

LIDARS ET VOITURES AUTONOMES



Remerciements

Je remercie M. Mateesco, qui m'a guidé à différents stades de complétion de ce projet. J'aimerais également remercier ma grand-mère Sylviane Haeffliger, qui a pris le temps de relire mon travail. Merci aussi à mon frère, Henry Haeffliger, pour son aide lors de la réalisation du montage.

Image de couverture de (Waymo-Picture, 2022)

Résumé

Ce travail discute les possibilités et limites des LiDARs dans l'application des voitures autonomes. Il explique d'abord le fonctionnement des véhicules autonomes et la manière dont les LiDARs y sont utilisés. Ensuite, un appareil simulant le fonctionnement des LiDARs dans les voitures autonomes a été construit, et un programme pour l'acquisition et le traitement de données a été codé en Python et Shell. L'instrument a été utilisé pour des expériences dans un appartement. Elles ont permis de mettre en évidence l'impact de situations particulières rencontrées par les voitures équipées de LiDARs sur la fiabilité des résultats obtenus. Il a été conclu que les LiDARs présentent des avantages considérables, mais qu'ils restent insuffisants pour pouvoir être utilisés seuls dans les véhicules autonomes. La technologie globale progresse rapidement, malgré des obstacles techniques. Ces voitures pourront être commercialisées quand les progrès auront permis d'assurer une conduite suffisamment sûre et que des questions éthiques auront été traitées.

Table des Matières

1.	Introduction.....	3
1.1.	Contexte	3
1.2.	But.....	3
1.3.	Les voitures autonomes	3
1.3.1.	Autonome ou automatisé ?.....	3
1.3.2.	Qu'est-ce qu'une voiture autonome ?.....	4
1.3.3.	Comment fonctionnent les voitures autonomes ?.....	4
1.3.4.	Classification des voitures autonomes selon le degré d'autonomie	4
1.3.5.	Dangers des systèmes semi-autonomes.....	5
1.3.6.	Avantages des véhicules autonomes	6
1.4.	Les LiDARs	7
1.4.1.	Principe de fonctionnement.....	8
1.4.2.	Les technologies semblables	8
1.4.3.	Application des LiDARs dans les voitures autonomes	9
1.4.4.	Avantages des LiDARs dans l'application des voitures autonomes	9
1.4.5.	Limitations des LiDARs dans l'application des voitures autonomes	10
2.	Le LiDAR - Développement personnel	11
2.1.	Montage effectué.....	11
2.1.1.	Matériels utilisés – composants.....	12
2.1.2.	Montage final.....	14
2.1.3.	Le code en Python et Shell.....	14
2.1.4.	Mesures et limitations.....	15
2.1.5.	Mesure de contrôle.....	16
2.1.6.	Influence des différents types de lumières	17
2.1.7.	Effet de l'ajout d'un miroir dans le champ de détection	18
2.1.8.	Effet d'une fenêtre	19
2.1.9.	Effet de surfaces absorbantes.....	21
3.	Liens avec les voitures autonomes – analyse et solutions possibles	22
3.1.	Les mesures de contrôle	22
3.2.	Les mesures avec illumination variable	22
3.3.	Les mesures en présence de miroirs	22
3.4.	Les mesures en présence d'une fenêtre	23
3.5.	Les mesures en présence de surfaces absorbantes	24
4.	Prolongations possibles.....	24
5.	Conclusion.....	24
6.	Bilan personnel.....	25
7.	Références	26
	Annexes.....	30

A.	Informations complémentaires sur le montage	30
A.1.	Plan des pièces de raccordement imprimées en 3D	30
A.2.	Table des composants utilisés pour la réalisation du montage	31
B.	Extraits du code Python pour le montage	34
B.1.	Code pour paramètres	34
B.2.	Code pour enregistrement de résultats	35
B.3.	Code pour lecture du fichier de résultats	35
B.4.	Code pour détermination de couleurs en fonction de l'intensité	36
B.5.	Code pour construction de nuages de points	36

1. Introduction

1.1. Contexte

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), dans un rapport de 2018, estime qu'environ 1,3 millions de personnes dans le monde sont mortes en raison d'accidents routiers, et que 20 à 50 millions de personnes supplémentaires ont subi des blessures graves. Les coûts globaux pour la société sont extrêmement importants (WHO, 2022).

Pourtant, la majorité de ces accidents auraient pu être évités. Une étude effectuée en 2016 par la National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA), dont l'objectif est de diminuer les mortalités et les coûts liés aux accidents de la route, montre que l'erreur humaine peut être tenue pour responsable dans environ 95 % des cas (NHTSA, 2017).

Les voitures autonomes sont une solution intéressante pour rendre la conduite plus sûre. Capables de conduire sans intervention humaine, elles éliminent la majorité des problèmes humains comme les excès de vitesse, le risque d'être distrait, la conduite sous l'effet d'alcool ou de stupéfiants, ou d'autres problèmes pouvant diminuer la performance d'un conducteur comme consulter son téléphone portable. Différentes voies sont étudiées, sur la base de caméras seulement (Tesla). D'autres, comme Volvo, sur la base de capteurs et de LiDARs. Tous les fabricants de voitures sont actuellement à différents stades de développement de véhicules autonomes (Chain-Cahn-Clark, 2020).

1.2. But

L'avenir des voitures autonomes porte beaucoup d'espoir, mais de nombreux problèmes doivent encore être étudiés. Aucune voiture complètement autonome n'est actuellement disponible sur le marché. La somme de recherches et de développements encore nécessaires à la commercialisation d'un tel produit est considérable, notamment les limitations liées aux LiDARs. Des problèmes d'éthique et de responsabilités légales devront également être étudiés.

Le but de ce travail est d'investiguer les données proposées par les LiDARs face à des situations potentiellement problématiques. Dans quelle mesure les LiDARs ont-ils des limites dans l'application des voitures autonomes ?

1.3. Les voitures autonomes

1.3.1. Autonome ou automatisé ?

Les véhicules automatisés existent déjà partout. Le mot «autonome» implique une indépendance quant aux prises de décisions. L'automatisation, par opposition, est la maîtrise d'une tâche spécifique (Muscad, 2023). Les véhicules automatisés ne sont donc pas capables de s'adapter aux situations diverses, et sont seulement en mesure d'accomplir une fonction spécifique. Un exemple d'un véhicule de ce type est le «AirTrain JFK», un système de transport sans conducteur servant à faciliter le déplacement entre les terminaux de l'aéroport JFK à New York. Le train est capable de fonctionner entièrement seul, mais ne peut qu'accomplir une tâche : se déplacer entre les arrêts

prédéfinis (Wikipedia-JFK, 2023).

1.3.2. Qu'est-ce qu'une voiture autonome ?

Le terme de voiture autonome s'applique à un véhicule capable de circuler sur des routes publiques sans intervention humaine. Actuellement, aucune voiture de ce type n'est disponible sur le marché pour le grand public, en raison de la complexité de ces machines (Muscad, 2023), (Wikipedia-SelfDrivingCar, 2023), (Wikipedia-VoitureAutonome, 2023), (Strauss, 2019), (Strauss, 2019).

Waymo, précédemment connu comme «Google Self-Driving Car Project», est la première entreprise à avoir proposé, dès 2018, un service lié aux voitures autonomes. Depuis le début du développement des véhicules Waymo en 2009, l'entreprise a innové non seulement dans le domaine des capteurs, mais aussi dans le domaine des logiciels associés aux résultats fournis par ces derniers (Waymo-General, 2023), (Wikipedia-Waymo, 2023).

Les voitures autonomes ne sont plus une idée futuriste. Il est possible aujourd'hui d'en louer dans de plus en plus de villes (Moss, 2022).

1.3.3. Comment fonctionnent les voitures autonomes ?

Les voitures autonomes doivent être capables de visualiser leur milieu et les dangers environnants et de prendre en compte ces données dans le but d'éviter les obstacles. Cela est rendu possible grâce à l'intégration de plusieurs technologies telles que des senseurs et des logiciels à une voiture dite normale. Les capteurs, souvent un mélange de LiDARs, radars, et autres technologies semblables, servent à la visualisation en cartographiant en 3 dimensions la zone autour du véhicule. Le résultat, nommé un «nuage de points», est déchiffré par des logiciels, afin d'interpréter et de détecter les dangers présents. Couplé avec une capacité à prédire les actions futures des acteurs alentours, le véhicule planifie une trajectoire optimale.

Ces véhicules fonctionnent grâce à une interaction entre capteurs, systèmes de perception, de nuages de points, de traitement de données et de prise de décision. Les interfaces jouent un rôle très important.

1.3.4. Classification des voitures autonomes selon le degré d'autonomie

SAE International, précédemment «Society of Automotive Engineers» est une association professionnelle et un organisme d'élaboration de normes basée aux États-Unis. En 2014, SAE International a publié un système de classification standardisé de 0 à 6 niveaux selon la capacité d'autonomie d'un véhicule. Cette classification a été adoptée par la NHTSA en 2016 (Wikipedia-SAE, 2023), (Shuttleworth, 2019).

- **Niveau 0** Aucune autonomie

Le système est capable de produire des avertissements mais le conducteur détient le contrôle du véhicule.

- **Niveau 1** Assistance au conducteur

Le conducteur et la voiture partagent le contrôle du véhicule. L'intervention humaine est toujours obligatoire. Un exemple est le régulateur de vitesse, qui en prend le contrôle. La trajectoire est toujours sous la responsabilité du conducteur. Un autre exemple est le système antiblocage des roues (ABS) qui limite automatiquement la puissance du freinage de la voiture afin de conserver sa manœuvrabilité.

- **Niveau 2** Automatisation de fonctions combinées

Le système autonome agit sur au moins deux fonctions principales afin de remplacer le conducteur dans certaines situations. La voiture n'est pas jugée assez sécuritaire pour naviguer sans supervision humaine. Le conducteur reste donc responsable de son véhicule et doit être prêt à intervenir en cas de danger. Un exemple typique est le système d'autopilote Tesla, capable de naviguer sur des autoroutes.

- **Niveau 3** Conduite autonome limitée

Le conducteur peut céder le contrôle total du véhicule au système autonome dans certaines situations. La voiture gère les interventions telles que les freinages et les changements de voie, mais le conducteur doit être en mesure de reprendre rapidement le contrôle du véhicule lorsque la voiture ne se trouve plus dans une situation adaptée à la conduite autonome.

- **Niveau 4** Conduite autonome complète sous conditions

La voiture est capable de conduire de manière complètement autonome dans des zones spatiales limitées et dans des conditions spécifiques. Le véhicule doit être capable de s'arrêter sans intervention humaine. Le conducteur peut donc laisser le contrôle total à la voiture.

Les véhicules Waymo, anciennement Google Self-Driving Car Project, se trouvent à ce niveau. Elles sont capables de naviguer sans présence humaine dans la voiture, dans des zones limitées. Actuellement, elles sont uniquement capables de circuler dans des zones métropolitaines spécifiques, tard le soir, à une vitesse maximale de 35 miles par heure.

- **Niveau 5** Conduite complètement autonome

Le système de conduite autonome est capable de naviguer dans toutes les circonstances sans intervention humaine.

1.3.5. Dangers des systèmes semi-autonomes

- **Attention du conducteur**

Dans une étude datant de 2015, il a été montré que la vigilance des personnes conduisant des véhicules autonomes diminuait déjà au bout de 21 minutes (Tucker, Aubert, Sampaio de Almeida, Clamann, & Cummings, 2015). Après ce temps, le conducteur risque de ne plus être attentif à la route et peut causer des accidents en

faisant trop confiance à un système de conduite autonome de niveau 3 ou inférieur. Le conducteur doit être capable d'intervenir immédiatement en présence d'obstacles. Le niveau de danger augmente avec l'utilisation des technologies de conduite semi-autonome, alors qu'elles sont conçues pour améliorer la sécurité (White, 2022).

