



**HAL**  
open science

## Synchronisation et calibrage entre un Lidar 3D et une centrale inertielle pour la localisation précise d'un véhicule autonome

Pierre Merriaux, Rémi Boutteau, Romain Rossi, Guillaume Coru, Vincent Vauchey, Xavier Savatier

### ► To cite this version:

Pierre Merriaux, Rémi Boutteau, Romain Rossi, Guillaume Coru, Vincent Vauchey, et al.. Synchronisation et calibrage entre un Lidar 3D et une centrale inertielle pour la localisation précise d'un véhicule autonome. Journées scientifiques d'URSI-France (Géolocalisation et Navigation dans l'Espace et le Temps), Mar 2018, Meudon, France. hal-01757933

**HAL Id: hal-01757933**

**<https://hal.science/hal-01757933>**

Submitted on 4 Apr 2018

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Synchronisation et calibrage entre un Lidar 3D et une centrale inertielle pour la localisation précise d'un véhicule autonome**  
*Synchronization and calibration between a 3D Lidar and an inertial measurement unit for the accurate localization of an autonomous vehicle*

---

**Pierre MERRIAUX<sup>1</sup>, Remi BOUTTEAU<sup>1</sup>, Romain ROSSI<sup>1</sup>, Guillaume CORU<sup>1</sup>, Vincent VAUCHEY<sup>1</sup>, and Xavier SAVATIER<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institut de Recherche en Systèmes Electroniques Embarqués, Normandie Univ, UNIROUEN, ESIGELEC, IR-SEEM, 76000 Rouen, France, {merriaux,boutteau,rossi,coru,vauchey,savatier}@esigelec.fr*

---

**Mots-clefs:** Lidar, centrale inertielle, localisation, synchronisation, calibrage, véhicule autonome

**Keywords:** Lidar, IMU, localization, synchronization, calibration, autonomous vehicle

---

**Résumé:**

La télédétection par laser (Lidar) est une technologie de plus en plus utilisée en particulier dans les fonctions de perception et localisation nécessaires à la conduite autonome. L'acquisition des données Lidar doit être couplée à la mesure du mouvement du véhicule par une centrale inertielle. Ces capteurs n'étant pas conçus pour fonctionner ensemble nativement, il est nécessaire de maîtriser leur synchronisation et leur calibrage géométrique. Cet article présente une méthode pour caractériser les décalages temporels entre un Lidar 3D et une centrale inertielle. Il explique aussi comment mettre en œuvre les méthodes de la littérature pour le calcul de la pose entre centrale inertielle et Lidar sur un véhicule utilisé en conditions réelles.

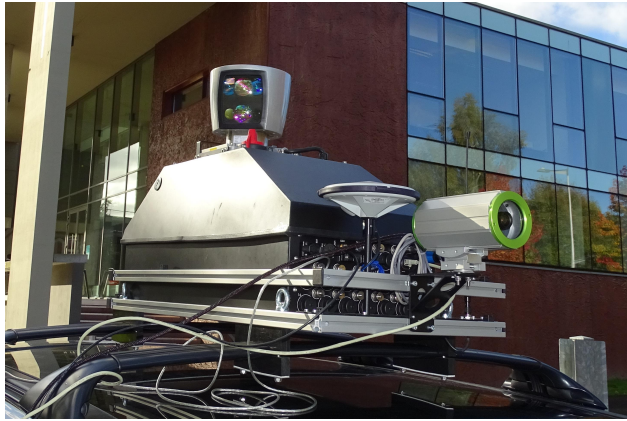
**Abstract:** Laser remote sensing (Lidar) is a technology increasingly used especially in the perception layers of autonomous vehicles. As the vehicle moves during measurement, Lidar data must be referenced in a fixed frame which is usually done thanks to an inertial measurement unit (IMU). However, these sensors are not designed to work together natively thus it is necessary to synchronize and calibrate them carefully. This article presents a method for characterizing timing offsets between a 3D Lidar and an inertial measurement unit. It also explains how to implement the usual methods for pose estimation between an IMU and a Lidar when using such sensors in real conditions.

## 1 Introduction

La télédétection par laser (Lidar) est une technologie qui s'est massivement diffusée ces dernières années, en particulier dans le domaine du véhicule autonome [1, 2]. De nombreux travaux et expérimentations exploitant des Lidars, initialement 2D et maintenant 3D, ont montré l'apport de ce type de capteur pour deux fonctions essentielles du véhicule autonome : la génération de cartes haute définition afin de localiser précisément le véhicule [3, 4] et la détection des obstacles autour du véhicule. La mesure par un Lidar embarqué sur un véhicule impose de coupler l'acquisition à une observation du mouvement propre à partir d'une centrale inertielle. La précision de la mesure 3D – et par extension la localisation du véhicule et des obstacles – est liée non seulement aux erreurs de mesure du Lidar et de la centrale inertielle mais aussi :

- à la qualité de la synchronisation entre le Lidar et la centrale inertielle, le véhicule se déplaçant en même temps que l'acquisition des mesures ;
- à l'estimation précise de la transformation géométrique entre le Lidar et la centrale inertielle de manière à reprojeter les points Lidars dans un repère géoréférencé.

Ces deux points sont peu traités dans la littérature bien qu'ils soient des éléments critiques de la performance globale du système de conduite autonome. Dans cet article nous présentons dans un premier temps une méthode expérimentale permettant de qualifier la synchronisation entre un Lidar 3D et une centrale inertielle. Cette démarche nous a permis de valider la datation de chaque impact Lidar par rapport à la date de la centrale inertielle. Dans un second temps, nous abordons la mise en œuvre de deux méthodes de calibrage géométrique entre centrale inertielle et Lidar 3D souvent citées dans la littérature mais rarement détaillées. Nous présentons la méthodologie, les bonnes pratiques pour leur implémentation et des résultats de calibrage issus de mesures sur véhicule en situation réelle.



(a) Dispositif placé sur un véhicule routier



(b) Dispositif placé sur petit robot-  
véhicule Segway RMP440

FIGURE 1 – Coffre de toit de référence installé sur deux types de véhicules compatibles du laboratoire.

