

Du drone LiDAR à un nuage de points précis et exact : une chaîne de traitement LiDAR adaptée et quasi automatique

■ Maxime LAFLEUR - Elliot MUGNER - Rabine KEYETIEU-NLOWE - Nicolas SEUBE

Le levé LiDAR présenté dans cet article a été effectué dans le cadre d'une mission d'évaluation de la chaîne de traitement mdInfinity, appliquée à des données acquises par un système drone LiDAR Microdrones. Les différents outils qui constituent cette chaîne de traitement ont été développés et intégrés sur la plateforme de traitement mdInfinity dans une version particulièrement adaptée

au système de levé utilisé pour cette mission. Le site utilisé pour cette évaluation est le barrage de Labrioulette (Haute-Garonne), infrastructure située sur la Garonne et exploitée par EDF. Cette zone contient de nombreux éléments sur lesquels la précision et l'exactitude des données LiDAR est primordiale afin d'obtenir un nuage de point exploitable ; notamment la complexité structurelle du barrage (figure 1), les zones sous couvert végétal dense, l'aire de transformation électrique, etc. Pour cette raison, en plus de confirmer la bonne interopérabilité des systèmes LiDAR Microdrones avec les outils de traitement mdInfinity, nous avons tiré profit de cette acquisition pour évaluer les performances de nos algorithmes.

Matériel de levé mis en œuvre

Pour ce levé, nous avons utilisé un drone LiDAR Microdrones mdLiDAR1000HR, embarquant un LiDAR de chez Velodyne (LiDAR multivoies permettant une acquisition à 360°) ainsi qu'une IMU-GNSS Applanix APX-15 pour le géoréférence-

ment. Le système comprend également une caméra de 5 Mpx dédiée à la colorisation du nuage de points, qui peut également servir à l'obtention de produits photogrammétriques. Il est bon de noter que cette charge utile a été conçue et construite par Microdrones spécifiquement pour être intégrée sur sa plateforme md4-1000 (figure 2).

MOTS-CLÉS

LiDAR, drone, boresight, ajustement des lignes, débruitage, points aberrants, colorisation, classification



Figure 2. Drone md4-1000 au barrage de Labrioulette.

Une fois combinés, ces deux éléments constituent un matériel de levé intégré extrêmement simple à opérer, puisque le drone et la charge utile communiquent entre eux durant l'acquisition. Cette simplicité d'utilisation est d'autant plus évidente lorsque ce matériel est associé à l'application de planification mdCockpit Android, elle aussi développée en interne chez Microdrones (en collaboration avec mdInfinity) et qui permet à la fois de gérer la trajectoire du drone et les opérations de la charge utile LiDAR.



Figure 1. Nuage de points LiDAR colorisé du barrage de Labrioulette.



Figure 3. Cible GCT hexagonale au barrage de Labrioulette.

Nous avons également déployé lors de cette mission une station de base Trimble, utilisée à la fois comme point pivot au post-traitement de la trajectoire, pour le recalage absolu du nuage de points et pour l'estimation de l'exactitude du levé. Cette station de base a été installée sur une GCT (*Ground Control Target*) hexagonale, composée d'une structure reliant six réflecteurs et d'un trépied (figure 3). Cette cible, fabriquée par mdInfinity est inspirée de travaux existants sur les GCTs LiDAR, tels que ceux décrits dans [Canavosio-Zuzelski, et al., 2013]. Grâce aux outils mdInfinity d'exploitation de GCT, cette cible pourra être automatiquement identifiée dans le nuage de points. On pourra ainsi comparer la position calculée du centre de la cible avec la position donnée par la station de base GNSS la surplombant.

Calibration préalable du système

Différentes sources d'erreurs systématiques peuvent affecter la qualité des données LiDAR. En se limitant aux erreurs d'intégration on y trouve : le désalignement entre le repère lié au Laser Scanner et l'IMU (*Inertial Measurement Unit* ou centrale à inertie), les bras de levier entre le centre optique du LiDAR et le point de référencement de positionnement, la latence entre le temps LiDAR et le temps IMU et GNSS. En général, la latence est bien maîtrisée, dès lors que la trame de temps GNSS est transmise aux différents capteurs (IMU et LiDAR) pour une datation dès le captage physique de la donnée (on parle de système LiDAR à temps distri-

bué). Les composantes du bras de levier sont aussi bien maîtrisées par les intégrateurs.