- **Sécurité aux différents niveaux**

L'avantage principal des voitures autonomes est leur sécurité. En théorie, elles conduisent mieux que les humains. En regardant les niveaux d'autonomie SAE, on observe une augmentation de sécurité au niveau 1, mais les niveaux 2 et 3 représentent une hausse importante des risques de conduite.

- **Problèmes au niveau de la législation**

L'homme et la machine sont trop différents dans la perception et l'analyse des situations de circulation. La machine ne pourra jamais simuler un conducteur humain. Elle ne peut pas, par exemple, prendre en compte les normes éthiques auxquelles le conducteur peut être confronté. Les conduites manuelle, automatisée et autonome nécessitent chacune leurs propres lois, qui restent encore à définir pour les voitures autonomes. Il faudra pouvoir préciser les responsabilités de toutes les personnes impliquées, depuis les concepteurs et la délégation des choix faits aux inventeurs, jusqu'à la dernière personne engagée dans sa maintenance.

- **Problèmes éthiques**

Les inventeurs et les concepteurs de la machine jouent pour l'instant un rôle pas clair qui doit être encore clarifié. La machine ne peut rien décider, elle ne peut qu'appliquer les opérations pour lesquelles elle a été programmée. Par exemple, qui va décider si la voiture doit plutôt tuer des piétons pour éviter de tuer les occupants de la voiture ? Est-ce que les algorithmes prendront en compte l'âge ou l'état de santé des victimes ? Ce point doit vraiment être discuté ouvertement puisque les décisions seront prises par la machine.

1.3.6. Avantages des véhicules autonomes

- **Sécurité, réduction du nombre des accidents et des différents coûts**

Les humains ont tendance à avoir un biais, ils se croient plus performants qu'ils ne le sont en réalité (McCormick, Walkey, & Green, 1986). Les résultats d'une étude de 1986 a montré que environ 80 % des conducteurs se jugeaient meilleurs que le conducteur moyen. Les technologies de conduite autonomes pourraient améliorer la situation. Ces voitures pourraient réduire non seulement les décès et les blessures liés aux accidents routiers, mais également les \$474 milliards dépensés annuellement en raison de ces accidents (Martin, 2023).

- **Autonomie des personnes à besoins spécifiques**

Les Etats-Unis sont connus pour être un pays qui a une grande dépendance aux voitures. Les transports publics, surtout en dehors des grandes villes, sont très peu développés,

un véhicule personnel est indispensable.

Actuellement, 12 millions d'adultes aux Etats-Unis âgés de plus de 40 ans sont malvoyants, et donc incapables de conduire. Ce problème est donc particulièrement important. De plus, environ 79 % des adultes à la retraite dans ce pays habitent dans des communautés locales et dépendent de voitures pour leurs déplacements de tous les jours (Waymo-Safety, 2023), (American Optometric Association, 2023).

Les voitures autonomes peuvent contribuer à la liberté de déplacement des adultes âgés ainsi que de ceux qui ne disposent pas des capacités nécessaires pour conduire elles-mêmes un véhicule.

- **Réduction du temps perdu pendant les déplacements**

En 2019, environ 10 % des Américains effectuaient un déplacement de plus d'une heure pour aller au travail (Rivelli, 2022). Cela implique une perte de temps d'environ deux heures par jour. Ce temps pourrait être utilisé pour d'autres activités plus productives et améliorer la qualité de vie des adultes au travail.

- **Augmentation de l'efficacité routière**

Les voitures autonomes, si elles sont utilisées par un grand nombre de conducteurs, sont capables d'augmenter l'efficacité routière. Cette technologie pourrait réduire les embouteillages d'environ 35 % (University of Cambridge, 2019). Aux Etats-Unis, cette réduction pourrait devenir très importante sachant qu'en 2017, environ 305 MUSD ont été perdus en heures de travail, en essence consommée et en autres coûts indirects lors des attentes dans les embouteillages.

Quand la première voiture dans une longue queue commence à se déplacer, il y a un petit délai entre son départ et celui du véhicule suivant. Cet effet peut s'accumuler et finir par créer un retard énorme (Grey, 2016). Les systèmes de conduite autonome pourraient résoudre ce problème. Grâce à d'éventuelles communications entre véhicules, un démarrage simultané pourrait devenir possible, ce qui diminuerait ce délai.

Cela permet d'imaginer un futur basé sur des routes parfaitement coordonnées, sans nécessité de feux rouges, ni de voies, ni de priorités, ni d'aucune autre consigne routière. Dans ce futur, toutes les voitures feraient partie d'un réseau plus large. En communiquant entre elles, elles seraient capables de déterminer la manière la plus efficace de circuler. Cette vision peut être considérée comme dystopique. Les humains ne seraient donc plus capables de circuler sans utiliser des voitures autonomes. Et surtout, ils ne seraient plus que de simples passagers qui s'installeraient simplement dans une voiture, ne prendraient plus de décisions personnelles, et se laisseraient conduire vers la destination pour laquelle la voiture serait programmée. Ce principe remettrait en question la conception de la liberté personnelle, qui varie grandement selon les cultures.

1.4. Les LiDARs

Le LiDAR, acronyme de «Light Detection and Ranging», est une méthode de détermination de la distance entre le capteur et l'objet visé (Wikipedia-Lidar, 2023),

(Synopsis, 2023), (Bridges, 2015), (LidarRadar, 2023), (VectorNav, 2023). Le principe est de viser un objet avec un faisceau lumineux et de mesurer le temps nécessaire à l'onde réfléchie pour revenir au capteur.

Les premières utilisations de LiDARs datent du début des années 1960, principalement dans le domaine de la météorologie. Actuellement, la technologie est principalement utilisée pour faire des reconstructions digitales d'un espace en 3 dimensions. Cette aptitude à nuager des points en haute résolution explique les applications diverses et nombreuses des LiDARs.

1.4.1. Principe de fonctionnement

Lorsque les ondes électromagnétiques rencontrent des surfaces, elles sont réfléchies et absorbées. Les photodétecteurs présents dans le capteur LiDAR détectent la lumière réfléchie. En connaissant avec précision l'instant auquel le faisceau a été envoyé et l'instant auquel les ondes réfléchies sont détectées, il est possible de calculer la distance entre le capteur et la surface selon l'équation 1.

$$distance = \frac{vitesse\ de\ la\ lumière \cdot temps\ de\ vol\ du\ faisceau}{2} \quad (Equation\ 1)$$

La vitesse de la lumière est connue avec précision.

Les faisceaux lumineux envoyés par les LiDARs ont une longueur d'onde juste au-dessus du spectre visible. Ces ondes infrarouges peuvent varier en fonction de leur application. La lumière envoyée par le capteur est monochromatique afin d'obtenir les résultats les plus précis possibles.

Les mesures prises par les LiDARs se présentent sous forme de nuages de points, collections de données dans un espace à 3 dimensions. Chaque point, correspondant à une mesure, représente un emplacement particulier dans l'environnement. Ces points sont déterminés grâce à des mesures de la distance entre le capteur et la surface, associés à une connaissance précise de l'orientation du capteur au moment de la détection. L'ensemble des points, détectés selon des orientations différentes, produit des nuages de points.

1.4.2. Les technologies semblables

Le radar est la technologie la plus proche du LiDAR en termes de fonctionnement. Ils utilisent le même principe de mesure du temps de déplacement d'une onde lumineuse afin de déterminer la distance entre deux objets. Les radars emploient des ondes radioélectriques, de longueurs d'ondes supérieures à 30 cm. Les LiDARs utilisent des longueurs d'ondes proches du spectre visible, de l'ordre des nanomètres. Les radars sont moins affectés par les conditions météorologiques. Ils sont cependant moins précis que les LiDARs (LidarRadar, 2023), (Hassab, 2023). Le sonar est basé sur le même principe de fonctionnement que les radars et LiDARs. Il utilise des ondes sonores à la place des ondes lumineuses (Bridges, 2015).

1.4.3. Application des LiDARs dans les voitures autonomes

Les voitures autonomes utilisent les LiDARs afin de visualiser l'espace environnant. Le nuage de points résultant d'une lecture de LiDAR est utilisé par le système de nuage des points afin de dégager les informations pertinentes telles que les voitures environnantes, les cyclistes, les piétons, et tous les autres dangers (Waymo-HowItWorks, 2023), (Royo & Ballesta-Garcia, 2019).

La manière principale de prendre les mesures nécessaires pour le fonctionnement des voitures autonomes consiste à fixer plusieurs LiDARs, à des hauteurs différentes et à les faire pivoter à haute vitesse. En prenant plusieurs mesures chaque seconde, et en sachant avec précision la position angulaire du LiDAR, il est possible de construire un «cercle» de mesures. L'empilement de plusieurs LiDARs fait en sorte que le nuage de points soit en 3 dimensions (Figure 1).

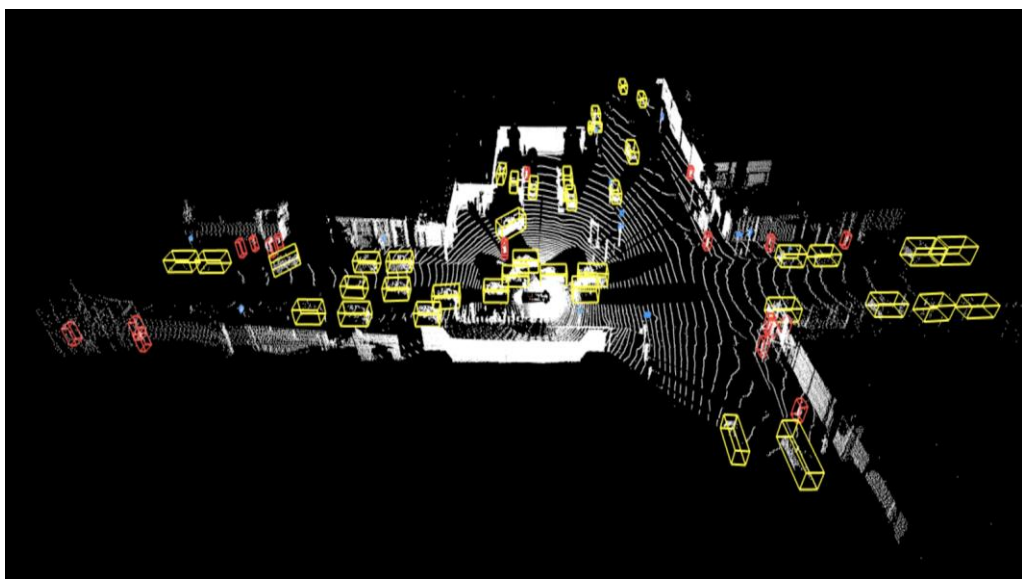


Figure 1 : Cette image montre la lecture des LiDARs d'une voiture Waymo. La caractéristique la plus évidente est la présence de ces «cercles» de mesures (Waymo-DataSet, 2019).

1.4.4. Avantages des LiDARs dans l'application des voitures autonomes

- **Précision**

L'avantage principal des LiDARs pour les voitures autonomes est leur précision. La longueur d'onde, courte, permet aux capteurs de détecter des objets, ce que d'autres technologies ne peuvent faire. Même à des centaines de mètres, les incertitudes sur les lectures n'excèdent pas quelques centimètres (Velodyne Lidar, 2023).