Mode	GPS RTK	60s sans GPS
True Heading (°)	0.01	0.01
Roulis/Tangage (°)	0.005	0.005
Position X,Y (m)	0.02	0.1
Position Z (m)	0.05	0.07

TABLE 1 – Précision de la localisation du coffre de toit

## 2 Dispositif de mesure par Lidar 3D embarqué sur véhicule

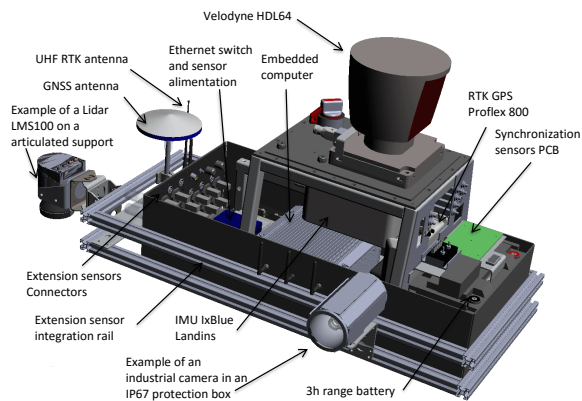
Dans le cadre de projets de recherche sur le véhicule autonome, nous avons développé un équipement embarqué se présentant comme un coffre de toit qui a été instrumenté pour permettre le recueil des données de perception 3D autour du véhicule. Ce dispositif est présenté sur la figure 1 et peut être installé sur le toit d'un véhicule routier ou sur petit robot-véhicule. Une présentation détaillée est montrée sur la figure 2a. La perception 3D de la scène est obtenue en équipant le coffre avec un Lidar 64 nappes (Velodyne HDL64) comme on le voit sur la figure 1 ou un Lidar 16 nappes (Velodyne VLP16); ces deux Lidars sont actuellement les plus communément utilisés. Le positionnement centimétrique (cf. table 1) peut être atteint grâce à un GPS-RTK (Proflex 800) couplé à une centrale inertielle de haute précision (Landins). Une baie d'acquisition avec synchronisation matérielle permet l'enregistrement de données de capteurs additionnels (caméras comme montré sur la figure 1 ou tout autre type de capteur de perception). Les données sont enregistrées par un PC, l'horodatage des flux étant assuré grâce au logiciel RT-MAPS d'Intempora. Le système a une autonomie de 3H. Ce dispositif a été conçu pour recueillir les données de référence nécessaire à la mise au point d'algorithmes pour le véhicule autonome, principalement la position précise du véhicule et la représentation 3D précise de la scène autour du véhicule à chaque instant. Si la précision du Lidar et de la centrale inertielle autorisent en principe une reconstruction 3D centimétrique de la scène, cette résolution est fortement dépendante de mesure de la transformation géométrique entre les repères de mesure du Lidar et de la centrale. Ces paramètres sont estimés dans une phase dite de calibrage extrinsèque. D'autre part, le véhicule étant en mouvement et le Lidar en rotation pendant toute son acquisition, la synchronisation des deux capteurs doit être la plus parfaite possible pour limiter les erreurs de mesure. Ces deux points - calibrage et synchronisation - sont l'objet de cet article et sont abordés dans les paragraphes qui suivent.

## 3 Synchronisation d'un Lidar avec une centrale inertielle

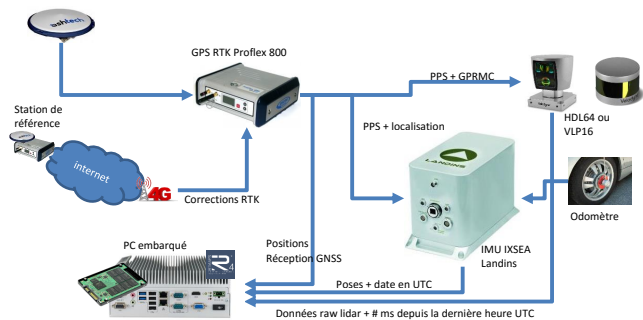
### 3.1 Influence sur la perception Lidar

Une reconstruction 3D consiste à projeter chaque point Lidar mesurés avec la position fournie par la centrale inertielle. Les fréquences de rotations des Lidars (Velodyne) sont comprises entre 5 et 20Hz. Prenons l'hypothèse d'un véhicule se déplaçant à 55km (15m/s) et un Lidar à 10Hz, si les acquisitions sont totalement asynchrones, la mesure est entachée d'une erreur allant jusqu'à un scan complet, soit 1.5m d'erreur. Les effets d'une mauvaise synchronisation sont encore plus marqués dans le cas d'une rotation du véhicule. Les points mesurés à une distance de 50m du Lidar lors d'une rotation de 25°/s comportent une erreur de 2.19m.

La synchronisation des données est donc essentielle pour obtenir des reconstructions 3D de qualité. Du fait



(a) Instruments contenus dans le coffre de toit de référence. La localisation est assurée par la fusion d'IMU à fog, d'un GPS RTK et d'un odomètre. Un ensemble de capteurs peut être ajouté sur les rails d'extension en fonction des expérimentations.



(b) Synthèse de la partie localisation du coffre de toit : Une station de référence installée sur le toit de notre laboratoire fournit les corrections RTK par le réseau 4G au GPS embarqué. La centrale inertielle Landins assure la fusion avec les GPS et l'odomètre. Le PC embarqué est chargé d'enregistrer l'ensemble des capteurs grâce au framework RTMaps.

FIGURE 2 – Coffre de toit instrumenté développé par l'IRSEEM. Ce moyen d'essai constitue notre référence pour les expérimentations externes sur véhicule, aussi bien pour la validation de la précision d'algorithmes que pour l'acquisition de données géo-référencées.

que les Lidars tournent mécaniquement pour réaliser l'acquisition d'un scan complet pendant que le véhicule se déplace, nous ne pouvons pas nous contenter d'une synchronisation pour chaque scan, il faut chercher à obtenir la date de chaque impact Lidar.