La seule source d'erreur systématique ayant un impact significatif sur des données d'un système LiDAR à temps distribué est donc les angles de désalignement entre le repère de la centrale inertielle et celui du LiDAR (angles de visée ou *boresight angles* en anglais). En général, le géoréférencement des données LiDAR s'effectue par l'application de l'équation suivante :

$$X_n = P_n + C_{bl}^n (C_{bs}^{bl} r_{bs} + a_{bl})$$

où, $P_n(t)$ est la position donnée par le GNSS dans un repère terrestre (n), C_{bl}^n est la matrice de changement de repère du repère IMU vers le repère (n) (qui dépend des angles d'attitude (φ, θ, ψ), respectivement, roulis, tangage et cap), r_{bs} est la mesure de distance du LiDAR exprimée dans le repère LiDAR (bs), a_{bl} est le bras de levier entre le centre optique du LiDAR et le point de référencement de positionnement, et C_{bs}^{bl} est la matrice de changement de repère entre le LiDAR et l'IMU (qui dépend des trois angles de visée ($\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi$)).

La calibration des angles de visée ($\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi$) est une opération essentielle et ne peut pas être faite rigoureusement par une méthode d'ajustement des lignes. En effet, une méthode d'ajustement des lignes corrige la position et l'attitude données par le système de positionnement GNSS-IMU afin de faire correspondre différentes lignes de levés. Calibrer le système en effectuant un ajustement de ligne revient donc à confondre $C_{bl}^n(\phi, \theta, \psi) \cdot C_{bs}^{bl}(\delta\phi, \delta\theta, \delta\psi)$ avec la matrice $C_{bl}^n(\phi + d\phi, \theta + d\theta, \psi + d\psi)$. Ces deux matrices sont différentes, car les 3 matrices élémentaires qui les composent ne commutent bien sûr

pas.

Il est donc important d'effectuer la calibration des angles de visée avec un outil spécifique et bien distinct d'une méthode d'ajustement des lignes. Nous avons effectué cette opération avec LIBAC (LiDAR IMU Boresight Automatic Calibration) [Seube et al., 2019] [US Patent 62/626.465]. Cette méthode permet de déterminer non seulement les angles de visée, mais également leur incertitude et une analyse de leur fiabilité. Elle nécessite seulement quelques lignes croisées ou parallèles au-dessus d'une pente régulière (toit) ou naturelle (colline). Sachant que nous n'aurions pas à proximité du barrage de zone propice, nous avons fait la calibration du système les jours précédant la mission.

Planification et exécution des levés

Le levé a été effectué sur deux installations EDF situées dans la zone du barrage de Labrioulette : le barrage en lui-même et la turbine située en aval au bout d'un court canal. Les deux zones ont été relevées dans la même journée, pour une durée totale de mission d'entre 4 et 5 heures, pour un temps de vol du drone avoisinant les 80 minutes. Dans un premier temps, nous avons scanné le barrage ainsi qu'une large zone en amont. L'objectif de ce premier levé était d'obtenir une modélisation 3D du barrage, en atteignant le plus d'endroits dissimulés possible. Par ailleurs, nous souhaitons également modéliser les berges et les éléments émergés situés en amont et en aval (arbres, roches, parements du canal, etc.).



Figure 4. Définition des zones de levé.

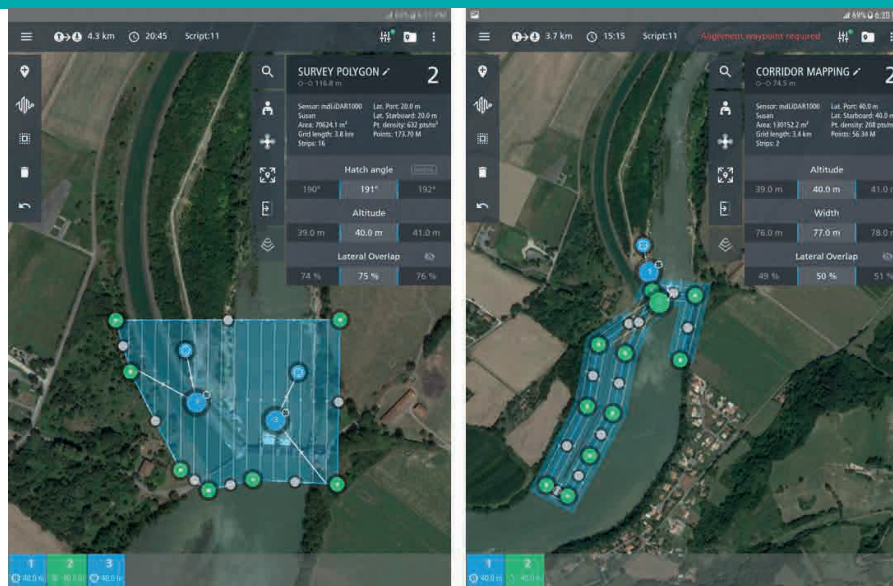


Figure 5. Planification du vol barrage. A/Gauche- levé classique sur barrage B/Droite levé linéaire sur berges.