- **Rapidité de prise de mesure**

Pour être utilisés dans les voitures autonomes, les LiDARs doivent être capables de prendre non seulement des mesures précises, mais aussi de maintenir une lecture de l'espace alentour en temps réel. Les LiDARs sont capables d'effectuer plus d'une

centaine de mesures par seconde. La voiture Waymo, avec son empilement de 128 capteurs, est capable d'en prendre des milliers chaque seconde (Waymo-Driver, 2023), (Wang, Ferrie, & Macfarlane, 2012).

- **Distance utile**

Les LiDARs fonctionnent de manière optimale jusqu'à environ 200 m (Génération Robots, 2023). Cette distance est largement suffisante pour la majorité des situations dans lesquelles se trouveront les véhicules autonomes. Même sur l'autoroute, 200 m suffisent pour donner environ 6 secondes pour réagir à un obstacle, si la voiture roule à 120 km/h par exemple. La distance utile d'un LiDAR est donc largement suffisante pour les situations dans lesquelles peuvent se trouver des voitures autonomes.

1.4.5. Limitations des LiDARs dans l'application des voitures autonomes

Bien que les LiDARs possèdent beaucoup d'avantages, la technologie est limitée dans cette application (Royo & Ballesta-Garcia, 2019). Ces désavantages sont une cause principale du retard de la commercialisation de la technologie. Les solutions aux limitations sont souvent complexes, et nécessitent d'autres développements indispensables avant que des véhicules autonomes puissent être mis sur le marché.

- **Prix des LiDARs**

Les prix élevés des LiDARs ne sont pas dus seulement à la production. Ils doivent également assurer leur fonctionnement, c'est-à-dire le développement des systèmes qui contribuent à la technologie, comme des logiciels capables d'interpréter les résultats obtenus par les LiDARs. C'est un frein pour le développement de la technologie. En 2009, un système de LiDAR pour voiture coûtait \$75000 à Waymo. L'entreprise a été capable de diminuer le prix à \$7500 (Ayre, 2017). La technologie s'est donc beaucoup développée, mais malgré ces améliorations, le prix initial reste important pour un utilisateur moyen. Une augmentation de cet ordre pour acquérir ce type d'automobile, en plus des frais d'entretien et des autres coûts ajoutés, représente un accroissement de 15 % du prix final de la voiture. Ce montant freine l'adoption généralisée de cette technologie par le grand public. Une récente étude a estimé le prix total à \$250'000 par voiture (Valiante Mott, 2023). Certes, une voiture destinée à une vente commerciale bénéficierait d'un prix de production plus bas grâce au volume de production plus élevé, mais la valeur ajoutée reste à discuter.

- **Mauvaises conditions météorologiques**

Lorsqu'un faisceau de lumière rencontre une goutte d'eau, une partie de la lumière est réfléchie, et le reste est réfracté, dévié de sa trajectoire originale. La lumière ne va donc pas être totalement récupérée par le LiDAR. Des mauvaises conditions météorologiques comme le brouillard ou la neige perturbent les mesures. Dès qu'un système de repérage LiDAR d'une voiture autonome se situe dans ces mauvaises conditions, les résultats diminuent en qualité, et le nombre de points valables dans le nuage de points se réduit. La voiture se trouve donc en situation de visibilité extrêmement réduite. La sécurité des véhicules descend drastiquement, et la voiture n'est plus capable de conduire en sécurité

(Yellowscan, 2021).

En Suisse, sur le Plateau, il peut pleuvoir en moyenne 110 à 150 jours par an (Vogelwarte, 2023). Un des avantages principaux des véhicules personnels est la liberté qu'elles offrent de pouvoir se déplacer où on veut et quand on veut. Cette liberté se trouve largement réduite dans le cas des véhicules autonomes si les conditions sont mauvaises.

- **Surfaces réfléchissantes**

Le principe du LiDAR repose sur la capacité de réflexion d'une onde lumineuse pour être ensuite détectée par un capteur. Mais, en présence de surfaces particulièrement réfléchissantes telles qu'un miroir, le capteur peut rencontrer des difficultés. Lorsqu'une onde lumineuse rencontre une surface de ce genre, au lieu d'être dispersé partout (réflexion diffuse), la lumière est réfléchiée en un point précis, par rapport à l'angle d'incidence de la lumière (réflexion spéculaire) (Figure 2). Au lieu de mesurer la distance entre le capteur et l'objet en question, le LiDAR mesure une distance supplémentaire, celle entre l'objet et la prochaine surface rencontrée par le faisceau lumineux. Cela produit non seulement des mesures fausses, mais aussi des mesures trompeuses. En réalité, des surfaces qui ressemblent à des miroirs existent sur des routes, et représentent donc un risque lors de l'utilisation des LiDARs.

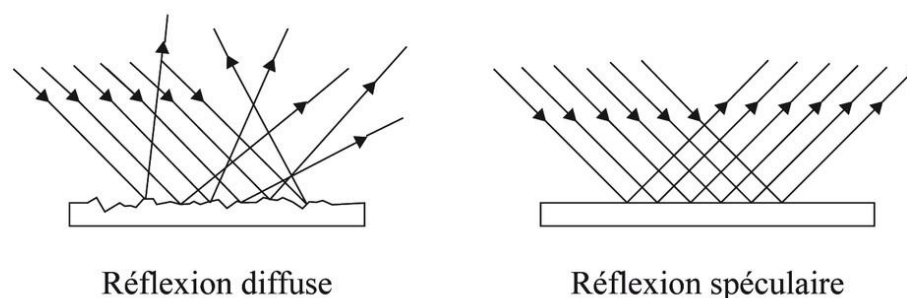


Figure 2 : Les deux types de lumière réfléchiée détectés par un LiDAR : la **réflexion diffuse** produit une image moins précise et floue car, même si la surface est visible, ses aspérités et sa rugosité font que la lumière réfléchiée part dans de nombreuses directions et la **réflexion spéculaire** (ou réflexion régulière) produit une image claire et nette avec une surface lisse comme dans un miroir (Le monde en images, 2023).

2. Le LiDAR - Développement personnel

2.1. Montage effectué

Le principe de ce travail est de mettre en évidence les limitations des LiDARs dans les voitures autonomes. Une version simplifiée de LiDAR a été imaginée pour simuler un système de nuage de points dans une pièce fermée. Ce montage doit être capable de prendre des mesures, et de les compiler sous forme de nuage de points.

Pour des raisons économiques et techniques, il est impossible de recréer un système correspondant exactement aux mêmes principes que ceux des voitures autonomes. Il faut donc faire des ajustements pour simplifier la mise en œuvre, tout en conservant la capacité du système.

Les systèmes de repérage professionnels utilisent plusieurs capteurs. Chacun est responsable d'une mesure à hauteur fixe, pour produire leur nuage de points en 3 dimensions. Ils doivent utiliser un moteur pour faire pivoter les capteurs. L'achat de plusieurs capteurs est onéreux. Il faut donc trouver une manière de substituer le fonctionnement de plusieurs capteurs et de réussir à n'en utilisant qu'un seul. Pour parvenir à effectuer ces mesures, il est nécessaire d'ajouter un deuxième moteur pour pouvoir réorienter le LiDAR sur l'axe Y en plus de l'axe X. Le pivotement sur deux axes conserve la capacité de construire des nuages de points en 3 dimensions, mais il ne tient plus compte de la vitesse de prise de mesure. Le montage balaye une hauteur fixe en prenant des mesures de distance avec une rotation régulière. Ensuite, le LiDAR pivote sur l'axe vertical. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les hauteurs aient été mesurées.

Les résultats obtenus par les prises de mesure sont sous forme de listes à 4 éléments: les coordonnées x, y, et z, et l'intensité de la lumière récupérée par le LiDAR suite à la réflexion du faisceau sur la surface de détection. Les coordonnées sont obtenus par la conversion de coordonnées sphériques (donc 2 angles et un rayon) en coordonnées cartésiennes (les coordonnées x, y et z). L'intensité est observée lors de la prise de mesures. Elles sont ensuite reportées sur un graphique sous forme de nuage de points. L'intensité est représentée par la couleur des points (Figure 3).



Figure 3 : La cartographie des couleurs est le processus de mise en correspondance des valeurs des données avec les couleurs d'un graphique, dans ce cas un nuage de points. Une bonne cartographie des couleurs augmente la dimensionnalité du graphique et peut révéler ou mettre en évidence des motifs dans les données.

2.1.1. Matériels utilisés – composants

Une liste complète avec des images, des liens pour l'approvisionnement et les prix des pièces essentielles figure dans l'Annexe A.

- **Capteur LiDAR**

Ce composant est la partie fondamentale du montage. Il effectue les mesures de distance utilisées pour construire les nuages de points. Le capteur utilisé pour le montage est le

«Benewake Tfmini-S». Ce composant utilise des faisceaux de longueurs d'onde infrarouges. C'est un LiDAR, qui peut être utilisé pour simuler l'application des voitures autonomes. Sa distance utile de 0.3 à 12 mètres est largement suffisante pour l'application du montage.

- **Deux moteurs**

Les deux moteurs servent au pivotement du LiDAR, ce qui permet la détermination d'un nuage de points d'un espace en 3 dimensions. Chaque moteur agit sur un axe indépendant. Les deux moteurs utilisés sont la «Pan Tilt Platform for Raspberry Pi» de Arducam. Ce composant combine la fonctionnalité des deux moteurs en un composant. Il est fait de deux moteurs pas-à-pas. Il est compatible avec le microcontrôleur utilisé, et possède une précision suffisante pour l'application du montage.

- **Microcontrôleur**

Le microcontrôleur gère les différents composants. Ce composant met en œuvre le code. Il est responsable du déplacement des moteurs et des prises de mesures. Le microcontrôleur utilisé n'est techniquement pas un microcontrôleur. Le Raspberry Pi est capable d'exécuter du code, c'est donc un microprocesseur. Cette fonctionnalité permet l'indépendance du montage. Il prend des mesures sans ordinateur, dont il remplace quelques fonctions. Le montage est possible sans microprocesseur, mais nécessite la présence constante d'un ordinateur.

- **Ordinateur**

L'ordinateur distribue les commandes à travers le code écrit pour gérer les autres composants. L'ordinateur est aussi responsable de la construction du nuage de points avec les résultats fournis.

- **Câble Ethernet**

Le câble Ethernet permet la communication entre l'ordinateur et le microcontrôleur et transmet les commandes. Ce câble permet le retour des résultats à l'ordinateur.

- **Fil USB - Transistor Transistor Logic (TTL)**

TTL est un type de connecteur, comme l'USB, couramment utilisé par les microcontrôleurs, avec *une prise mâle et une prise femelle*. Les fils sortant du LiDAR sont mâles, et les récepteurs du microcontrôleur sont du même type. Il est nécessaire d'acheter un fil USB - TTL pour pouvoir connecter le LiDAR au microcontrôleur.

- **Chargeur USB**

Le chargeur USB est utilisé pour l'alimentation du microcontrôleur, des moteurs et du capteur LiDAR.

- **Pièces de raccordement, imprimées avec une imprimante 3D**

Quelques pièces de raccordement ont été imprimées en 3D spécialement pour ce montage afin de lier les composants entre-elles.