Dans un premier temps nous allons présenter le matériel et le logiciel utilisés dans notre coffre de toit permettant d'assurer cette synchronisation. Puis nous décrivons l'expérimentation mise au point pour valider cette synchronisation. Enfin, nous présenterons les résultats obtenus à la fois en simulation et sur des données réelles.

### 3.2 Description de l'acquisition des données

Comme décrit au paragraphe 2, la partie localisation du référentiel du coffre de toit est constituée d'une centrale inertielle qui fusionne un GPS RTK et un odomètre. Le GPS RTK reçoit ses corrections d'une station de base installée sur le toit du laboratoire par le réseau 4G. La centrale obtient la position du GPS par une liaison série et un signal de synchronisation de type Pulse Par Seconde (PPS).

Les Lidars Velodyne HDL64e et VLP16, renvoient les données sous forme de paquets Ethernet ; chaque paquet est constitué de 12 blocs de données appelés *fire blocks* contenant eux-mêmes 32 tirs laser. Chaque paquet Ethernet comprend un champ *timeStamp*, qui représente le nombre de microsecondes depuis l'heure courante en temps universel coordonné (UTC). Pour cela le Lidar a besoin de connaître l'heure UTC. Cette information peut être reconstituée en lisant l'heure UTC fourni dans les trames du GPS (champ GPRMC de la trame NMEA) via la liaison série et en se recalant sur le signal de synchronisation PPS. Il faut se référer à la documentation du fabricant afin de respecter scrupuleusement le calage temporel entre le signal de synchronisation et le champ GPRMC fournissant l'heure. Ces différents échanges de données sont résumés sur la figure 2b.

D'un point de vue logiciel, le décodage des trames Ethernet est assuré par plusieurs composants comme décrit dans la Figure 4. Le Lidar nous fournit des données exprimées dans un repère sphérique (distance, azimut et hauteur du point mesuré).

- Décodage des trames UDP : conversion de chaque paquets Ethernet en 384 distances, 12 angles de rotation et une datation faite matériellement par le capteur (*hardware timeStamp* TS), plus précisément le nombre de  $\mu s$  depuis l'heure UTC courante.
- Conversion sphérique en cartésien : on utilise les données de calibration intrinsèque du Lidar pour convertir les impacts dans un repère cartésien XYZ, chaque point valide étant associé à un *TimeStamp*. Comme nous n'avons qu'un *TimeStamp* pour pour chaque paquet Ethernet, Velodyne fournit une table de correction de délais des tirs Lidar pour chaque position du *fire block*.
- Correction 3D de scan : le véhicule se déplaçant en même temps que le lidar fait ses acquisitions, les nuages de points résultants sont déformés par les mouvements du véhicule. Pour corriger ces déformations, nous avons étendu une méthode développée au laboratoire [5] aux mouvements 3D. Ce composant recalcule également les *TimeStamps* UTC en  $\mu s$ .

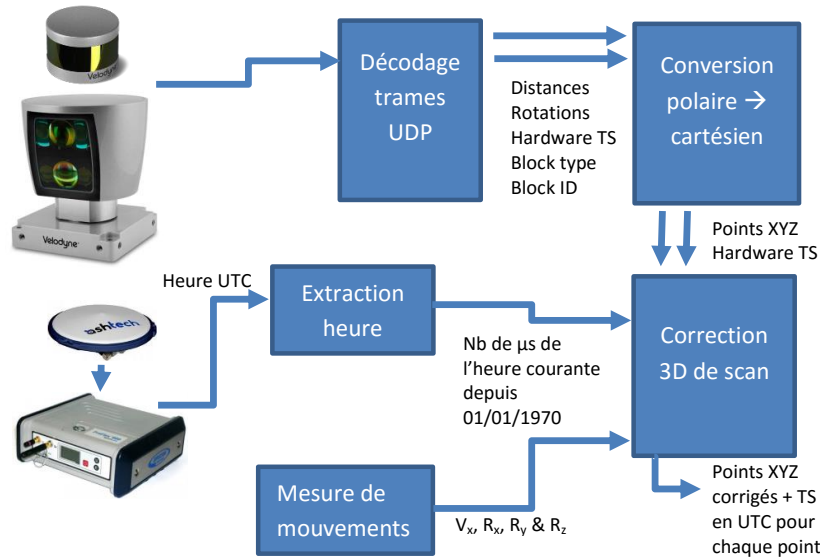


FIGURE 3 – Architecture des composants logiciels RTMaps développés pour l'acquisition et la datation des points Lidar

- Extraction heure : composant permettant d'extraire l'heure et la date courante depuis les trames RMC du GPS.
- Mesure de mouvements : le composant de Correction 3D des scans nécessite une mesure du mouvement du véhicule, dans notre cas la vitesse longitudinale  $V_x$  ainsi que les trois vitesses de rotation  $R_x$ ,  $R_y$  et  $R_z$  extraites à partir de la centrale inertielle.

### 3.3 Méthode mise en place pour la validation de la datation des impacts Lidar

Que ce soit d'un point de vue matériel ou logiciel, le système de synchronisation au complet est complexe. Dans cette section nous présentons la méthodologie que nous avons utilisée pour valider toutes les parties de la synchronisation.

L'expérimentation mise au point se décompose en deux étapes :

- la vérification de la précision et de la gigue (*jitter*) du signal PPS, puisque la qualité de notre mesure dépend de celui-ci,
- la validation effective de la datation des impacts Lidar.

Pour valider la précision et la gigue du signal PPS, nous avons choisi d'observer celui-ci à l'aide d'un oscilloscope. Cependant, la précision de l'horloge de référence de l'oscilloscope ne permet pas de mesurer une durée longue (ici une seconde) avec certitude. Pour pallier cette limitation, nous avons choisi de synchroniser l'appareil (SIGILENT SDS1102X) sur l'horloge de référence interne d'un synthétiseur de fréquence (R&S SMB100A). L'erreur de fréquence de l'horloge de référence du synthétiseur étant inférieure à  $10^{-7}$ , nous obtenons une erreur de mesure maximale de 100ns sur une période de 1s.

