

Ensuite, il est important de se pencher sur les algorithmes qui traitent les données récoltées par les Lidars. En effet, ce sont eux qui sont responsables de chaque réaction du véhicule dans

l'environnement lorsqu'il circule. Ces algorithmes sont basés sur le deep-learning et sont utilisés en simulation pour enrichir au maximum leur base de donnée, pour qu'une fois en situation réelle, ils puissent comparer l'environnement à des situations déjà rencontrées. Mais, les situations possibles sur route semblant infinies, il semble difficile qu'un véhicule autonome puisse être parfaitement opérationnel en toute circonstances. Par exemple, dans une rue encombrée, un véhicule autonome pourrait rester à l'arrêt : il faut donc développer les algorithmes déjà existant afin qu'ils deviennent plus "humains", c'est-à-dire se rapprocher des limites à la fois physiques et théoriques en respectant toujours le code de la route.

Cependant, avant qu'un véhicule autonome puisse un jour circuler légalement, il y a un grand pas à faire au niveau de la législation. En France, par exemple, les véhicules autonomes sont autorisés depuis le 3 août 2016 à circuler dans le cadre d'essais grâce à une ordonnance, car la réglementation au niveau internationale (défini par la convention de Vienne), ordonne que le conducteur doit pouvoir rester maître du véhicule. On comprend donc que des modifications importantes ont besoin d'être faites dans les années à venir au niveau de la loi. Ces modifications, en France, sont permises depuis le vote de la loi d'orientation des mobilités (votée en décembre 2019), et pourront notamment porter sur le code de la route. ([19])

L'un des principaux problèmes porte sur la responsabilité du conducteur en cas d'accident. En effet, aucune loi ne prévoit qui serait responsable dans le cas d'un accident avec un véhicule autonome. La question repose sur : qui doit on porter responsable ? Il peut exister plusieurs responsables : le propriétaire du véhicule mais aussi le constructeur. On comprend aussi que les contrats d'assurances devront être adaptés à ces situations.

Les véhicules autonomes sont des véhicules connectés (wifi, bluetooth..), elles peuvent donc faire le sujet de cyberattaques. Dans le futur, des véhicules pourront être conduits à distance : la trajectoire du véhicule peut être modifiée, sa vitesse augmentée, et cela engendrerait des conséquences très graves pour les passagers du véhicules mais aussi et surtout pour les autres usagers présents sur la route. On comprend donc que pour une question de sécurité évidente, la sécurité des logiciels contrôlant les véhicules autonomes devra être renforcée, car même si ce sont des technologies très récentes, elles ne sont pas pour autant invincibles face aux attaques informatiques.

Enfin, le véhicule autonome pose un problème de l'ordre moral. Par exemple, si le logiciel pilotant le véhicule doit faire face à un élément soudain et faire un choix entre 2 situations dangereuses, comment fera-t-il ? Doit-il protéger le piéton et sacrifier les passagers ou inversement ? Même si cela semble extrême, le véhicule autonome sera confronté un jour à cette situation, et il semble encore difficile d'accepter qu'un logiciel décide de qui doit vivre. Là encore, de nombreux choix éthiques vont devoir être définis pour que l'on puisse un jour voir une commercialisation des véhicules autonomes.

5. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Notre travail sur le vaste sujet du LIDAR nous a permis de découvrir de nombreux aspects et enjeux de ce domaine, comme le fonctionnement de cette technologie mais aussi les différentes améliorations et innovations qui jalonnent sa progression. Nous avons aussi pu étudier les avantages ou inconvénients que propose un LIDAR par rapport à d'autres technologies de perception en fonction de l'utilisation que l'on en fait et dans quel cadre. Ce projet a aussi été pour nous l'occasion de mener une réflexion sur le sujet du véhicule autonome en général avec tous les enjeux techniques mais surtout éthiques qui y sont liés.

Ce projet nous a permis à tous les cinq de travailler sur un assez long terme sur le même sujet et ainsi de rencontrer certains problèmes qui vont avec l'organisation du travail en équipe. Cela ouvre de nouvelles perspectives pour nous sur ce que signifie le travail d'ingénieur et la dimension de gestion de projet qui y est associée. L'organisation de cet enseignement a été perturbée par la crise sanitaire du COVID-19, étant donné que l'oral de présentation a été supprimé et que nous avons dû travailler entièrement à distance pour la majeure partie du projet. Cependant, cela nous a permis d'utiliser des méthodes de travail nouvelles pour nous qui nous serons sans aucun doute très utiles dans la suite de nos études et dans le monde du travail post-coronavirus. Nous avons notamment pu surpasser ces difficultés d'organisation grâce à des réunions hebdomadaires avec notre encadrant Abdelaziz Bensrhair et ses retours nous ont été précieux pour constamment améliorer notre travail.