2.1.2. Montage final

Il faut rattacher le LiDAR aux deux moteurs avec des pièces de raccordement spécialement adaptées. Le LiDAR peut être déplacé pour détecter plusieurs surfaces différentes. Ensuite, les moteurs et LiDAR doivent être fixés pour éviter les mouvements non voulus. Les moteurs et LiDAR sont également connectés au microcontrôleur via les fils USB-TTL. Le microcontrôleur est finalement branché à l'ordinateur grâce au câble Ethernet (Figure 4).

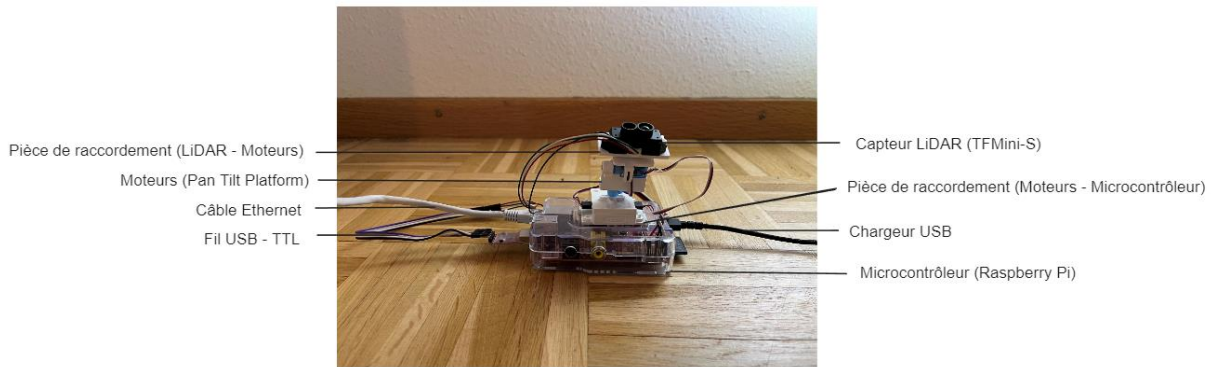


Figure 4 : Montage final de LiDAR élaboré à la maison.

2.1.3. Le code en Python et Shell

Le code en Python et Shell qui dirige le montage est composé de deux parties: le code sur l'ordinateur et le code sur le Raspberry Pi (Figure 5). Des extraits du code sont en annexe.

L'ordinateur est responsable du démarrage des prises de mesures, de la construction des nuages de points, et des paramètres tels que l'angle de départ et la grandeur des sauts entre les mesures.

Le Raspberry Pi est responsable des mouvements des moteurs et des détections du capteur LiDAR.

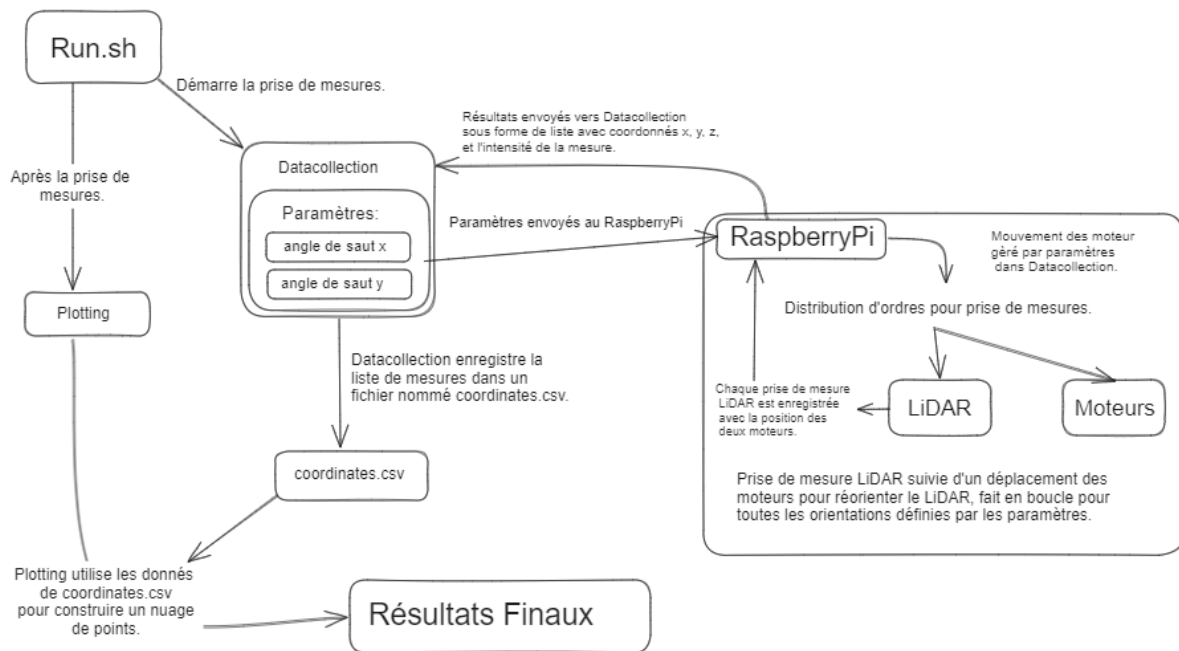


Figure 5 : Schéma du fonctionnement du code en Python et Shell.

- **datacollection** (sur l'ordinateur). Il est responsable des paramètres de mesures et donne les ordres au Raspberry Pi pour déclencher les prises de mesures. «Datacollection» enregistre les résultats prises par le Raspberry Pi dans un fichier nommé «coordinates.csv».
- **plotting** (sur l'ordinateur). Ce dossier construit un nuage de points avec les données enregistrées dans le fichier «coordinates.csv»
- **raspberrypi** (sur le Raspberry Pi). Ce dossier est responsable de la mise en œuvre des ordres donnés par «Datacollection». Il contrôle directement les mouvements des moteurs et les moments auxquels le LiDAR prend des mesures. Chaque prise de mesure LiDAR est accompagnée par 2 positions angulaires des moteurs. Ces données (un rayon et 2 angles) sont converties en coordonnées cartésiennes et sont renvoyés à «Datacollection».

2.1.4. Mesures et limitations

Les limitations principales des LiDARs sont liées aux surfaces de détection. La mise évidence des failles des LiDARs dans les voitures autonomes a consisté à placer le montage dans des situations difficiles, afin de voir les effets sur la précision des résultats.

La prise de mesure se déroule de manière suivante :

1. Mesure de contrôle
2. Mesure avec illuminations variées
3. Mesure avec une surface réfléchissante, comme miroir

4. Mesure sans surface, comme une fenêtre en verre
5. Mesure avec une surface noire, ou une autre surface absorbante
6. Mesure avec simulation de pluie (N'a pas pu être réalisée en raison des risques de détérioration du montage et de la limitation de production de simulation de mauvaises conditions météorologiques)

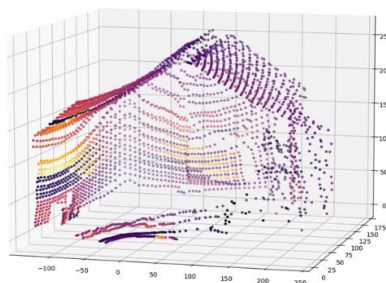
2.1.5. Mesure de contrôle

Cette prise de mesure sert à comprendre la précision générale de cette création, sans l'influence de situations problématiques (Figure 6a). Elles ont été effectuées par le LiDAR la nuit, dans la chambre telle quelle, avec la même lampe allumée pendant les différents essais.

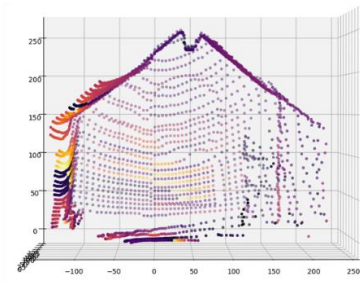
La lumière ambiante, trop variable, n'a pas été retenue.



(a)



(b)



(c)

Figure 6 : (a) Photo de la chambre utilisée pour la majorité des mesures, (b) nuage des points de la chambre avec lampe, sans soleil et (c) vue frontale de la chambre.

- **Résultats globaux.** Les prises de mesures sont relativement correctes (Figure 6b et c). Différents éléments sont facilement repérables. Les murs, soit les sections plates du nuage de points, un cercle dans un mur montrant la fenêtre ronde, le plafond composé de 2 surfaces avec une poutre. Le nuage de points obtenu est donc une représentation utilisable de la chambre. Le système de LiDAR fonctionne donc de la manière attendue.
- **La conformité de notre système** avec un système de repérage professionnel est évidente si on considère l'arrangement des points. Des cercles sont visibles dans le nuage de points. Le deuxième moteur, utilisé pour déplacer le capteur sur un autre axe, fonctionne de la bonne manière. Chaque cercle représente une hauteur de mesures différente. Ces mêmes cercles peuvent être observés sur les relevés des systèmes utilisés dans les voitures autonomes (Figure 7) (Velodyne Lidar, 2023).

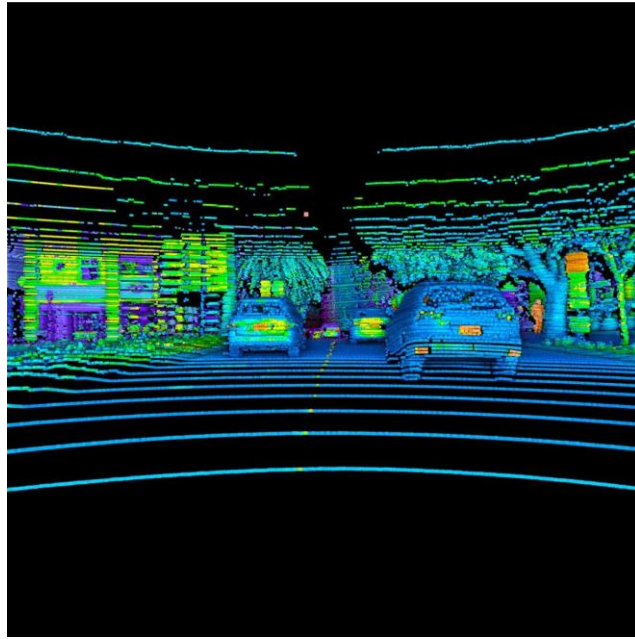
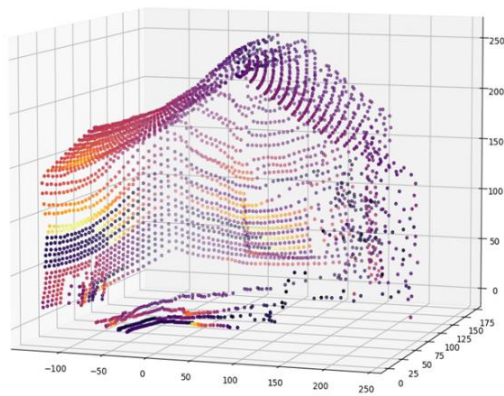


Figure 7 : Nuage de points obtenu par un LiDAR de voiture autonome (Lienert & Klayman, 2019).