La figure 4 décrit l'architecture de l'expérimentation mise au point afin de valider la date des impacts Lidar. Nous utilisons une cible plane de petite dimension de manière à n'avoir qu'une nappe qui vient l'échantillonner. La cible est équipée d'une photodiode en son centre permettant de détecter l'impact laser du Lidar. Le signal de la photodiode est acquis par l'oscilloscope (SIGILENT SDS1102X) dont la sortie de *trigger* est envoyée dans une entrée *event Marker* de la centrale inertielle prévue pour dater des événements matériels (fronts montants ou descendants d'un signal) en heure UTC.

Nous obtenons d'un côté par notre chaîne décrite en section 3.2 la date des impacts Lidar dans la cible et d'un autre côté la date de l'impulsion de la photodiode. Le Lidar et la centrale inertielle étant synchronisés par le même signal PPS, nous devrions avoir une différence la plus faible possible. Afin de rendre le système automatisable, nous avons ajouté un traitement logiciel pour n'extraire que les impacts sur la cible des centaines de milliers de points par seconde acquis par le Lidar et fournir une moyenne des *TimeStamps* des points ayant impactés la cible.

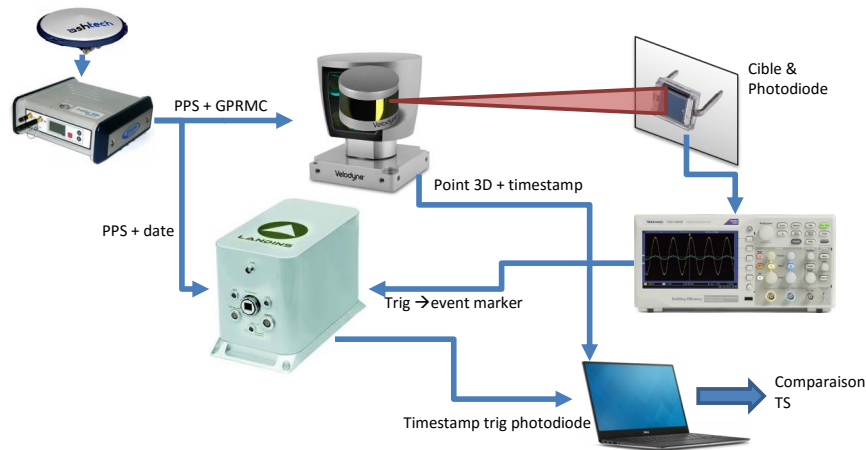


FIGURE 4 – *Synoptique de l'expérimentation de validation du datage des points Lidar. Les dates des points Lidars impactant la cible sont comparées à la date de l'impulsion de reçu sur la photodiode.*

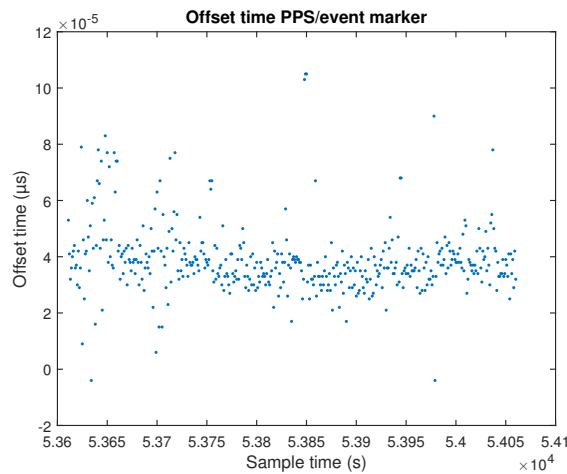


FIGURE 5 – *Erreur de datation de l'entrée event marker de la centrale inertielle IXSEA Landins*

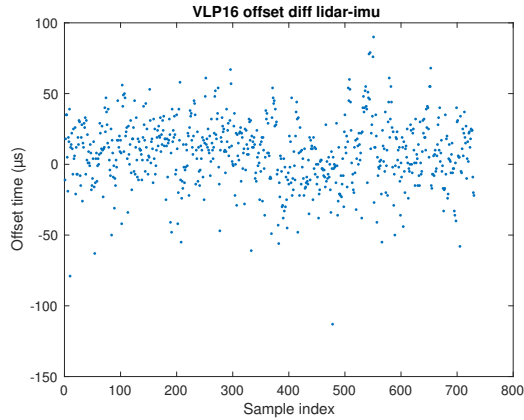
### 3.4 Résultats et discussion

La précision de la méthodologie de validation de la synchronisation (section 3.3) peut être affecté par deux points : le *jitter* du signal *PPS* issu du GPS et la précision de datation de l'entrée *event Marker* de la centrale. Pour ce qui est du *jitter* du signal *PPS*, nous l'avons mesuré avec l'oscilloscope et le synthétiseur de fréquence comme référence de fréquence externe. Le *jitter* est inférieur à la précision de mesure de l'appareil, soit 100ns. Pour la précision de la datation de l'entrée *event marker*, nous avons directement entré le signal *PPS* dans l'entrée *event marker*. Comme la centrale fait une datation en UTC, nous obtenons directement l'erreur de datation de l'entrée *event marker*. Ces résultats sont présentés sur la figure 4. L'erreur moyenne est de  $38.9\mu s$  et l'écart-type de  $12.4\mu s$ . Ces valeurs permettent de déterminer le bruit systématique que nous retrouverons dans l'étude de la synchronisation Lidar/Centrale Inertielle.

