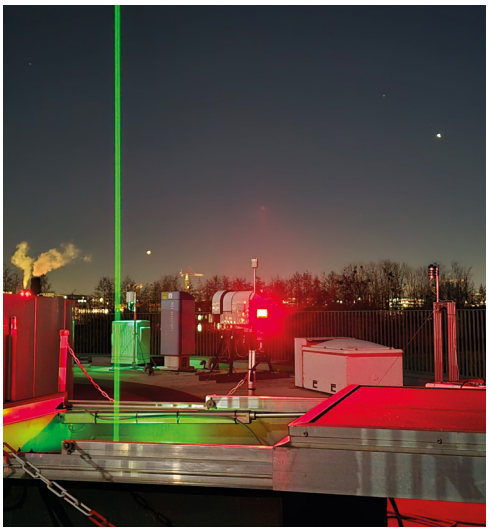
LIDAR LA RÉVOLUTION EST EN ROUTE : COMMENT CHOISIR SON CAPTEUR ?

Alexandre BIASI*
Lumibird, 2 Rue Paul Sabatier, 22300 Lannion
***abiasi@lumibird.com**



© SIRTA, Palaiseau, France.

Les LiDAR acronyme de Light Detection And Ranging sont des instruments opto-électroniques de mesure utilisant des lasers comme principale source lumineuse. Suivant leur configuration, ces instruments peuvent mesurer une multitude de caractéristiques d'une cible (distance, vitesse, consistance, concentration, spectre vibratoire,...). Ces cibles pouvant être dures (véhicules, terrains,...) ou diffuses (aérosols, molécules). Cet article présente une vue générale des techniques de mesures LiDAR et de ses applications. Pour chacune de ces applications, les enjeux technologiques et les spécifications critiques seront décrits.

https://doi.org/10.1051/photon/202513563

Historiquement, les premiers systèmes LiDARs sont apparus dans les années 1960, peu après l'invention du laser. Les applications initiales concernaient principalement la télédétection atmosphérique et la topographie aérienne. À l'époque, ces instruments étaient volumineux, coûteux, et réservés à quelques laboratoires nationaux. Depuis, la miniaturisation des composants optoélectroniques, la baisse du coût des lasers, et l'essor des capteurs rapides (APD, SPAD, SiPM) ont profondément transformé le paysage. Les LiDARs modernes sont devenus compacts, rob ustes, et intégrables dans une grande variété de plateformes — drones, véhicules, systèmes de surveillance ou instruments scientifiques.

Au-delà de l'évolution matérielle, c'est l'intégration logicielle qui a permis l'explosion des usages. Les nuages de points 3D générés par les LiDARs sont désormais traités en temps réel grâce à des algorithmes avancés d'analyse géométrique et d'apprentissage automatique. La photonique n'est plus seulement un moyen d'émettre et de détecter la lumière : elle devient un vecteur d'intelligence environnementale.

Cette convergence entre matériel photonique et traitement de données ouvre la voie à une nouvelle génération de systèmes de mesure autonomes, capables de s'adapter dynamiquement à la scène observée.

C'est dans ce contexte que se pose aujourd'hui la question essentielle : comment choisir le bon LiDAR selon son application, son environnement, et ses contraintes de performance ?

En premier lieu, nous allons décrire les principaux types de LiDAR ainsi que les architectures utilisées puis nous allons nous intéresser •••

aux différentes applications, à leurs principaux enjeux et aux technologies développées pour les surmonter.

LES CATÉGORIES DE LiDAR ET PRINCIPALES ARCHITECTURES

On distingue 3 catégories principales de LiDARs selon l'usage et la grandeur physique que l'on souhaite mesurer :

- Les LiDARs à détection direct. Dans cette catégorie, nous allons retrouver les LiDARs pour la mesure temps de vol (Time of Flight, ToF), les LiDARs pour la caractérisation atmosphérique et la mesure de la couverture nuageuse ou de dimensionnement et de concentration des particules atmosphériques.
- Les LiDARs à détection hétérodyne. Dans cette catégorie, nous allons retrouver les LiDARs pour la mesure de vitesse par effet Doppler (LiDARs Doppler) ou des spectres de vibrations (vibromètre laser)
- Les LiDARs à détection indirecte. Dans cette dernière catégorie, les photons sont utilisés pour exciter des molécules et le LiDAR intègre un analyseur de spectre, un monochromateur ou des filtres interférentiels selon le besoin (LiDARs Raman).