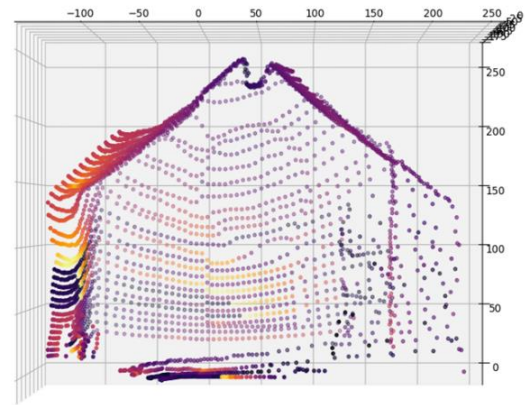
- **Les couleurs des points** correspondent à l'intensité du faisceau lumineux réfléchi. Il permet de visualiser instantanément la qualité des mesures. En théorie, plus la surface détectée est réfléchissante, plus le résultat obtenu est de qualité. Pour démontrer ce phénomène, une feuille rouge a été placée contre le mur blanc, à gauche sur le cliché. On observe dans cette zone une décroissance d'intensité, proportionnelle à la distance par rapport au capteur. L'intensité n'est donc pas une manière fiable d'interpréter des couleurs.
- **Le pouvoir réfléchissant d'une surface, l'albédo**, joue également un rôle. Dans le cas des livres placés au niveau du sol, sur la paroi gauche, on observe des lignes verticales de couleurs différentes. L'intensité des mesures varie donc selon le livre en question. Sur des surfaces de couleur constante, tel que le plafond, l'intensité diminue avec la distance. Elle fluctue selon des critères présents dans les livres, qui ne sont pas présents dans la feuille. La variation des intensités est probablement due aux textures et aux albédos variés (Wikipedia-Albédo, 2023). L'angle d'incidence de la lumière devrait également avoir un effet sur l'intensité, mais ceci n'est pas observable dans nos conditions.

2.1.6. Influence des différents types de lumières

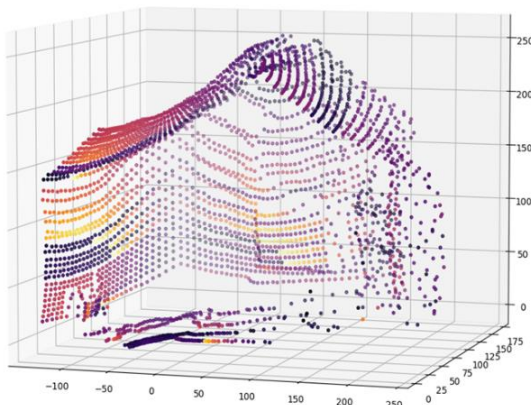
Des mesures de type contrôle ont été effectuées, l'une sans lumière (Figures 8a et b), que ce soit solaire ou d'une lampe, et l'autre en présence de lumière solaire (Figures 8c et d). Les trois prises de mesures se ressemblent globalement, avec quelques détails différents. Le fait d'obtenir des résultats plus ou moins similaires démontre la capacité des voitures autonomes à rouler dans des conditions variées telles que le jour, la nuit, et la nuit sur des routes illuminées artificiellement.



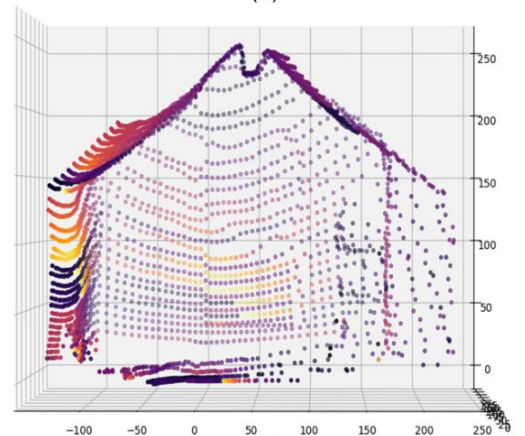
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 8 : (a) Nuage de points de la chambre sans lumière, (b) vue frontale sans lumière, (c) nuage des points de la chambre uniquement avec lumière du soleil et (d) vue frontale uniquement avec lumière du soleil.

Les Figure 8a et b ne possèdent pas une bande de mesures d'intensité basse sur la partie gauche du plafond, comme vu dans les Figures 8c et d et Figures 7a et b.

En théorie, seule la lumière solaire, qui émet de la lumière infrarouge de longueur d'onde semblable à celle des faisceaux envoyés par le LiDARs, est capable d'influencer les résultats. La bande de mauvais résultats, qui se trouve également dans la prise de mesure avec la lumière de la lampe, est donc sans explication immédiate.

2.1.7. Effet de l'ajout d'un miroir dans le champ de détection

Une surface réfléchissante telle qu'un miroir (en-bas à-gauche de la fenêtre, Figure 9a) produit une réflexion spéculaire. L'angle de réflexion de la lumière est égal à son angle d'incidence. Pour le LiDAR, il est donc impossible de détecter le miroir lui-même, et à la place on détecte l'image projetée par le miroir. Les mesures sont donc erronées, elles ne représentent pas la réalité.

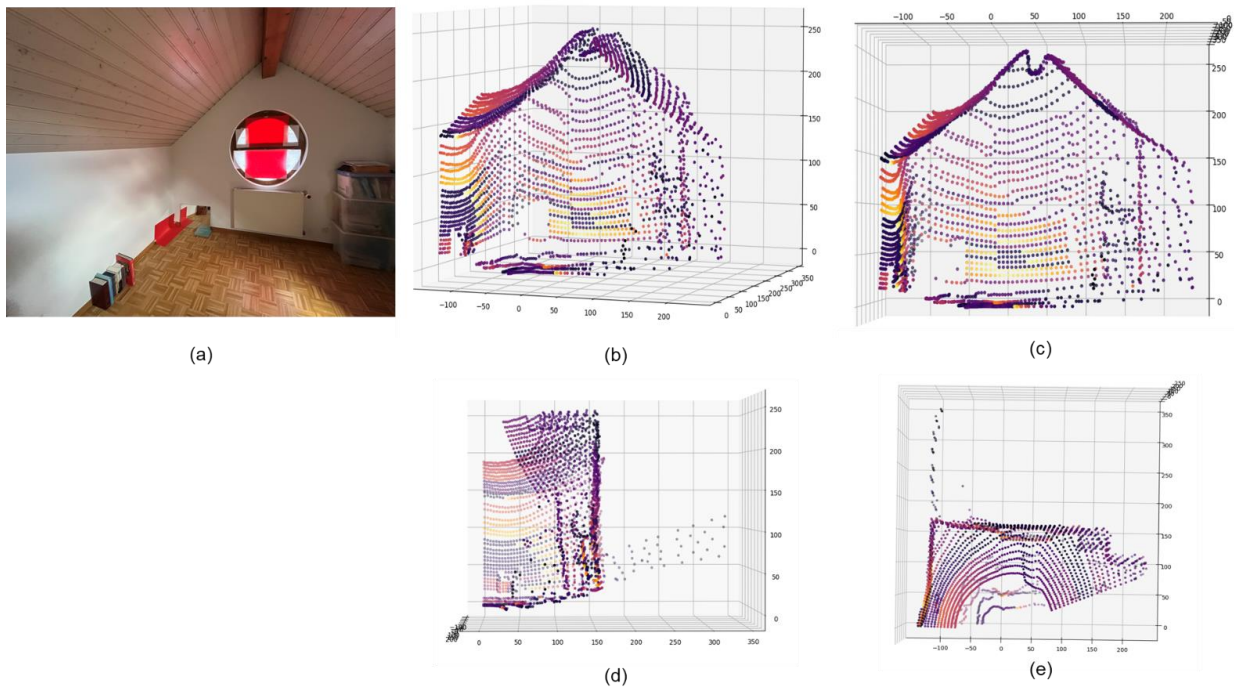


Figure 9 : *Mesures avec un miroir réfléchissant, (a) la chambre avec miroir dans le coin arrière gauche, (b) nuage de points avec miroir, (c) vue frontale avec miroir, (d) vue latérale depuis la droite et (e) vue de dessus avec miroir.*

Les miroirs réfléchissent la lumière de manière spéculaire. Les LiDARs fonctionnent avec la détection d'une réflexion diffuse. À l'endroit où se situe le miroir, on observe un trou dans le nuage de points (Figure 9b et c). Le LiDAR n'a donc pas détecté la surface du miroir, mais la projection de ce dernier (Figure 9d et e).

On observe des points qui partent derrière la chambre. Il s'agit en réalité d'une représentation du mur, réfléchi par le miroir. Nous savons que c'est en effet le mur grâce à la Figure 9e. La vue du haut nous permet d'observer l'alignement de ces points dans l'axe du mur. Le capteur voit donc le mur à travers le miroir. Les points reconnus pour la détection du miroir sont de couleur foncée, ce qui indique une perte d'intensité lumineuse lors de la réflexion sur le miroir. Le miroir engendre donc des résultats imprécis.

2.1.8. Effet d'une fenêtre

En enlevant les feuilles qui recouvrent la fenêtre (Figure 10a), on voit les effets d'un manque de surface de détection sur les résultats produits par le nuage des points. On observe également les influences des fenêtres sur les détections.

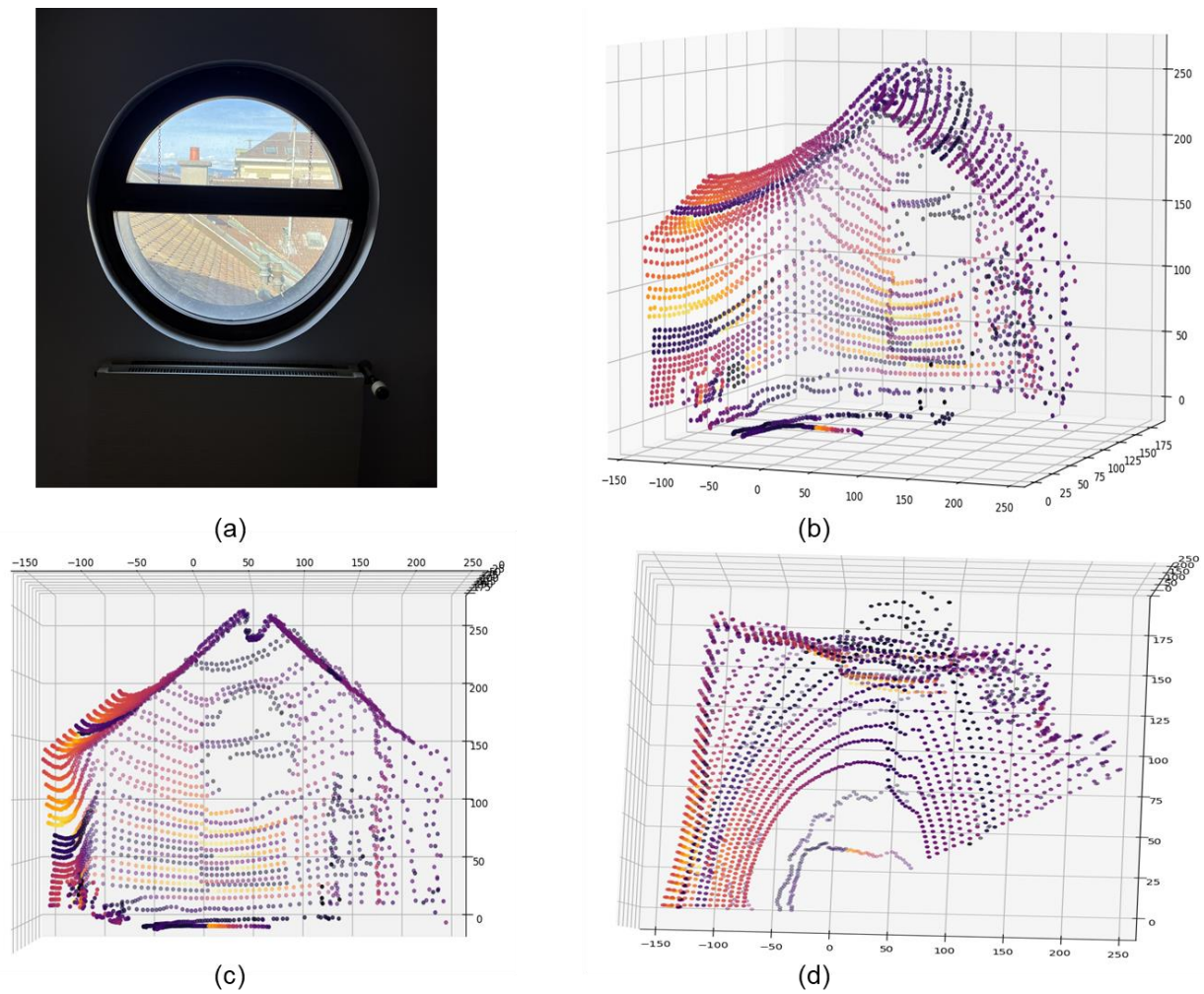


Figure 10 : *Prise de mesure avec fenêtre non couverte, (a) fenêtre réelle, (b) nuage des points avec fenêtre non couverte, (c) vue frontale avec fenêtre non couverte et (d) vue du dessus avec fenêtre non couverte.*

Sans surface pour réfléchir la lumière, le capteur est incapable de prendre des mesures. Cet effet se manifeste par le trou circulaire au centre du mur au fond de la chambre, là où se situe la fenêtre (Figures 10b et c). Les fenêtres sont donc invisibles pour les LiDARs. Le manque de surface rend la prise de mesure impossible.