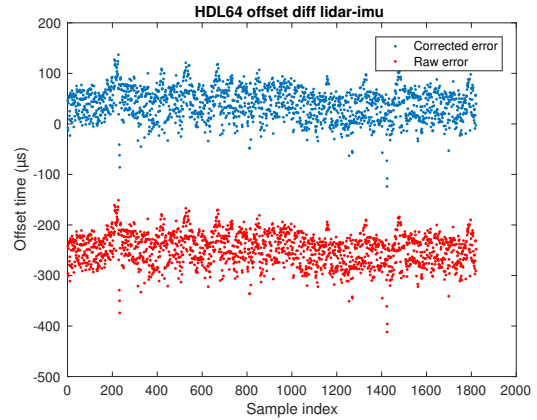
La figure 6 et le tableau 2 présente les résultats finaux de cette étude. Pour le VLP16, sachant que l'erreur de datation moyenne de l'entrée *event marker* est de  $38.9\mu s$ , une synchronisation à  $8.14\mu s$  est très correcte. Par contre, pour le HDL64, malgré nos efforts pour identifier un éventuel problème nous n'avons pas trouvé d'où venait la source d'erreur qui faisait que le Lidar était en avance d'environ un *fire block* sur la centrale inertielle. Nous avons donc fini par nous résoudre à ajouter logiciellement un offset de  $288\mu s$ , d'où la présentation d'un résultat brut et corrigé sur la figure 6b.

	VLP16	HDL64 brut	HDL64 corrigé
Moyenne	8.14	-248.7	39.3
Ecart type	23.3	32.2	32.2

TABLE 2 – *Précision finale de la synchronisation Lidar/IMU en ( $\mu s$ )*

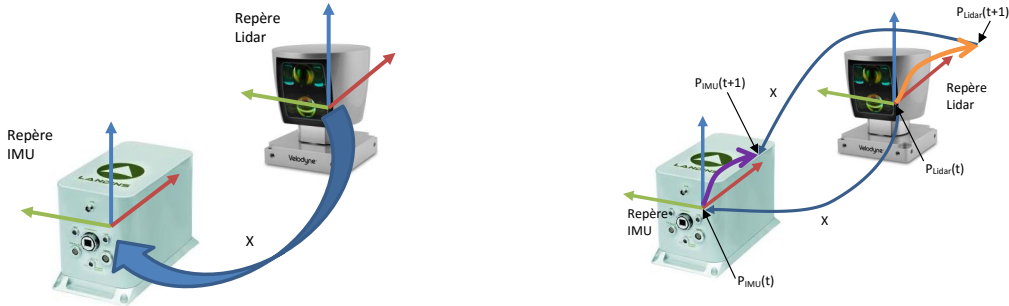


(a) VLP16



(b) HDL64e

FIGURE 6 – Différence de timestamp entre la moyenne des points 3D sur la cible et le front de la photodiode.



(a) Le calibrage extrinsèque consiste à déterminer la transformation  $X$ , permettant d'exprimer les points Lidar dans le repère de la centrale inertielle. Connaître  $X$  est nécessaire pour reprojeter des impacts Lidar géoréférencés.

(b) Handeye : la flèche violette représente le mouvement de la centrale inertielle  $I_t$  de  $t$  à  $t+1$ , et la flèche orange le mouvement du Lidar  $L_t$  pendant le même interval de temps. La centrale inertielle et le Lidar étant montés sur un support rigide, la transformation  $X$  peut être exprimée deux fois : en  $t$  et  $t+1$ .

FIGURE 7 – Calibrage extrinsèque Lidar/IMU par la méthode Handeye.

Nous avons déplacé la cible tout autour du lidar, nos résultats sont invariants au secteur angulaire.

En reprenant l'exemple de la section 3.1, soit un véhicule se déplaçant à une vitesse linéaire de 15m/s, l'erreur moyenne passe de 1.5m à 0.12mm dans le cas du VLP16 et à 0.35mm pour le HDL64. Pour une vitesse de rotation de  $25^\circ/s$ , l'erreur de projection d'un point mesuré à 50m du Lidar est réduite de 2.19m à 0.18mm pour le VLP16 et de 0.51mm pour le HDL64.

Notre méthode nous a permis de corriger pour le HDL64 une erreur de front sur le signal PPS du Lidar, et un décalage temporel de la trame RMC pour la bonne interprétation de l'heure par le Lidar, ainsi qu'une erreur de calcul de l'offset des tirs Lidar dans le composant *conversion sphérique vers cartésien* qui impactait les deux équipements (VLP16 et HDL64e).

## 4 Calibrage géométrique entre le Lidar et la centrale inertielle

### 4.1 Présentation du problème

Le calibrage extrinsèque consiste à estimer la pose relative entre le Lidar et l'IMU (cf Figure 7). La connaissance de cette transformation géométrique est indispensable pour fusionner les points 3D issus du Lidar entre deux poses. Les poses sont en effet fournies par la centrale inertielle, mais celle-ci n'a pas le même référentiel que le Lidar car ces deux éléments ne sont pas géométriquement confondus.

### 4.2 Revue des principales méthodes

Le problème de calibrage entre deux capteurs fournissant des poses dans des repères différents est connu sous le nom de *Handeye calibration*. Ce problème est apparu initialement dans la communauté robotique où une caméra ("eye") était montée sur l'extrémité du bras d'un robot industriel ("hand"). La caméra était calibrée en utilisant une mire de calibrage, il était par conséquent possible d'avoir la pose de la caméra par rapport à cette mire.

La pose de l'extrémité du bras dans le référentiel du robot était également connue en fonction des commandes envoyées à ce bras manipulateur. Il fallait par conséquent estimer simultanément les transformations entre la caméra et l'extrémité du bras, ainsi que la transformation entre les deux repères de référence (le repère associé à la mire et le repère associé au robot). Il y a eu de nombreuses recherches sur le sujet [6] [7] [8], et la plupart des méthodes proposées décomposent généralement le problème en deux étapes : la rotation est estimée dans un premier temps, puis la translation est optimisée.