Pour chacune de ces catégories, trois architectures optiques peuvent être choisies en fonction des besoins de compacité, de vitesse et de précisions de mesures ainsi que l'interaction laser-matière que l'on souhaite mettre en évidence. Ces architectures se distinguent selon la position du canal de détection par rapport au canal d'émission et par extension de la position de la détection par rapport à l'émission. On peut donc rencontrer les agencements suivants :

- Les LiDAR monostatiques. Les canaux d'émission et de réception sont confondus.
- Les LiDARs bistatiques. Les canaux d'émission et de réception sont séparés, l'émetteur et le récepteur peuvent être proches ou éloignés selon que l'on souhaite mesurer la rétrodiffusion directe ou indirecte)
- Les LiDARs MIMO (Multiple Input, Multiple Output). Plusieurs émetteurs et plusieurs récepteurs sont utilisés simultanément afin d'obtenir une mesure plus résolue, plus rapide ou sur plusieurs angles. Ces LiDARs utilisent un codage ou un positionnement spécifique des émetteurs afin de pouvoir décorréler les différents retours.

Dans le chapitre suivant nous allons passer en revue les différents composants constituant un LiDAR. Ce sont les avancées technologiques de ces briques essentielles qui ont permis l'adoption rapide des LiDARs dans de nouveaux domaines tels que les véhicules autonomes, la robotique et les études environnementales.

LES PRINCIPAUX COMPOSANTS CONSTITUANT LES LiDARS

La source laser. La source laser peut être continue ou impulsionnelle, émettre à une ou plusieurs longueurs d'ondes, être large bande ou fine spectralement, être « encodée » ou modulé et être constituée d'un ou plusieurs émetteurs selon la typologie ou l'architecture du LiDAR.
Les lasers les plus couramment utilisés sont :

- Les lasers à base de semi-conducteurs : diodes lasers et VCSEL. Les principaux avantages de cette technologie sont sa compacité, son coût de fabrication, sa capacité à être produit en grand volume et son efficacité énergétique tandis que ses principaux inconvénients sont une puissance/énergie individuelle limitée et potentiellement sa qualité spatiale pouvant limiter sa portée.
- Les lasers solides : laser à fibre, lasers à cristaux. Les principaux avantages sont la puissance/énergie produite, la gamme de longueur d'onde et leurs qualités spectrales et spatiales tandis que les principaux inconvénients sont le volume, le coût et une fabrication généralement moins automatisée.

Les longueurs d'onde les plus couramment utilisées pour les LiDARs sont le 905nm (diode laser), le 1550nm (laser à fibre ou Er :YAG, longueur d'onde dite Eye-safe), le 1064nm (laser YAG) et ses multiples en fréquence 532 et 355nm.

Les détecteurs. Plusieurs types de détecteurs sont utilisés pour les applications LiDAR suivant la catégorie de LiDAR et la grandeur physique à mesurer.

- Les photodiodes PIN (Positive-Intrinsic-Negative). Composant opto-électronique basique destiné à convertir les photons en courant. Elles ont l'avantage d'être simples et économiques mais ne permettent la mesure que de puissance optique élevée et ne sont donc utilisées que pour les LiDAR de type ToF à courte portée. Cependant, en montage balancé et amplifié (Balanced photodiode, 2 photodiodes montées en parallèle dont les signaux sont soustraits), elles sont utilisées pour la détection cohérente (LiDAR Doppler) afin d'extraire un signal lumineux très faible et de supprimer une partie du bruit.
- Les photodiodes à avalanche (APD) sont une évolution des photodiodes PIN incluant un gain interne grâce à l'effet avalanche. Ces photodiodes ont une sensibilité beaucoup plus élevée à la lumière et sont donc

Copyright © 2025 - Lumibird Range finder SEEK B-N15, Portée 15km

généralement utilisées pour les LiDAR ToF de longue portée.

- Les photomultiplicateurs (PMT – PhotoMultiplier Tubes). Ces détecteurs ont une très grande sensibilité, large bande passante et un temps de réponse très rapide. Ils sont utilisés pour les LiDARs scientifiques et atmosphérique. Ils restent fragiles, volumineux et coûteux.
- Les SPAD (Single-Photon Avalanche Diodes) sont des photodiodes à avalanche fonctionnant en mode Geiger et donc capable de détecter un photon unique. Chaque photon va générer un signal unique. Les progrès en électronique ont permis de les miniaturiser et de les monter en matrice. Si les SPAD sont indépendants les uns des autres dans la matrice, on parle de matrice SPAD tandis que s'ils sont connectés en parallèle on parle de SiPM. La principale différence est la capacité des SiPM à mesurer l'intensité lumineuse. Les SPAD sont principalement utilisés en LiDAR ToF (3D scanning ou LiDAR automobile) mais les SiPM autrefois utilisés principalement pour la détection de particules commencent à être intégré dans les LiDARs automobiles.