Les points situés derrière la fenêtre, évidents dans la Figure 10d, représentent des surfaces qui n'existent pas en réalité. Ces points sont également d'une couleur sombre, indiquant une intensité basse. Il est impossible de savoir comment le capteur a obtenu ces mesures de distance fausses. Une réflexion du même type que celle des miroirs est une possibilité. Une autre hypothèse est que le faisceau lumineux envoyé par le LiDAR se fait réfracter par la fenêtre, et détecte une autre surface.

2.1.9. Effet de surfaces absorbantes

La couleur noire absorbe une grande partie de la lumière envoyée par le LiDAR. Pour cette raison, les surfaces noires diminuent la précision et sont souvent inutilisables. Pour le démontrer, quelques objets noirs ont été placés dans l'espace de détection (Figure 11a).

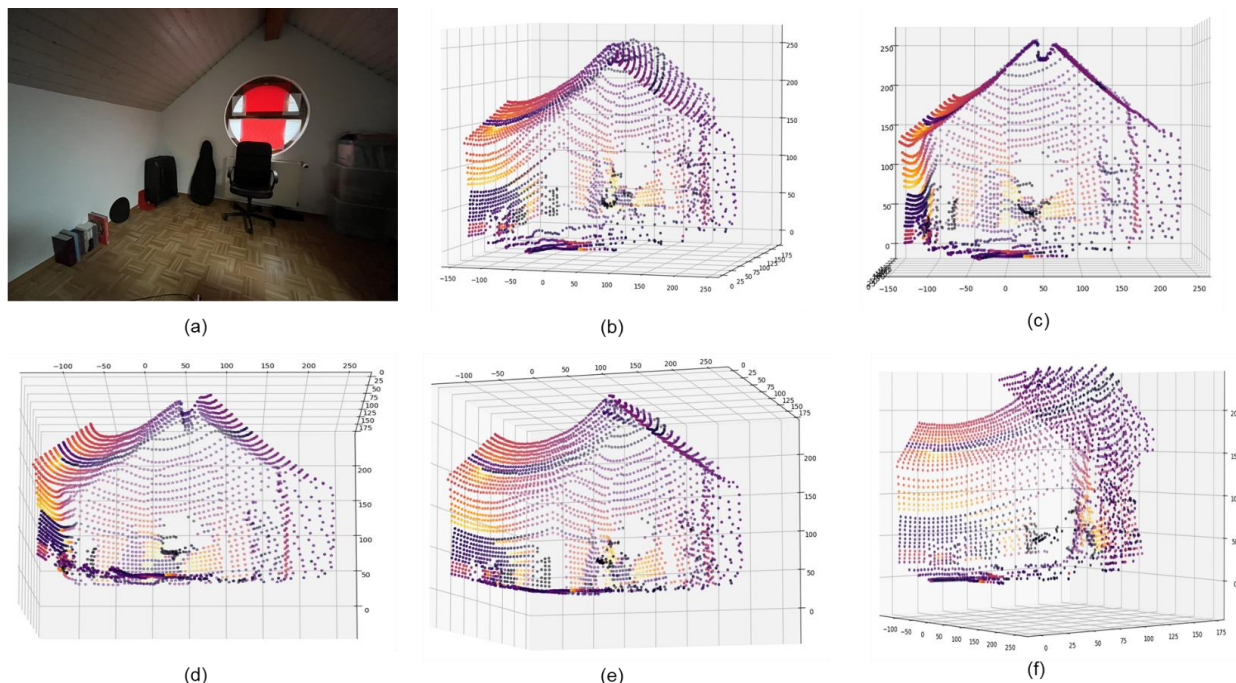


Figure 11 : Mesures prises avec des surfaces absorbantes : (a) chambre avec des objets sombres tels qu'un cercle en caoutchouc, une valise, un étui de violoncelle, une chaise de bureau dans le coin arrière gauche, (b) nuage de points, (c) vue de face, (d) vue de face depuis le bas, (e) vue originale depuis le bas et (f) vue de côté depuis la droite.

Chaque objet noir a provoqué une lecture à intensité basse (Figures 11b et c). Le cercle en caoutchouc à côté des livres, la valise dans le coin à la droite des livres, et la chaise placée au milieu de la chambre sont tous représentés par des points extrêmement foncés.

D'après le fabricant du LiDAR utilisé pour le montage, aucune mesure d'une intensité de moins de 200 ne doit être prise en compte en raison du manque de fiabilité. Les mesures de ce type ne sont pas présentes dans le nuage de points. Seul un côté de la valise est présent dans le nuage de points (Figure 11b et e). L'autre côté fait partie des points enlevés. Le côté manquant a provoqué des mesures d'intensité plus basse, probablement pour des raisons d'angles d'incidence.

La chaise de bureau, visible dans la Figure 11a et d de face, a une apparence normale, sauf le dos de la chaise absent pour la même raison que le côté manquant de la valise. Mais de côté, les points ne représentent pas du tout la surface de la chaise de bureau

(Figure 11f).

On peut conclure que les mesures sont inadéquates, en raison de leurs basses intensités. Le producteur du LiDAR utilisé a donc surestimé les capacités du capteur. Les mesures à intensité basse, même celles supérieures à 200, ne sont pas fiables.

3. Liens avec les voitures autonomes – analyse et solutions possibles

3.1. Les mesures de contrôle

Cette série de mesures a montré que l'intensité des mesures est peu fiable pour distinguer des surfaces. Dans le cas des voitures autonomes, l'intensité peut aider à différencier quelques objets.

D'autres techniques fonctionnent de manière plus fiable pour différencier des surfaces. Des caméras, par exemple, peuvent être utilisées pour détecter des voies de circulation. Des exemples de code utilisant des caméras de cette façon existent déjà (Moataz, 2018).

3.2. Les mesures avec illumination variable

Les prises de mesures avec des illuminations variées ont montré que la lumière ambiante, que ce soit d'origine solaire ou artificielle, a un effet négligeable sur la qualité des mesures. Les LiDARs dans les voitures autonomes peuvent être utilisés dans des situations variées (Figure 12).

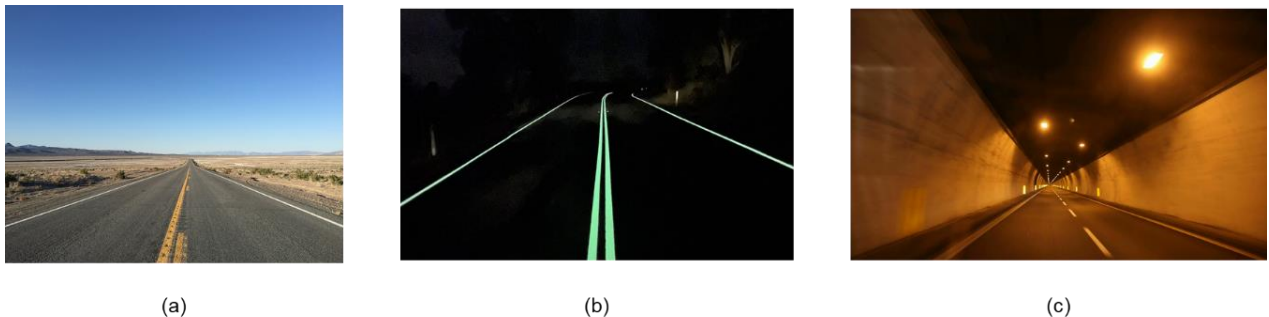


Figure 12 : Différentes conditions d'illumination rencontrées sur la route (a) lumière du jour (Famartin, 2015), (b) tunnel éclairé uniquement par les phares d'une voiture (Zachariah, 2022) et (c) tunnel équipé d'éclairages (Prescott, 2023).

3.3. Les mesures en présence de miroirs

Les LiDARs n'arrivent pas à détecter les miroirs. Lors des prises de mesures, ils observent la distance entre le capteur, le miroir, et la surface projetée par le miroir. Les mesures en présence de miroirs ou autre surface réfléchissant la lumière de manière spéculaire présentent un danger important pour les véhicules autonomes. Ils circulent alors avec une vision erronée de leur environnement (Figure 13).



Figure 13 : Exemples de surfaces réfléchissantes présentes dans des situations routières (a) camion-citerne en métal et (b) gratte-ciel avec une ossature métallique (Alloprof, 2023).

Des surfaces qui réfléchissent la lumière de manière spéculaire sont présentes sur la route. Les obstacles de ce type sont invisibles pour les véhicules autonomes.

Plusieurs solutions existent pour éviter ce problème, la première étant de compléter le LiDAR avec un autre type de capteur capable de détecter les surfaces spéculaires. Les détecteurs à base d'ondes électromagnétiques ne marchent pas, elles rencontrent le même problème que les LiDARs. Il faut donc utiliser un sonar, à base d'ondes sonores, capable de visualiser les miroirs. Cette solution est coûteuse, elle implique l'achat d'un deuxième capteur. Elle est également coûteuse au niveau du traitement informatique des résultats. Il faut compiler les résultats de deux capteurs, et savoir quand un capteur est en situation de difficulté.

D'autres solutions sont possibles, à base de traitement de données. Une étude sur les miroirs et les véhicules autonomes de 2023 propose, parmi d'autres des solutions en lien avec le machine learning (Damodaran, Mozaffari, Alirezadeh, & Ahamed, 2023).

3.4. Les mesures en présence d'une fenêtre

Les fenêtres sont des surfaces indétectables pour les LiDARs. Au contraire des miroirs, le capteur voit à travers la fenêtre, et ignorent complètement sa présence. La seule trace de cette surface est une réduction des intensités de mesures. Cela représente un danger pour les voitures autonomes. Les vitres sont des surfaces invisibles pour les LiDARs. En présence de surfaces transparentes, les nuages de points sont trompeurs, les capteurs détectent une situation sécuritaire derrière la vitre, mais l'ignorent. Une collision est donc possible avec la vitre.

Des solutions à ce problème existent. De la même manière que les miroirs, des ondes sonores peuvent être utilisés pour détecter les vitres. Des manières de détecter des surfaces transparentes en utilisant uniquement un capteur LiDAR sont en voie de développement. Une étude de 2021 a proposé une technique pour résoudre ce problème (Tibebu, Roche, De Silva, & Kondoz, 2021).