Les solutions génériques au problème *Handeye* ne fonctionnent pas toujours dans le cas du véhicule se déplaçant dans un plan. Cela est dû au fait que la hauteur de la caméra et certains angles (roulis, tangage) sont dans ce cas inobservables. Des solutions spécifiques aux robots mobiles ou aux véhicules ont donc été proposées. Dans [9], les paramètres extrinsèques sont estimés pour un robot différentiel, cependant il est nécessaire de placer des amers connus dans la scène. Dans [10], ces amers ne sont pas nécessaires mais seulement trois degrés de liberté sont estimés. Nous avons choisi de travailler avec une solution générique, mais nous faisons attention lors de nos expérimentations à réaliser des trajectoires faisant varier tous les degrés de liberté, par exemple en montant deux des roues sur un trottoir ou un talus.

### 4.3 Implémentations de la méthode Handeye

Le calibrage extrinsèque par la méthode *Handeye* est basé sur l'existence d'une relation circulaire spatiale entre les différentes transformations (cf Figure 7b). Soient  $\mathbf{L}_t$  la transformation du Lidar entre les instants  $t$  et  $t + 1$ ,  $\mathbf{I}_t$  la transformation de la centrale inertielle entre ces deux mêmes instants, et  $\mathbf{X}$  la transformation rigide entre la centrale inertielle et le Lidar, si toutes ces transformations sont exprimées en coordonnées homogènes par des matrices  $4 \times 4$ , alors cette relation circulaire peut s'écrire :

$$\mathbf{L}_t \cdot \mathbf{X} \cdot \mathbf{I}_t^{-1} \cdot \mathbf{X}^{-1} = \mathbf{I}_4 \quad (1)$$

où  $\mathbf{I}_4$  est la matrice identité.

Nous avons implémenté et évalué deux méthodes différentes pour la résolution de ce problème. La première méthode, appelée "Handeye" dans la suite de ce papier, est la méthode linéaire proposée par l'INRIA dans [7]. La seconde solution est une optimisation non-linéaire pour résoudre l'équation (1) que nous avons implémenté grâce à la librairie Ceres [11]. Dans notre implémentation, les rotations sont exprimées grâce à la paramétrisation axe-angle (*axis-angle*). Cette paramétrisation permet d'éviter les problèmes de blocage de cardan et de stabilité numérique. Nous optimisons donc les paramètres de rotation et de translation pour minimiser l'erreur résiduelle constituée de deux critères :

- La norme de la translation résultante.
- La norme du vecteur de rotation (représentation axis-angle), c'est-à-dire l'angle solide.

Le principal avantage par rapport à la première méthode est de pouvoir fixer les paramètres que nous ne voudrions pas optimiser. Par exemple, la translation  $T_z$ , qui dans le cas des trajectoires de véhicule majoritairement dans le plan est difficile à estimer.

Après synchronisation des données de la centrale inertielle et Lidar, une pose de la centrale est interpolée pour chaque *timestamp* Lidar. Les mouvements de la centrale inertielle sont obtenus directement par différentiation des positions :  $I_t = (P_{imu_t}^{-1} \cdot P_{imu_{t+1}})^{-1}$ . Les mouvements du Lidar sont calculés par un algorithme ICP entre les deux nuages de points issus des instants  $t$  et  $t + 1$  [12]. Nous avons utilisé l'algorithme d'*Iterative Closest Point* (ICP) généralisé [13] réalisant une correspondance entre points et plans plus robuste que la version originale dans le cas des nuages de points peu denses.

### 4.4 Résultats et discussion

Nous avons commencé par générer des données de simulation, figure 8, avec une transformation Lidar/Centrale inertielle parfaitement connue afin de valider les deux méthodes. Les données de la centrale inertielle et de l'ICP étant bruitées, nous avons introduit un bruit équivalent dans les données simulées. La figure 9 présente le résultat de l'influence du bruit de rotation et de translation de mesure des mouvements sur l'estimation du calibrage. Ces données ont été obtenues avec la méthode *Ceres*, la génération des données et le calibrage sont exécutés 10 fois pour chaque cas de bruit de manière à calculer une moyenne et un écart-type par rapport au calibrage idéal. Nous pouvons noter que le bruit de rotation, du moins dans la plage de variation étudiée ( $0$  à  $0.8^\circ$ ) n'influence pas énormément les résultats. Le bruit de translation semble nettement plus impactant, il a une forte influence sur la précision et répétabilité du calibrage.

Nous avons également mené une étude sur la précision du calibrage en fonction du nombre d'échantillons de mouvement utilisés dans le calcul, figure 10. Comme nous pouvions nous y attendre avec des données bruitées, l'influence est importante. La dimension du bras de levier à calibrer ne semble pas influencer l'erreur absolue. L'erreur de translation sur le calibrage est proportionnelle au bruit de translation des mouvements.



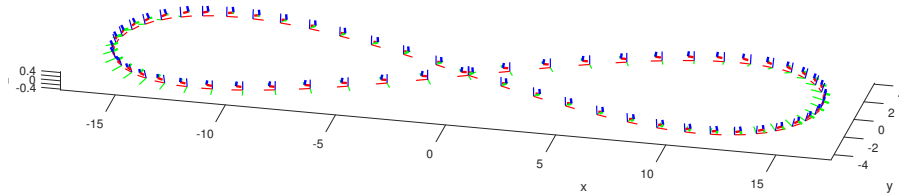


FIGURE 8 – Trajectoire en forme de huit générée en simulation. Grands trièdres : positions de la centrale inertielle, petits trièdres : positions Lidar. La simulation tient compte de la courbure de la trajectoire afin de générer des variations d'angle de roulis.