Si nous avions pu poursuivre ce projet, nous aurions certainement accentué nos recherches sur les questions moins techniques mais tout aussi intéressantes et complexes de la juridiction autour du véhicule autonome et des questions éthiques qui sont liées à leur mise en place dans les rues.

6. BIBLIOGRAPHIE ET CRÉDITS D'ILLUSTRATIONS

- [1] <https://www.ti.com/lit/wp/slyy150/slyy150.pdf>
- [2] <https://www.laserfocusworld.com/home/article/16556322/lasers-for-lidar-fmcw-lidar-analternative-for-selfdriving-cars>
- [3] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999065/FULLTEXT01.pdf>
- [4] https://www.researchgate.net/publication/326632441_1D_MEMS_Micro-Scanning_LiDAR
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lidar>
- [6] <https://www.culture.gouv.fr/Regions/Drac-Bourgogne-Franche-Comte/Patrimoines-et-Architecture/Archeologie/L-apport-de-la-technologie-LiDAR-a-la-connaissance-archeologique>
- [7] <https://prezi.com/p/nqc61nyjjvgf/lidar/>
- [8] https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/mems_mirror_koth9003e.pdf
- [9] <http://www.mingwulab.berkeley.edu/research/lidaropa/>
- [10] http://epic-events.eu/epic/2019/lidar2019/191030_EPIC_LIDAR2019_P46.pdf
- [11] <https://www.dynalit.fr/Mesures/Instruments-de-mesure/Morphologie/LIDAR>
- [12] <https://velodynelidar.com/what-is-lidar/>
- [13] <https://www.generationrobots.com/blog/fr/qu-est-ce-que-la-technologie-lidar/>
- [14] https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_autonome
- [15] <https://www.kicklox.com/lidar/>
- [16] Jean CORNILLAULT, “Lidar de détection de pollution”, Techniques de l'ingénieur Systèmes optroniques, 1997
- [17] GEORGES-LEROY Murielle, “Lidar : technique de détection au service de l'archéologie”, Techniques de l'ingénieur Les grands événements de l'année, 2014.
- [18] <https://www.iotforall.com/lidar-technology/>
- [19] LOI n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités, <https://www.legifrance.gouv.fr/eli/loi/2019/12/24/2019-1428/jo/texte>
- [20] <https://prezi.com/hfpw0roebpg7/lidar-101/>

Crédits d'illustrations

Page de couverture : http://www.avem.fr/img/news/2018/7259_3.jpg

Figure 1 : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Lidar#/media/Fichier:SchemaGeneralLidarpng.png>

Figure 2 : <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:999065/FULLTEXT01.pdf>

Figure 3 : Composition personnelle réalisée par Yassine.

Figure 4 : https://www.tematys.fr/reports/64-large_default/lidar-technologies-for-the-automotive-industry-technology-benchmark-challenges-market-forecasts.jpg

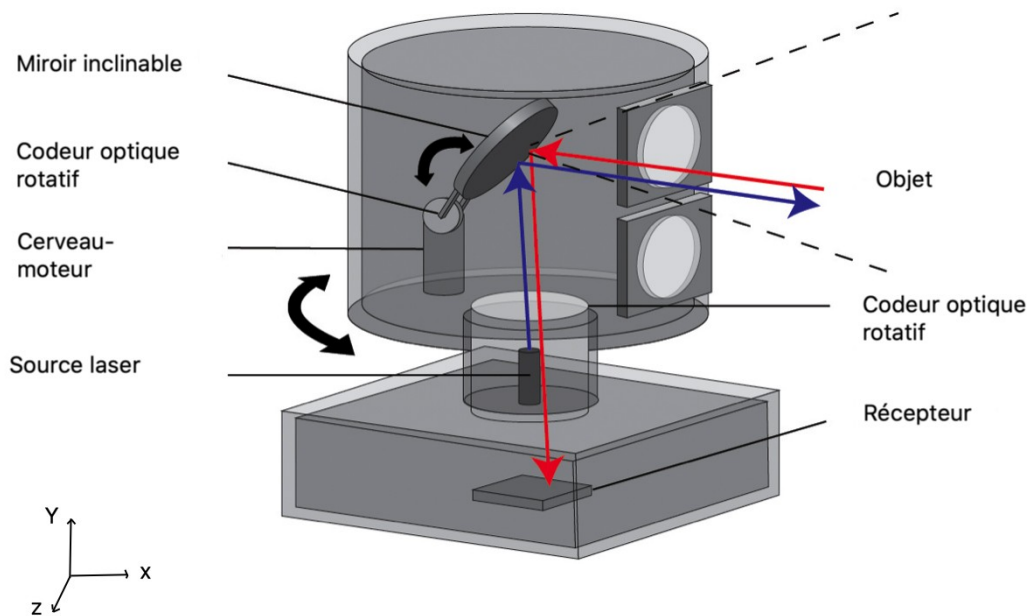
Figure 5 : <https://velodynelidar.com/blog/how-autonomous-vehicles-perceive-and-navigate-their-surroundings>

Figure 6 : Jean CORNILLAULT, "Lidar de détection de pollution", Techniques de l'ingénieur Systèmes optroniques, 1997.