3.5. Les mesures en présence de surfaces absorbantes

Les surfaces absorbantes produisent des prises de mesures à intensités basses, et quelques fois des résultats inutilisables. Cet effet provoque une diminution de la fiabilité du nuage de points.

Le montage utilisé a montré que les capacités des LiDARs peuvent être surestimées par les fabricants. Le développement des voitures autonomes devrait pouvoir s'appuyer sur des prises de mesures sûres. Les capacités des LiDARs utilisés doivent donc être bien évaluées pour éviter les problèmes rencontrés lors des prises de mesures.

Les surfaces noires et absorbantes sont extrêmement courantes sur la route. Environ 20 % des voitures aux États-Unis sont noires (Edmunds, 2023). Chaque véhicule de cette couleur représente donc un risque potentiel pour les véhicules autonomes. La majorité des routes sont également d'une couleur foncée.

Une augmentation de l'intensité du faisceau lumineux envoyé par le LiDAR est une solution pour éviter ce problème. Avec une onde plus puissante, davantage de lumière serait réfléchi et résulterait en une lecture plus fiable. Cette amélioration augmenterait la consommation énergétique et le prix du capteur, ce qui pourrait produire des difficultés pour la commercialisation de voitures autonomes.

4. Prolongations possibles

Des améliorations pourraient être imaginées. Les moteurs ont été forcés d'effectuer un arrêt complet entre chaque prise de mesures LiDAR, pour des raisons de précision et de stabilité. Les mouvements provoquent en effet des vibrations. L'achat de moteurs de meilleure qualité permettrait de produire des séries de mesures sans devoir arrêter complètement le LiDAR entre chacune. La vitesse des prises de mesure serait ainsi augmentée.

Les prises de mesures en simulant des mauvaises conditions météorologiques se sont révélées impossibles à effectuer. Pour les réaliser dans le futur, il serait nécessaire de disposer d'une machine de type professionnel qui simule le brouillard et la pluie et puisse produire des effets visibles sur les résultats. Des essais ont été effectués avec une douche pour simuler de la pluie. Le flux d'eau est insuffisant et ne convient pas pour reproduire les effets de la pluie.

Le LiDAR utilisé pour le montage pourrait être orienté que dans une direction fixe. Il prendrait plusieurs mesures par seconde en pivotant lentement la surface détectée par le LiDAR. La distance entre les deux reste constante, ce qui nous permettrait d'investiguer les effets de l'angle d'incidence sur les mesures.

5. Conclusion

Un montage simulant le fonctionnement des LiDARs utilisés dans les véhicules autonomes a été utilisé dans des situations problématiques pour mettre en évidence leurs limitations. Le montage utilisé dans notre travail a produit des résultats proches de ceux

obtenus par une lecture de LiDAR professionnel, malgré des limitations de fonctionnement, telle que la rotation sur deux axes du capteur.

Lorsque le capteur a rencontré des surfaces spécifiques, telles le miroir ou la vitre, il a généré des mesures imprécises, trompeuses, et parfois erronées. Le LiDAR était donc incapable de prendre des mesures fiables dans toutes les situations potentiellement rencontrées par les véhicules autonomes.

Le LiDAR est insuffisant pour être utilisé seul pour assurer la sécurité dans les voitures autonomes. Des solutions existent pour résoudre les problèmes rencontrés, tel que l'ajout d'autres types de capteurs, ou des techniques de post-processing. La voiture Waymo utilise une combinaison de LiDARs, de radars et de caméras, et des techniques spécifiques de traitement des résultats. Ces solutions ajoutent de la complexité et des coûts au développement de cette technologie. Les différents problèmes rencontrés par les LiDARs freinent donc considérablement la commercialisation des voitures autonomes.

Même si les voitures autonomes font rêver, les systèmes développés actuellement laissent un grand nombre de questions en suspens. En plus des problèmes technologiques, elles impliqueraient, si elles sont adoptées massivement, des dégâts inacceptables du point de vue environnemental, une diminution de l'utilisation des transports en commun et une hausse de la congestion routière. Le problème reste ouvert pour trouver des solutions qui prennent en compte tous les défis présents et futurs auxquels doit répondre le développement de la circulation routière.

6. Bilan personnel

Ce travail m'a permis de développer beaucoup de nouvelles connaissances sur les LiDARs et les voitures autonomes. Ma recherche lors de la rédaction a suscité chez moi des changements de perspectives et d'opinions sur ces sujets.

La complétion du montage utilisé pour les prises de mesures a demandé une maîtrise de techniques variées. Le choix des composants, la rédaction du code et la modélisation en 3D des pièces de raccordement sont tous des domaines que j'ai dû développer. Le montage m'a donc permis de progresser dans des domaines hors du cadre scolaire.

Pour la première fois j'ai rédigé un long document en français, alors qu'il aurait été beaucoup plus confortable pour moi de le faire en anglais. J'ai aussi réalisé l'importance d'une bonne gestion du temps à disposition.

7. Références

- Alloprof. (2023, 10 28). *La réflexion*. Récupéré sur Alloprof: <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/physique/physique-la-reflexion-p1032>
- American Optometric Association. (2023, 7 5). *Legal blindness in America*. Récupéré sur American Optometric Association: <https://www.aoa.org/news/clinical-eye-care/diseases-and-conditions/legal-blindness-in-america?sso=y>
- Ayre, J. (2017, 1 9). *Waymo (Google) Shaved 90% Off LIDAR Sensor Cost By Producing In-House (\$75,000 To \$7,500)*. Récupéré sur CleanTechnica: <https://cleantechnica.com/2017/01/09/waymo-google-shaved-90-off-lidar-sensor-cost-producing-house-75000-7500>
- Bridges, A. (2015, 5 1). *Explainer: What are lidar, radar and sonar?* Récupéré sur Science News Explores: <https://www.snexplores.org/article/explainer-what-are-lidar-radar-and-sonar>
- Chain-Cahn-Clark. (2020, 19 30). *94 percent of car crashes are caused by human error; autonomous vehicles may be able to help*. Récupéré sur Chain-Cahn-Clark: <https://www.chainlaw.com/car-crash-accidnet-human-error-autonomous-self-driving-vehicle>
- Damodaran, D., Mozaffari, S., Alirezaee, S., & Ahamed, M. J. (2023). Experimental Analysis of the Behavior of Mirror-like Objects in LiDAR-Based Robot Navigation. *Appl. Sci.*, 2908.
- Edmunds. (2023, 10 28). *Most Popular Car Colors in America*. Récupéré sur Edmunds: <https://www.edmunds.com/most-popular-car-colors/>
- Famartin. (2015, 4 2). *View north along U.S. Route 95 in the Forty Mile Desert of Churchill County, Nevada*. Récupéré sur Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Road#/media/File:2015-04-02_18_21_50_View_north_along_U.S._Route_95_in_the_Forty_Mile_Desert_of_Churchill_County,_Nevada.JPG
- Génération Robots. (2023, 10 28). *Qu'est-ce que la technologie LiDAR?* Récupéré sur Génération Robots: <https://www.generationrobots.com/blog/fr/qu-est-ce-que-la-technologie-lidar>
- Grey, C. (2016). *The Simple Solution to Traffic*. Récupéré sur YouTube: https://www.youtube.com/watch?v=iHzzSao6ypE&ab_channel=CGPGrey
- Hassab, K. (2023, 5 1). *Lidar vs. Radar: Comprehensive Comparison and Analysis*. Récupéré sur Wevolver: <https://www.wevolver.com/article/lidar-vs-radar-detection-tracking-and-imaging>
- Le monde en images. (2023, 10 28). *Réflexion diffuse ou spéculaire*. Récupéré sur Le monde en images: <https://monde.ccdmd.qc.ca/ressource/?id=121718&demande=desc>

- LidarRadar. (2023, 10 28). *Radar Vs. LiDAR Vs. Sonar*. Récupéré sur LidarRadar: <https://lidarradar.com/info/radar-vs-lidar-vs-sonar>
- Lienert, P., & Klayman, B. (2019, 3 6). *A chaotic market for one sensor stalls self-driving cars*. Récupéré sur Reuters: <https://www.reuters.com/article/cbusiness-us-autos-autonomous-lidar-focu-idCAKCN1QN0HW-OCABS>
- Martin, S. (2023, 10 5). *Car crash statistics*. Récupéré sur Bankrate: <https://www.bankrate.com/insurance/car/car-crash-statistics>
- McCormick, I. A., Walkey, F. H., & Green, D. E. (1986). Comparative perceptions of driver ability--a confirmation and expansion. *Accid Anal Prev*, 205-208.
- Moataz, E. (2018, 4 23). *Computer Vision for Lane Finding*. Récupéré sur Github: <https://github.com/Moataz-E/computer-vision-lane-finding>
- Moss, K. (2022, 11 29). *Waymo launches autonomous vehicle service in downtown Phoenix*. Récupéré sur The State Press: <https://www.statepress.com/article/2022/11/waymo-released-to-public-downtown-phoenix>
- Muscad, O. (2023, 03 30). *Autonomous vs Automated vs Self-Driving: A Comparison Guide*. Récupéré sur Datamyte: <https://datamyte.com/autonomous-vehicle>
- NHTSA. (2017, 10). *Traffis Safety Facts*. Récupéré sur NHTSA: <https://crashstats.nhtsa.dot.gov/Api/Public/ViewPublication/812456>
- Prescott, P. (2023, 10 28). *HD Timelapse Of Car Driving On Highway At Night Through Tunnels*. Récupéré sur Storyblocks: <https://www.storyblocks.com/video/stock/hd-timelapse-of-car-driving-on-highway-at-night-through-tunnels-kl4s1-e>
- Rivelli, E. (2022, 8 24). *US commuting facts & statistics*. Récupéré sur Bankrate: <https://www.bankrate.com/insurance/car/commuting-facts-statistics/#commuting-to-work-in-the-us-facts-statistics>
- Royo, S., & Ballesta-Garcia, M. (2019). An Overview of Lidar Imaging Systems for Autonomous Vehicles. *Appl. Sci.*, 4093.
- Shuttleworth, J. (2019, 01 07). *SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update*. Récupéré sur SAE International: <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>
- Strauss, A. (2019, 4). *Véhicule autonome*. Récupéré sur Cerema: https://www.cerema.fr/system/files/documents/2020/07/vehicule_autonome.pdf
- Synopsis. (2023, 10 28). *What is LiDAR?* Récupéré sur Synopsis: <https://www.synopsys.com/glossary/what-is-lidar.html>
- Tibebu, H., Roche, J., De Silva, V., & Kondo, A. (2021). LiDAR-Based Glass Detection for Improved Occupancy Grid Mapping. *Sensors*, 2263.
- Tucker, M. B., Aubert, M., Sampaio de Almeida, V., Clamann, M., & Cummings, M. L.