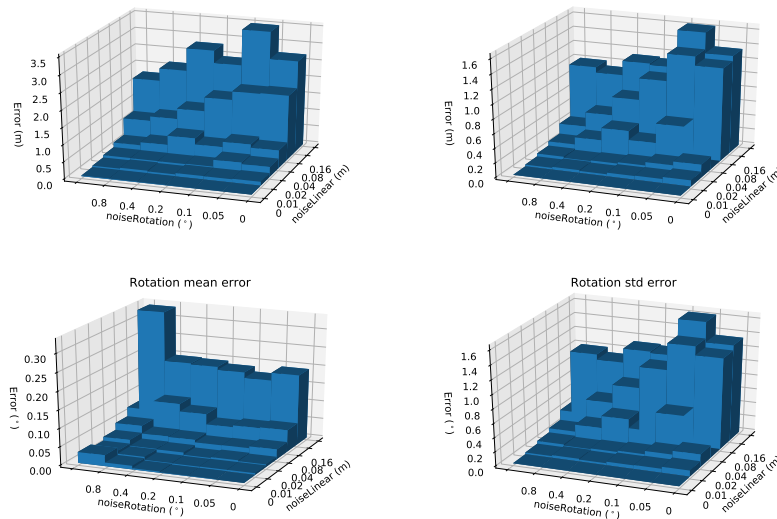
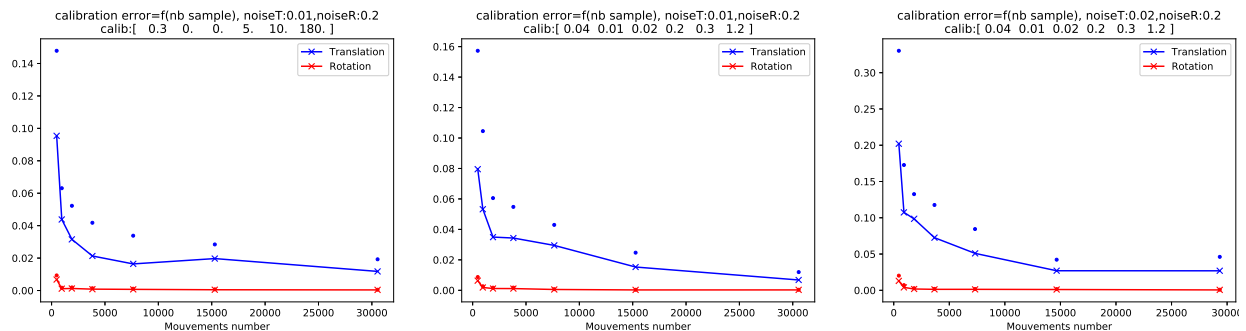


FIGURE 9 – Influence du bruit en translation et rotation, sur les résultats du calibrage. Ligne du haut, moyenne et écart type de la norme en translation de l'erreur de calibrage. Ligne du bas, moyenne et écart type de l'angle solide de l'erreur de calibrage.



(a)  $X$  à calibrer important  $T_x = 30\text{cm}$ , bruit de translation  $1\text{cm}$ , de rotation  $0.2^\circ$

(b)  $X$  à calibrer faible  $T_x = 4\text{cm}$ , bruit de translation  $1\text{cm}$ , de rotation  $0.2^\circ$

(c)  $X$  à calibrer faible  $T_x = 4\text{cm}$ , bruit de translation  $2\text{cm}$ , de rotation  $0.2^\circ$

FIGURE 10 – Étude de l'influence du nombre de mouvements utilisés pour le calibrage, pour 3 cas de calibrage et niveaux de bruit de translation. Traits pleins : erreurs en translation et rotation, points : écart type.

Dataset		Mécanique	Handeye	CERES	CERES $T_z = 0$
A	$T_{XYZ}$	(0 0 -0.08)	(-0.038 -0.027 0.246)	(-0.034 -0.027 0.101)	(-0.032 -0.028 0)
	$R_{XYZ}$	(0 0 0)	(0.023 -0.233 -0.139)	(0.0393 0.046 -0.749)	(0.034 0.045 -0.745)
	Nb mvts	-	1451	1623	1623
	Error	-	0.0123	0.0162	0.0162
B	$T_{XYZ}$	(0 0 -0.08)	(-0.072 0.015 0.286)	(-0.062 0.012 0.049)	(-0.061 0.021 0)
	$R_{XYZ}$	(0 0 0)	(0.099 -0.203 -2.52)	(0.028 0.076 -2.137)	(0.026 0.076 -2.136)
	Nb mvts	-	1853	2198	2198
	Error	-	0.0128	0.0168	0.0168
C	$T_{XYZ}$	(0 0 -0.08)	(-0.059 -0.023 0.008)	(-0.040 -0.015 -0.206)	(-0.045 -0.016 0)
	$R_{XYZ}$	(0 0 0)	(0.062 -0.239 -2.81)	(0.078 -0.029 -0.734)	(0.076 -0.026 -0.736)
	Nb mvts	-	1349	1585	1585
	Error	-	0.0155	0.0175	0.01175

TABLE 3 – Résultat de calibrage avec le HDL64e. mécanique : mesure manuelle de la transformation, Handeye : première méthode linéaire, CERES : méthode non linéaire, CERES  $T_z = 0$  : méthode non linéaire avec  $T_z$  fixée à 0. Translations en m, rotations en angles d'Euler ZXY °

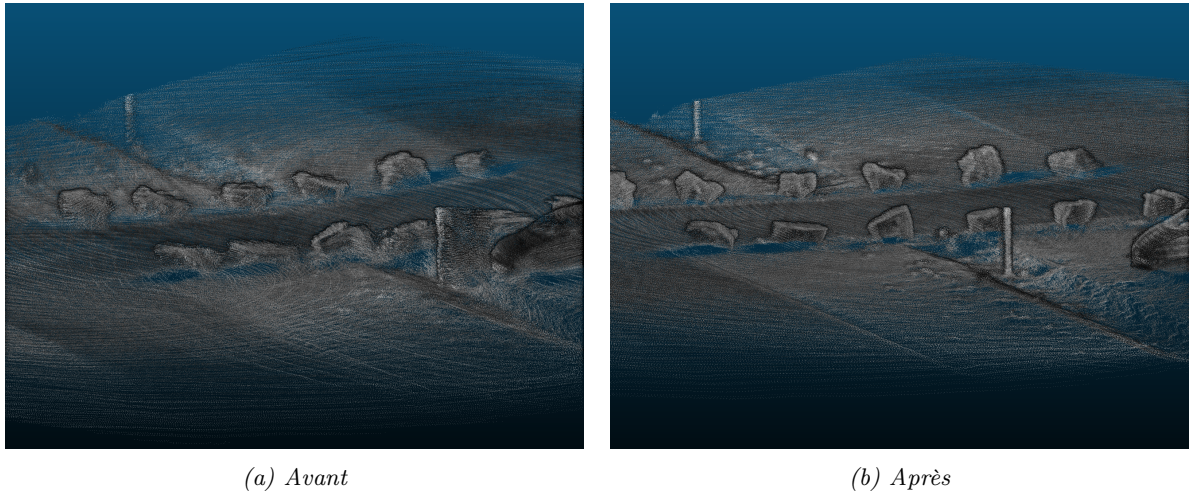


FIGURE 11 – Zoom sur une carte reconstruite à partir de notre coffre de toit, avant et après calibrage et correction de la synchronisation.