Figure 7 : https://www.sciencesetavenir.fr/archeo-paleo/archeologie/la-complexite-des-anciennes-cites-mayas-confirmee_127993

Figure 8 : <https://www.ars.usda.gov/news-events/news/research-news/2010/ars-study-helps-farmers-make-best-use-of-fertilizers/>

7. ANNEXES



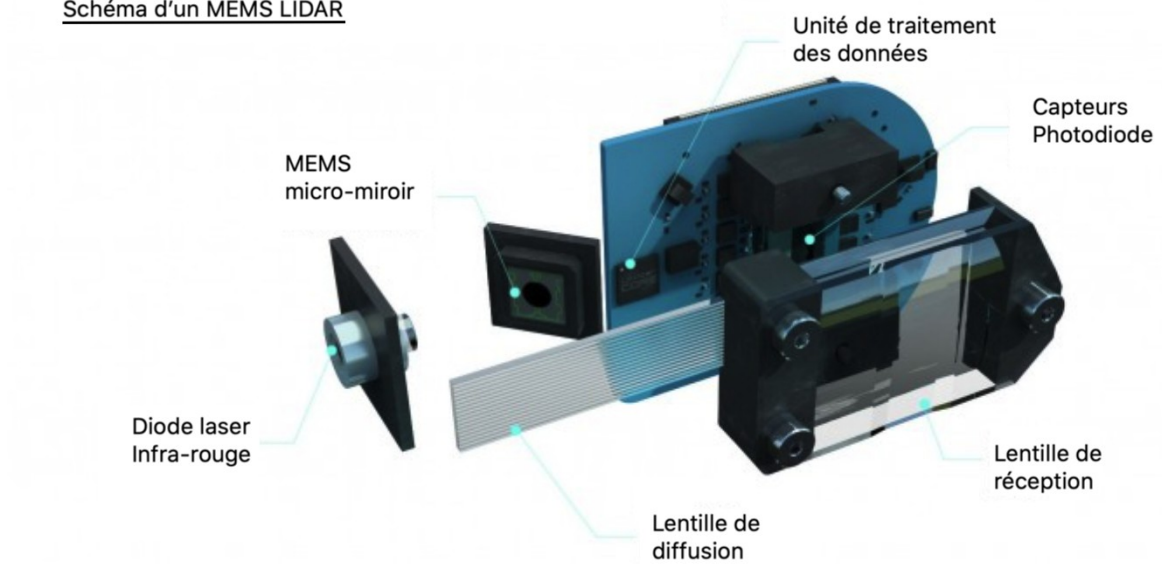
Point X lite

Annexe 1 : Schéma de fonctionnement d'un LIDAR Galvo



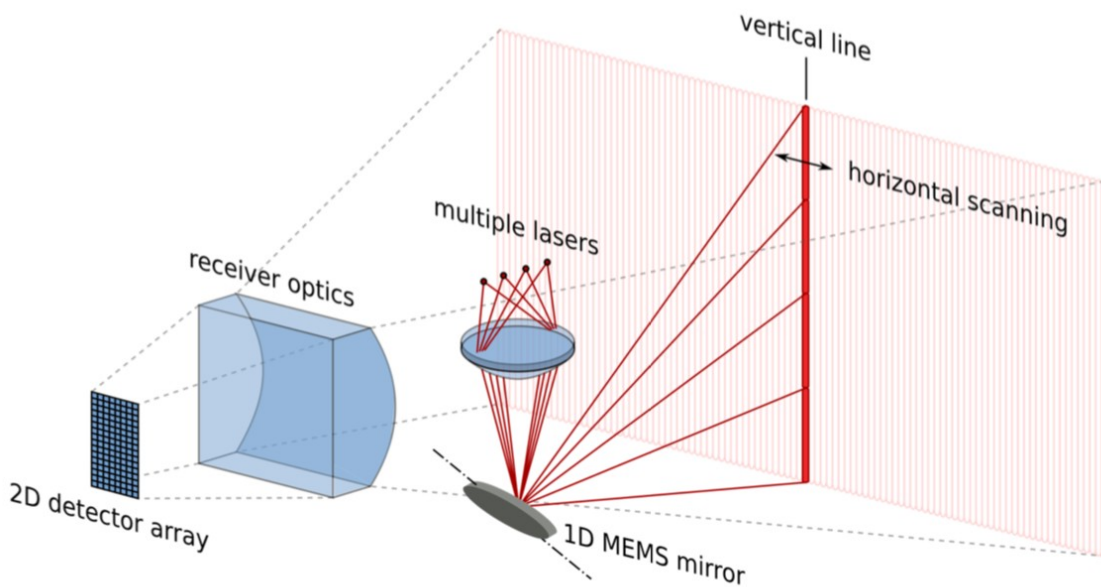
Annexe 2 : Représentation schématique d'un miroir polygone