Une fois cette première zone de levé définie, nous l'avons reportée dans l'application de planification mdCockpit, qui nous a suggéré un ensemble de lignes de levés, en tenant compte de la hauteur de vol que nous souhaitions (en lien avec le niveau d'incertitude souhaité) et le recouvrement entre les lignes requis pour permettre une bonne densité et plus tard un bon ajustement des lignes entre elles. Cet ensemble de lignes proposé par l'application, optimisé au sens du temps de vol, constitue le premier vol de la mission (figure 5-A). Nous avons également effectué un vol linéaire ciblant uniquement les berges et le barrage (figure 5-B), dans les mêmes conditions de hauteur de vol, de vitesse et de recouvrement que le précédent. Enfin, n'étant pas pleinement satisfaits de la couverture obtenue sur le barrage, que nous avons pu visualiser sur le terrain grâce aux outils de prévisualisation présents dans le logiciel mdInfinity, nous avons réalisé un troisième vol, manuel, à hauteur du barrage. En exploitant le champ de vision à 360° du LiDAR embarqué dans le mdLiDAR1000HR, ce vol nous permet d'acquérir des points dans les recoins de la structure qui n'étaient pas accessibles par une vue aérienne.

Sur la seconde zone levée lors de cette mission, uniquement deux vols ont été requis afin d'obtenir une bonne couverture. Un premier vol se concentrant sur la partie haute de la turbine, comprenant une portion de canal et le bâtiment ; suivi d'un second vol couvrant la partie basse (en bas de la chute) et une aire de transformation électrique.

Obtention d'un nuage de points précis et exact

La mise en œuvre de la chaîne de traitement mdInfinity débute sur le terrain, au travers des outils de contrôle qui permettent :

- la vérification de la qualité de la trajectoire ;
- l'obtention de la couverture du levé (afin de vérifier l'emprise combinée de tous les vols) ;
- la prévisualisation du nuage de points géoréférencé (pouvant conduire à une adaptation du plan de vol comme ce fut notre cas).

Mais de retour au bureau, l'essentiel du traitement des données est fait. Une fois que l'intégralité des données acquises par le drone et l'enregistrement de la

station de base ont été collectés, il suffit de se connecter à la plateforme en ligne mdInfinity ou d'ouvrir la version desktop de l'outil, pour débiter le traitement.

Nous allons présenter chacun des modules utilisés lors de la mission au barrage de Labrioulette en tant que brique élémentaire d'une chaîne de traitement pouvant être exécutée de manière quasi automatique. Nous décrivons dans cette partie l'ensemble de la chaîne de traitement nécessaire à l'obtention d'un nuage de points exempt d'erreurs systématiques, aléatoires et grossières. Pour les lecteurs qui souhaiteraient en apprendre plus sur le fonctionnement de tous les outils présentés dans cet article, des articles ciblés et détaillés sont disponibles sur le site Internet www.mdInfinity.com/papers/.

■ Géoréférencement

La première étape est de géoréférencer les données, c'est à dire de calculer des points dans un repère terrestre géocentrique ou géodésique local à partir des données brutes du LiDAR (angle distance), de l'IMU (attitudes) et du GNSS (positions). À ce stade, les données de calibration (latence éventuelle, bras de levier et angles de visée) interviennent de manière cruciale puisque c'est par une connaissance précise de ces valeurs que les erreurs systématiques sont éliminées. Ce géoréférencement est effectué à partir des données brutes du capteur LiDAR, qui

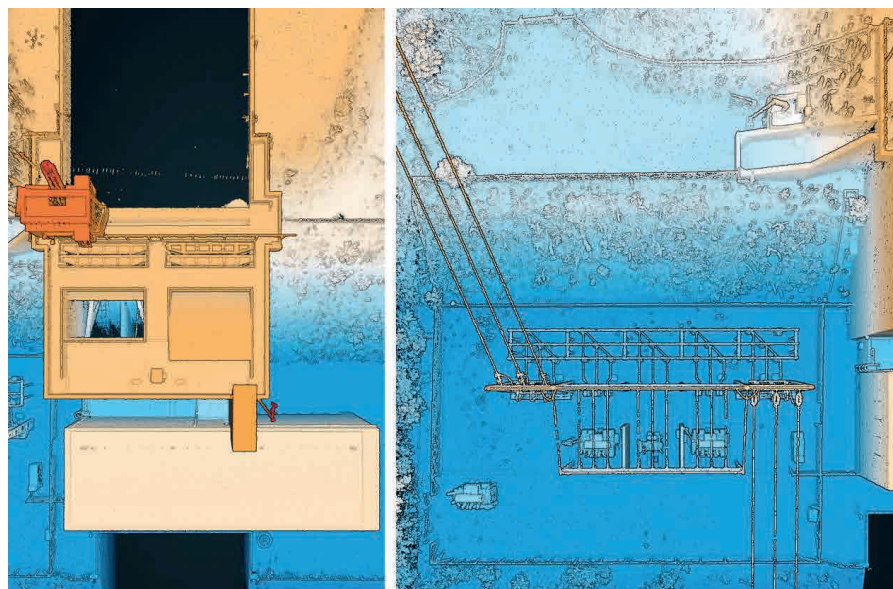


Figure 6. Nuage de points de turbine géoréférencé et colorisé.