La ou les optiques d'émission et réception. Les performances dépendent de la qualité du télescope ou de la lentille collectrice. Le rapport ouverture/focal détermine la sensibilité à la lumière rétrodiffusée. Des filtres interférentiels centrés sur la longueur d'onde laser permettent de rejeter la lumière parasite (solaire par exemple) ou de n'adresser que certaines raies (exemple : monochromateur pour les LiDAR Raman). Comme discuté ci-dessus, les optiques d'émission et de réception peuvent être identiques dans le cas d'un LiDAR monostatique. Le système sera ainsi simplifié et généralement plus compact. Dans le cas d'un système bistatique, les optiques d'émission et de réception sont séparées et peuvent être relativement différentes en ouverture/focal.

L'électronique de mesure et de traitement. C'est certainement dans ce domaine que les progrès ont été les plus impressionnants avec l'augmentation de la puissance de calcul embarquée (nombre de points traités) ainsi que l'avènement de l'intelligence artificielle dans le traitement des données (suppression des parasites, identification,...). Les principaux composants électroniques utilisés sont les TDC (Time-to-Digital Converter) pour les LiDAR ToF, ils sont associés à des FPGA ou des ASIC pour la reconstruction en temps réel du nuage de points pour les LiDARs 3D scanning.

Les principales applications des LiDARs et les enjeux associés :

Les range finders

Ces LiDARs sont utilisés pour mesurer avec précision une distance à une cible dure. Pour cela ils utilisent des lasers à impulsions courtes. Le système mesure le temps de vol aller-retour à la cible de l'impulsion lumineuse en mesurant le temps entre l'émission de l'impulsion et la réception de celle-ci. Ces systèmes sont dans la majorité des cas intégrés dans des systèmes embarqués en particulier militaire (lunettes, drones, chars, hélicoptères,..). Outre la portée, les enjeux sont par conséquent le volume et le poids, la consommation, la résilience par rapport à l'environnement (gamme de température étendue et tenue aux vibrations/chocs) et la fiabilité.

Les LiDARs 3D scanning

Les LiDARs 3D scanning sont conçus pour produire un nuage de points devant ou autour du LiDAR. Afin de déterminer avec précision la distance entre le LiDAR et son environnement deux technologies peuvent être utilisées, soit sur le principe de mesure de temps de vol, soit sur la technologie FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave).

L'ouverture ou FOV (Field Of View) définit les capacités du LiDAR en termes d'angle de vue. Afin de couvrir la FOV, une majorité des LiDARs 3D scanning intègre soit un mécanisme de déflection du faisceau soit des matrices de lasers et de capteurs soit les deux. D'autres utilisent des flashs lasers et une matrice de capteurs.

Les principales applications de ces LiDARs sont la topographie et bathymétrie (par avion, par drone et •••

The OEC

ENHANCED OPTICAL ENGINEER COMPANION

Metrology on-the-go

Modular system

Upgradable

VIS-NIR / SWIR

www.imagine-optic.com

sales@imagine-optic.com
+33 1 64 86 15 60

imagine optic

Copyright © 2025 – Trimble® X9 scanner laser 3D.

potentiellement par bateau pour la bathymétrie), les véhicules autonomes, l'industrie (activité portuaire), la sécurité (détecteur de drone ou d'intrusion) et la robotique. Afin de répondre aux enjeux spécifiques de ces applications, plusieurs technologies/intégrations ont été développées par les industriels :

- Les LiDARs solid-state avec pièces mobiles. LiDAR ToF utilisant des miroirs galvanométriques ou la rotation de prismes ou des composants à base de MEMS pour défléchir le faisceau laser. Ces LiDARs peuvent également intégrer des matrices d'émetteurs et de capteurs pour tracer une ligne qui sera balayée par un polygone rotatif.
- Les LiDARs solid-state sans pièces mobiles (OPA et Flash LiDAR, matrices). LiDAR ToF utilisant la modulation de phase pour défléchir le faisceau ou des matrices d'émetteurs et de capteurs fixes pour couvrir l'ouverture.
- Les LiDARs FMCW cohérents. L'émission laser continue est modulée en fréquence (chirp) par un signal électrique. Le signal réfléchi est mélangé à l'oscillateur local (mesure hétérodyne). La fréquence du battement détermine la distance à l'objet. Avec cette technologie, il est également possible de déterminer directement la vitesse radiale de la cible.