Schéma d'un MEMS LIDAR

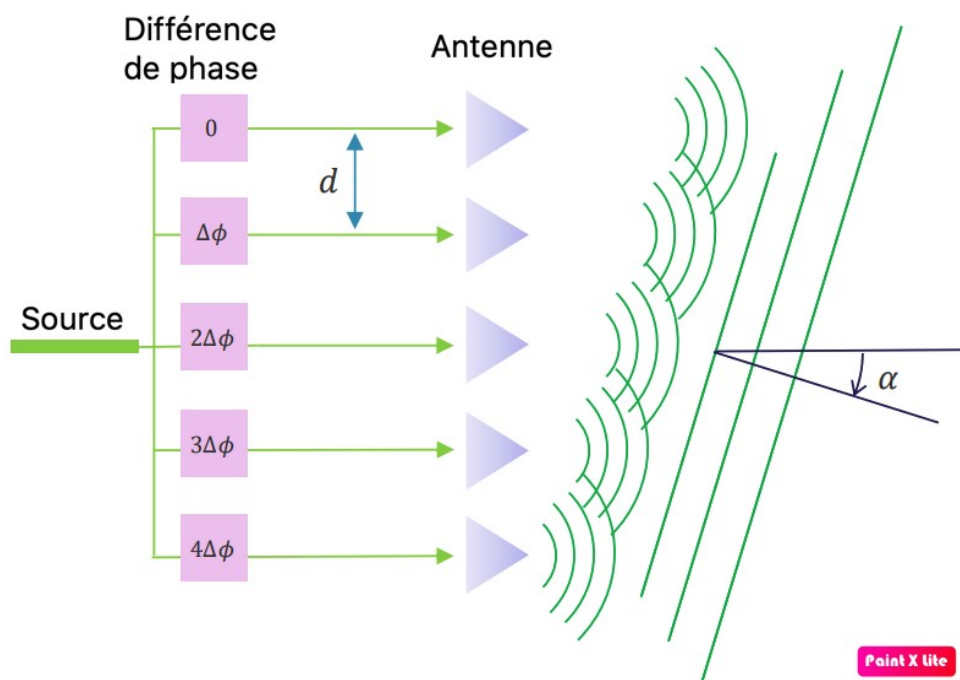


Point X lite

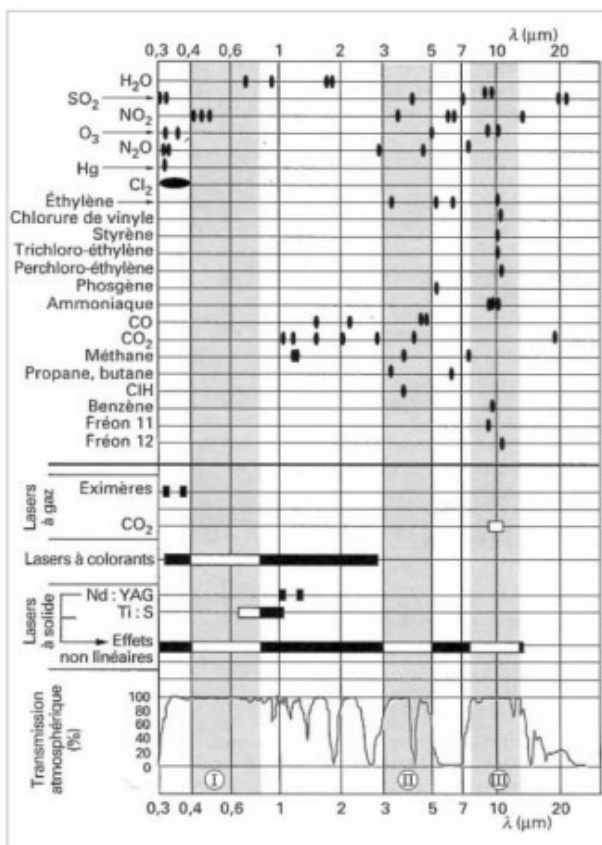
Annexe 3 : Schéma de fonctionnement d'un LIDAR MEMS



Annexe 4 : projection du rayon laser dans une LIDAR MEMS 1D



Annexe 5 : Schéma de fonctionnement d'un OPA



Annexe 6 : Lidar pour la détection de polluants : objectifs, sources, laser, longueur d'onde