La table 3 présente les résultats sur des données réelles, obtenues avec notre coffre de toit (figure 1a et le Lidar Velodyne HDL64e. La colonne *Mécanique* représente la transformation recherchée obtenue par mesure manuelle. Les repères du Lidar et de la centrale inertielle sont presque confondus car nous utilisons cette mesure de la transformation comme donnée d'entrée du composant de correction 3D de scan (figure 3). Le bras de levier recherché par calibrage est donc faible. La ligne *Nb mvts* correspond au nombre de mouvements conservés dans le jeu de données pour effectuer le calibrage. La ligne *Error* est la moyenne de la norme de l'erreur de re-projection à partir de l'équation 1 après calibrage sur l'ensemble du jeu de données.

Actuellement nos jeux de données ne contiennent pas suffisamment de mouvements ce qui entraîne une forte variabilité des résultats de calibrage. Ce point a été mis en évidence en simulation comme montré précédemment (figure 10). Nous pouvons tout de même remarquer que  $T_z$  sera plus difficile à estimer car le véhicule se déplace majoritairement dans le plan.

## 5 Conclusions

Cet article a présenté les problèmes que posent la mise en correspondance de données Lidar avec un système de positionnement GPS-RTK. Cette question devient centrale de nos jours en particulier avec les développements pour le véhicule autonome qui exigent des précisions de perception et localisation inférieures au décimètre. Dans ce papier nous avons exposé les principaux points de passage pour mettre en oeuvre un système de reconstruction 3D à partir d'un Lidar 3D et d'un GPS-RTK combiné à une centrale inertielle. Comme nous l'avons présenté, la qualité de la reconstruction 3D ne dépend pas uniquement de la performance intrinsèque de chaque composant ; il est crucial de garantir une parfaite synchronisation des données et d'effectuer avec soin l'étape de calibrage extrinsèque entre le Lidar et la centrale inertielle. A partir des méthodes proposées dans la littérature, nous

avons mis en oeuvre un banc de test complet afin d'établir la performance globale de la chaîne d'acquisition. Les résultats de reconstruction 3D avant et après correction présentés sur la figure 11 montrent les gains possibles et l'importance de bien maîtriser ces deux étapes.

Plusieurs pistes d'amélioration restent à explorer :

- l'utilisation d'un boîtier de synchronisation matérielle pour réduire l'erreur de datation commise sur les signal issu de la photodiode ;
- la réalisation de jeux de données plus complets pour mener une étude de variabilité du calibrage similaire à ce que nous avons présenté en simulation.

## 6 Références

- [1] J. Levinson, J. Askeland, J. Becker, J. Dolson, D. Held, S. Kammel, J. Z. Kolter, D. Langer, O. Pink, V. Pratt, *et al.*, "Towards fully autonomous driving : Systems and algorithms," in *Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011 IEEE*, pp. 163–168, IEEE, 2011.
- [2] J. M. Anderson, K. Nidhi, K. D. Stanley, P. Sorensen, C. Samaras, and O. A. Oluwatola, *Autonomous vehicle technology : A guide for policymakers*. Rand Corporation, 2014.
- [3] R. W. Wolcott and R. M. Eustice, "Robust lidar localization using multiresolution gaussian mixture maps for autonomous driving," *The International Journal of Robotics Research*, vol. 36, no. 3, pp. 292–319, 2017.
- [4] P. Merriaux, Y. Dupuis, R. Boutteau, P. Vasseur, and X. Savatier, "Robust robot localization in a complex oil and gas industrial environment," *Journal of Field Robotics*, 2017.
- [5] P. Merriaux, Y. Dupuis, R. Boutteau, P. Vasseur, and X. Savatier, "Correction de nuages de points lidar embarqué sur véhicule pour la reconstruction d'environnement 3d vaste," (Clermont Ferand, France), RFIA, june 27-01 2016.
- [6] R. Tsai and R. Lenz, "Real time versatile robotics hand/eye calibration using 3d machine vision.," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 554–561, 1988.
- [7] R. Horaud and F. Dornaika, "Hand-eye calibration.," *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, vol. 14, no. 3, pp. 195–210, 1995.
- [8] K. Daniilidis, "Hand-eye calibration using dual quaternions.," *International Journal of Robotics Research (IJRR)*, vol. 18, no. 3, pp. 286–298, 1999.
- [9] G. Antonelli, F. Caccavale, F. Grossi, and A. Marino, "Simultaneous calibration of odometry and camera for a differential drive mobile robot.," in *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, (Anchorage, USA), pp. 5417–5422, May 2010.
- [10] A. Censi, A. Franchi, L. Marchionni, and G. Oriolo, "Simultaneous calibration of odometry and sensor parameters for mobile robots," *IEEE Transactions on Robotics*, vol. 29, no. 2, pp. 475–492, 2013.
- [11] S. Agarwal, K. Mierle, and Others, "Ceres solver." <http://ceres-solver.org>.
- [12] P. J. Besl and N. D. McKay, "Method for registration of 3-d shapes," in *Robotics-DL tentative*, pp. 586–606, International Society for Optics and Photonics, 1992.
- [13] A. Segal, D. Haehnel, and S. Thrun, "Generalized-icp.," in *Robotics : science and systems*, vol. 2, p. 435, 2009.