- (2015, 11 14). *Detection of Attentional State in Long-Distance Driving Settings Using Functional Near-Infrared Spectroscopy*. Récupéré sur Duke University: http://hal.pratt.duke.edu/sites/hal.pratt.duke.edu/files/u10/TRBSubmissionPaper_Revision_Final_11_18_2015.pdf
- University of Cambridge. (2019, 5 19). *Driverless cars working together can speed up traffic by 35 percent*. Récupéré sur Science Daily: <https://www.sciencedaily.com/releases/2019/05/190519191641.htm>
- Valiante Mott. (2023, 10 28). *Self-driving cars: Pros and cons*. Récupéré sur Valiante Mott: <https://valientemott.com/auto-collisions/self-driving-cars-pros-and-cons>
- VectorNav. (2023, 10 28). *Lidar Mapping*. Récupéré sur VectorNav: <https://www.vectornav.com/applications/lidar-mapping>
- Velodyne Lidar. (2023, 10 28). *Alpha Prime*. Récupéré sur Velodyne Lidar: <https://velodynelidar.com/products/alpha-prime/>
- Vogelwarte. (2023, 10 28). *Climat*. Récupéré sur Vogelwarte: <https://www.vogelwarte.ch/modx/fr/atlas/evolution/climat>
- Wang, R., Ferrie, F. P., & Macfarlane, J. (2012). A methods for detecting windows from mobile LiDAR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1129-1140.
- Waymo-DataSet. (2019, 8 21). *Waymo Open Dataset: Sharing our self-driving data for research*. Récupéré sur Waymo: <https://waymo.com/blog/2019/08/waymo-open-dataset-sharing-our-self.html>
- Waymo-Driver. (2023, 10 28). *Waymo Driver*. Récupéré sur Waymo: <https://waymo.com/waymo-driver/>
- Waymo-General. (2023, 10 28). *Waymo-General*. Récupéré sur Waymo: <https://waymo.com/>
- Waymo-HowItWorks. (2023, 10 28). *How it works*. Récupéré sur Waymo: <https://waymo.com/waymo-driver>
- Waymo-Picture. (2022, 9 21). *Informing smarter lidar solutions for the future*. Récupéré sur Waymo: <https://waymo.com/blog/2022/09/informing-smarter-lidar-solutions-.html>
- Waymo-Safety. (2023, 10 28). *Safety*. Récupéré sur Waymo: <https://waymo.com/safety/>
- White, E. (2022, 10 19). *Drivers Too Trusting of Semi-Autonomous Technology, IIHS Says*. Récupéré sur Car and Driver: <https://www.caranddriver.com/news/a41710516/driver-safety-abuse-semi-autonomous-technology-insurance-institute/>
- WHO. (2022, 06 20). *Road traffic injuries*. Récupéré sur WHO: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>
- Wikipedia-Albédo. (2023, 10 28). *Albédo*. Récupéré sur Wikipedia:

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Alb%C3%A9do>

Wikipedia-JFK. (2023, 10 28). *AirTrain JFK*. Récupéré sur Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/AirTrain_JFK

Wikipedia-Lidar. (2023, 10 28). *Lidar*. Récupéré sur Wikipedia:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Lidar>

Wikipedia-SAE. (2023, 10 28). *SAE International*. Récupéré sur Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/SAE_International

Wikipedia-SelfDrivingCar. (2023, 10 28). *Self-driving car*. Récupéré sur Wikipedia:
https://en.wikipedia.org/wiki/Self-driving_car

Wikipedia-VoitureAutonome. (2023, 10 28). *Véhicule autonome*. Récupéré sur Wikipedia:
https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_autonome

Wikipedia-Waymo. (2023, 10 28). <https://en.wikipedia.org/wiki/Waymo>.

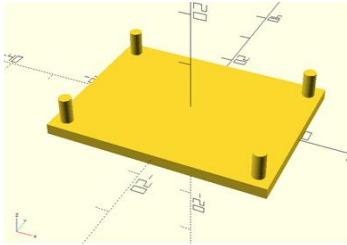
Yellowscan. (2021, 1 26). *Is LiDAR compatible with rainy or foggy weather?* Récupéré sur Yellowscan: <https://www.yellowscan.com/knowledge/is-lidar-compatible-with-rainy-or-foggy-weather/>

Zachariah, B. (2022, 6 6). *Victoria trials glow-in-the-dark line markings*. Récupéré sur Drive: <https://www.drive.com.au/news/victoria-trials-glow-in-the-dark-line-markings/>

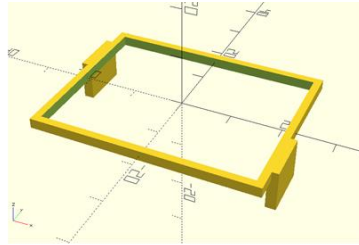
Annexes

A. Informations complémentaires sur le montage

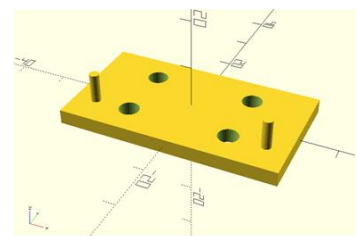
A.1. Plan des pièces de raccordement imprimées en 3D



(a)






(b)






(c)

Figure 14 : Plan des pièces de raccordement imprimées en 3D utilisées pour le montage, (a) et (b) pièces de raccordement pour lier moteurs au Raspberry Pi et (c) pièce de raccordement pour lier LiDAR au moteurs.

A.2. Table des composants utilisés pour la réalisation du montage

Pièce	Entreprise	Image	Source	Prix (CHF)
Capteur LiDAR	MakerFocus		MakerFocus TFmini-s Micro Lidar Module 0.1-12M Lidar Range Finder Sensor Obstacle Avoidance Sensor Tiny Module 1000Hz Single Point UART I2C IO Compatible with Pixhawk Arduino and Raspberry Pi	36
2 Moteurs	Arducam		https://www.amazon.com/Arducam-Upgraded-Camera-Platform-Raspberry/dp/B08PK9N9T4/ref=mp_s_a_1_1?crd=142IFG13JK1Z8&keywords=arducam+upgraded+camera+pan+tilt&qid=1698487112&srefix=arducam+upgraded+camera+pan+tilt%2Caps%2C175&sr=8-1	25
Micro-contrôleur	Raspberry Pi		https://www.digikey.ch/de/products/detail/raspberry-pi/SC1029/6152804?utm_adgroup=General&utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=Shopping Product All%20%28Catch-up%29&utm_term=&productid=6152804&utm_content=General&utm_id=go_cmp-17998691427_adg-142975836667_ad-615797033692_pla-293946777986_dev-c_ext-prd-6152804_sig-EAlaIQobChMI2oSd0s2Y	32

			ggMVV5GDBx3JFApcEAQYASABEgLGMPD_BwE&gclid=EAlaIQobChMI2oSd0s2YggMVV5GDBx3JFApcEAQYASABEgLGMPD_BwE	
Ordinateur	PC générique			
Câble Ethernet	Générique		https://www.digitec.ch/de/s1/product/digitec-ethernet-patchkabel-rj45-sftp-cat6a-050-m-netzwerkkabel-12118150?dbq=1&utm_source=google&utm_medium=cpc&campaignid=20496494580&adgroupid=&adid=&dgCidg=EAlaIQobChMI1tmtys6YggMV_5SDBx3ibwCZEAQYASABEgLGMPD_BwE&gclid=EAlaIQobChMI1tmtys6YggMV_5SDBx3ibwCZEAQYASABEgLGMPD_BwE&gclid=aw.ds	11
Fil TTL USB	Izokee		https://www.amazon.com/dp/B07D6LLX19?ref=ppx_pop_mob_ap_share	8
Chargeur USB	Générique		https://www.digitec.ch/en/s1/product/apple-usb-c-power-adapter-20-w-usb-chargers-14005650#fullscreen=show	20

Imprimante 3D	Creality Ender 3 Pro		https://www.creality.com/products/ender-3-pro-3d-printer	200-300
------------------	-------------------------	---	---	---------

Tableau 1 : Liste des composants utilisés pour le montage, avec lien et prix d'achat en CHF.

B. Extraits du code Python pour le montage

B.1. Code pour paramètres

Voici un exemple de code provenant de «Datacollection». Cette fonction définit les paramètres pour les moteurs tels que les angles de saut x et y, et les angles de départ et d'arrivée.

```
def collect_measurements(
    logger: structlog.BoundLogger,
    rpi: client.Client,
    min_theta: int = 90,
    max_theta: int = 160,
    theta_step: int = 5,
    min_phi: int = 0,
    max_phi: int = 160,
    phi_step: int = 5,
) -> List[utils.SphericalCoordinate]:
    theta_steps = (max_theta - min_theta) // theta_step + 1
    phi_steps = (max_phi - min_phi) // phi_step + 1
    total_steps = theta_steps * phi_steps
    strengths=[]
    coordinates: List[utils.SphericalCoordinate] = []
    with tqdm(total=total_steps) as progress:
        progress.set_description("Collecting measurements")

        for theta in range(min_theta, max_theta + 1, theta_step):
            for phi in range(min_phi, max_phi + 1, phi_step):
                if (theta // theta_step) % 2 != 0:
                    phi = max_phi - phi

                measurement = fetch_measurement(logger, rpi, theta, phi)
                strength=measurement.strength if measurement else math.nan
                strengths.append(strength)
                coordinate = convert_measurement_coordinate(
                    theta,
                    phi,
                    measurement.distance if measurement else math.nan,
                )
                coordinates.append(coordinate)

                if measurement is not None:
                    progress.set_postfix(temperature=measurement.temperature)

            progress.update(1)

    return coordinates, strengths
```

B.2. Code pour enregistrement de résultats

Cette fonction est responsable de l'enregistrement des résultats obtenu par le montage.

```
def store_output(filename: str, output: List[utils.SphericalCoordinate], strengths):
    lines = ["theta,phi,radius,strengths\n"]
    count=0
    for coordinate in output:
        lines.append(f"{coordinate.theta},{coordinate.phi},{coordinate.radius},{strengths[count]}\n")
        count+=1

    with open(filename, "w+") as f:
        f.write("".join(lines))
```

B.3. Code pour lecture du fichier de résultats

Voici quelques exemples de code de «plotting». Cet extrait est responsable de la récupération du code suite à l'enregistrement de la part de «datacollection».

```
def load_output(filename: str) -> List[utils.SphericalCoordinate]:
    with open(filename, "r") as f:
        data = f.read()
        lines = data.split("\n")[1:]

    coordinates: List[utils.SphericalCoordinate] = []
    strength = []
    for line in lines:
        if line != "":
            values = line.split(",")
            coordinates.append(
                utils.SphericalCoordinate(
                    float(values[0]),
                    float(values[1]),
                    float(values[2]),
                )
            )
            strength.append(float(values[3]))

    return coordinates, strength
```

B.4. Code pour détermination de couleurs en fonction de l'intensité

Ces trois fonctions transforment l'intensité des mesures en valeurs utilisées pour définir les couleurs des points du nuage de points. «strength_coefficient» sert à transformer une valeur d'intensité entre 200 et 3000 en coefficient variant entre 0 et 1. Ensuite, «color» fait correspondre cette valeur à des valeurs «rgba», définissant une couleur précise. Finalement, «color_list» remplace chaque valeur de la liste contenant toutes les mesures d'intensité à une valeur «rgba».

```
def strength_coefficient(x):  
    return float((x-200)/3000)  
  
def color(x):  
    cmap=plt.get_cmap('inferno')  
    plt.set_cmap(cmap)  
    rgba=cmap(strength_coefficient(x))  
    return rgba  
  
def color_list(x):  
    for i in x:  
        i=color(i)  
    return x
```

B.5. Code pour construction de nuages de points

La fonction «scatter_data» construit le nuage de point final avec les coordonnées cartésiennes et les couleurs d'intensité.

```
def scatter_data(data: List[utils.CartesianCoordinate]):  
    x = [coordinate.x for coordinate in data]  
    y = [coordinate.y for coordinate in data]  
    z = [coordinate.z for coordinate in data]  
    s = [strength for strength in strength]  
    ax = plt.axes(projection="3d")  
    ax.scatter3D(x, y, z, s=10, c=color_list(s))  
    plt.show()
```