Les principaux enjeux des LiDARs 3D scanning par application sont définis dans le tableau ci-dessous :

Les LiDARs scientifiques et atmosphériques

Cette catégorie regroupe des LiDARs aux principes de fonctionnement et aux exigences d'exploitation variés. Certains peuvent être utilisés de manière quasi « industrielle », comme les LiDARs de mesure du vent ou ceux destinés à l'analyse chimique, tandis que d'autres sont exclusivement exploités par des équipes de recherche. Les principales applications de LiDAR atmosphériques sont la mesure du potentiel éolien, la météorologie, la sécurisation des aéroports (pour les LiDARs Doppler), l'étude de la couverture nuageuse et de la visibilité (pour les LiDARs à rétrodiffusion directe), ainsi que l'analyse chimique de l'atmosphère — y compris des couches supérieures — à l'aide des LiDARs Raman ou DIAL.

TYPE DE LiDAR	PORTÉE TYPIQUE	PRÉCISION	LONGUEUR D'ONDE	APPLICATIONS PRINCIPALES	ENJEUX
Aéroporté / Topographique	100–3000 m	5–15 cm	1064 / 1550 / 532 nm	Cartographie, géodésie, forêt, bathymétrie	Portée, large couverture, détection écho multiple pour classification, faible consommation, GPS/IMU
Terrestre / Mobile	50–1000 m	2–10 mm	905 / 1064 / 1550 nm	Infrastructures, urbanisme	Haute densité de points et précisions, FOV
Automobile	100–300 m	3–10 cm	905 / 1550 nm	ADAS, navigation	Compact, faible coût, cadence, environnement difficile, FOV
Industriel / Robotique	0.01–100 m	µm–mm	650–1064 nm	Robotique, métrologie	Haute cadence, robuste, grande précision
Militaire	1000m	10cm	1550nm	Sécurisation atterrissage, drone tracking	Environnement difficile, visibilité réduite, portée
Spatial	2000m	< cm	1550nm	Docking	Environnement difficile (choc/vibration, température, vide), fiabilité, grande dynamique de fonctionnement (FOV, portée, précision)

PRINCIPALES APPLICATIONS	TYPE D'INTERACTION	PRINCIPALES PERFORMANCES	ENJEUX TECHNOLOGIQUES
Mesure du potentiel éolien	Diffusion de Mie (particules aérosols)	Précision de mesure : vitesse <0.1m/s et direction : <2° Portée jusqu'à 500m EyeSafe	Grande fiabilité, mesure en environnement difficile, très faibles signaux à analyser, portabilité et faible consommation
Météorologie (prévision)	Diffusion de Mie (particules aérosols)	Précision de mesure : vitesse <0.2m/s et direction : <2° Portée jusqu'à 15km Scannant EyeSafe	Mesure en environnement difficile, très faibles signaux à analyser, très longue portée malgré les turbulences atmosphériques, IA pour le traitement des données
Météorologie (température, pression)	Diffusion Rayleigh (molécules)	Portée plusieurs dizaine de kms	Nécessite des lasers puissants et des détecteurs sensibles, calibration exigeante
Étude de la couverture nuageuse	Diffusion de Mie (particules aérosols)	Hauteur de la base des nuages (Ceilomètre) Profil vertical des nuages	Haute cadence de mesure, adaptation aux conditions changeantes, faible consommation
Sécurisation des aéroports (Détection de brouillard, mesure de visibilité, cisaillement du vent)	Diffusion de Mie (particules aérosols)	Performance identique aux LiDAR météorologiques	Réactivité en temps réel, intégration avec les systèmes de contrôle aérien, multi-instruments, robustesse face aux conditions météo
Aviation (sonde PITOT, turbulences)	Diffusion Raman (molécules)	Mesure de la vitesse de l'avion ~+/-1m/s, détection des turbulences Portée 1-2km	Miniaturisation des capteurs, intégration embarquée, traitement rapide des données
Analyse chimique de l'atmosphère	Diffusion Raman (molécules), DIAL	Identification de gaz spécifiques avec de faible concentration (quelques %)	Sélectivité spectrale, sensibilité élevée, calibration fine
Diffusion des particules (pollution, feu,..)	Diffusion de Mie / Doppler	Concentration de particules, vitesse du vent Portée plusieurs kms	Robustesse en milieu hostile, détection rapide, traitement des données volumineuses
Détection d'espèces métalliques (identification d'éléments, étude atmosphérique)	Fluorescence résonnante	Portée de quelques cms à plusieurs kms	Précision de quelques ppms à quelques % Excitation sélective, détection à faible concentration, compatibilité avec environnement industriel
Détection d'aérosols biologiques	Fluorescence	Identification de bioaérosols Réponse rapide en temps réel	Détection précoce, discrimination biologique, sécurité sanitaire
Analyse moléculaire (composition chimique détaillée)	Diffusion Raman (molécules)	Détection de quelques ppms	Détection multi-composants, sensibilité spectrale, traitement avancé

LES CRITÈRES DE CHOIX

Comme illustré dans les tableaux précédents, les critères de sélection d'un LiDAR varient selon les applications. Pour les usages extérieurs ou mobiles, la compacité, la faible consommation énergétique et la robustesse face aux conditions environnementales sont des facteurs clés. En revanche, pour les applications de métrologie, la priorité est donnée à la précision des mesures et à la portée du système. Bien entendu, ces paramètres doivent être mis en balance avec le coût et les services proposés par les fabricants. À titre d'exemple, un LiDAR destiné au scan 3D peut être commercialisé à un prix allant de quelques milliers à plusieurs dizaines de milliers d'euros, selon les performances recherchées.

En un peu plus de 50 ans, le LiDAR est devenu l'outil de mesure à distance par excellence. Il intervient dans de nombreux secteurs d'activité de la météorologie au véhicule autonome et la robotique en passant par la défense. Les développements ont bénéficié d'un afflux significatif de fonds, poussé par les marchés de l'automobile et de la robotisation. Ces fonds ont contribué à miniaturiser les systèmes et les rendre plus robustes mais aussi à industrialiser les lignes de production comme on peut le voir sur la vidéo promotionnelle du site Valéo de Shenzhen. En parallèle, l'essor de l'IA et du machine learning ont permis de gérer de plus grandes quantités de données et surtout de gagner en précision sur les données de sortie (identification pour le 3D scanning et l'automotive, réjection des points aberrants pour la météorologie, ...).

Afin de compléter cet article, une liste non-exhaustive des principaux fournisseurs de solution LiDAR est fournie avec leur domaine d'application et leurs principaux avantages/spécialisations.

ACTEURS	APPLICATION	SITE WEB	AVANTAGE/SPÉCIALISATION
Aeye	Automotive	https://www.aeye.com	Algorithme et portée
BAE Systems / Ball Aerospace	Detection obstacle (défense)	https://www.baesystems.com/en/	Système de défense
Erdilaser	Range finder	https://erdicn.com/	
Hesai	Automotive, robot industriel	https://www.hesaitech.com/	Leader des lidars automotive. Innovation rapide
Sécurisation des aéroports (Détection de brouillard, mesure de visibilité, cisaillement du vent)	Diffusion de Mie (particules aérosols)		Leader des lidars automotive. Innovation rapide
Innoviz	Automotive	https://innoviz.tech/	Miniaturisation des capteurs, intégration embarquée, traitement rapide des données
Jenoptik	Range-finder	https://www.jenoptik.com	Systèmes optiques
Leica Geosystems	3D scanning	https://leica-geosystems.com/	Variété de système, réputation
LSLidar	Automotive, detection obstacle (défense), robot industriel	https://www.lslidar.com/	Précision de quelques ppms à quelques % Excitation sélective, détection à faible concentration, compatibilité avec environnement industriel
Lumibird	Lidar Atmosphérique, Wind energy, sécurisation des aéroports, lasers pour lidar atmosphériques (space ou ground based), range finder, drone tracking, 3D scanning	www.lumibird.com	Intégration vertical, fiabilité, compacité
Luminar	Automotive	https://www.luminartech.com/	Précurseur sur les lidars autobiles
Noptel	Range-finder, automotive, 3D scanning	https://noptel.fi/	Spécialisation dans les lidar temps de vol avec différentes technologies
Ouster / Velodyne	Automotive, robot industriel, surveillance infrastructure	https://ouster.com/	Diversification
Raymetrics	Lidar Atmosphérique	https://raymetrics.com/	Centre de recherche météorologique, projets spécifiques
Riegl	3D scanning	https://www.riegl.com/	
RoboSense	Automotive, Robot industriel	https://www.robosense.ai/	Leader des lidars automotive, innovation rapide
Sick AG	Robot industriel	https://www.sick.com/fr/fr/	Compact et coût
Teledyne Optech	3D scanning	https://www.teledyneoptech.com/	
Trimble	3D scanning	https://www.trimble.com/	Compacité et précision
Vaisala	Lidar Atmosphérique, sécurisation des aéroports, Wind energy	https://www.vaisala.com/	Gamme étendue de lidar et équipement météorologique
Valéo	Automotive	https://www.valeo.com/fr/	Expérience dans la fourniture d'équipement automobile
ZX Lidar	Wind energy	https://www.zxlidars.com/	Spécialisation dans le wind energy