ne nécessitent pas de traitement préalable, et des données de trajectoires collectées par l'IMU et le GNSS. Pour ces dernières, il peut être nécessaire d'effectuer un post-traitement visant à affiner la trajectoire. C'est ce que permet de faire le module de *Trajectory Processing* présent sur la plateforme mdInfinity.

Au cours de cette étape, au-delà de la position géoréférencée des points, nous estimons également un modèle d'erreur standard combinée (*Combined Standard Measurement Uncertainty*) sous la forme d'une matrice de covariance associée à chaque point LiDAR. En effet, la connaissance des points LiDAR n'est pas une fin en soi car ils sont en général beaucoup plus bruités qu'une mesure statique. Mais c'est leur redondance et des méthodes d'estimation statistiques qui vont nous permettre d'améliorer leur précision. Ces méthodes statistiques se comportent d'autant mieux qu'un modèle d'incertitude de chaque point est connu *a priori*.

■ Ajustement des lignes

La seconde phase du traitement est de s'assurer de la correction de toutes les erreurs systématiques qui seraient présentes dans le jeu de données. Pour ce qui est des erreurs systématiques liées à l'intégration, la maîtrise du système de levé permet de connaître de façon précise les différents bras de levier entre les capteurs utilisés. La synchronisation temporelle est aussi maîtrisée, car comme expliqué précédemment, il s'agit d'un système LiDAR distribué. Concernant les angles de visée, la phase de calibration permet l'estimation de ces paramètres. Il ne reste plus que les erreurs systématiques induites par les capteurs, soit par les données de capteurs. Il s'agit notamment des données de navigation et des données du LiDAR.

Les systèmes utilisés suivent un processus de validation qui permet, entre autres, de s'assurer de l'absence de toutes erreurs systématiques sur les données du LiDAR. Ce processus exige qu'avant une intégration dans une charge utile Microdrones, chaque LiDAR passe un test de validation en laboratoire. De ce fait, dans la chaîne de traitement, on considère que toute

erreur systématique résiduelle dans les données provient des données de navigation.

Compte tenu des contraintes de poids de la charge utile utilisée pour les drones, des systèmes de navigation miniaturisés à précision réduite sont utilisés pour obtenir la position et l'attitude du système de levé. Les erreurs de navigation (position, attitude) générées par l'IMU et le GNSS peuvent provoquer des biais entre les lignes de levé. Il s'agit majoritairement de biais de cap, donnée qui est la plus difficile à estimer pour les centrales inertielles miniaturisées équipant les drones. Dans une centrale inertielle telle que l'APX-15 (*Applanix Corp.*), les gyromètres et les accéléromètres ne sont pas de qualité suffisante pour permettre une estimation précise et exacte du cap. Le cap proviendrait plutôt d'une estimation basée sur l'historique des positions GNSS que d'un calcul inertiel pur.

Ces erreurs de navigation sont corrigées en utilisant le module *Strip Adjustment* de la plateforme mdInfinity. L'approche utilisée tout comme celle décrite dans [Gira, 2016] est une méthode basée sur le principe de l'algorithme ICP (*Iterative Closest Point*). L'ICP est un algorithme qui permet de recalculer deux vues partielles d'un même objet, une vue étant considérée ici comme un ensemble de points. Le principe de l'ajustement de lignes de mdInfinity repose sur la mise en correspondance des points, puis le rétablissement de la cohérence entre toutes les correspondances établies tout en estimant les erreurs de navigation correspondantes. Il s'agit d'un module facile d'utilisation car il nécessite très peu de paramètres ; des paramétrages préétablis sont adaptés selon le système utilisé ce qui facilite son utilisation.

La particularité de l'ajustement de ligne développé dans mdInfinity provient de la prise en compte d'un modèle d'incertitude complet dans l'ajustement des erreurs. Ceci permet d'accorder plus d'importance aux observations de bonne qualité. Cet outil permet donc d'avoir une précision accrue pour l'estimation des erreurs de navigation. Différents modes d'ajustement absolu sont proposés pour réaliser le recalage du jeu de données sur des données de

référence, ce qui permet de s'adapter à toute forme d'erreur de navigation.

■ Débruitage

Une fois que le nuage de points a été nettoyé de toutes les erreurs systématiques et de navigation, nous pouvons éliminer les erreurs aléatoires (bruit). Chaque composant du système de levé est caractérisé par son niveau d'incertitude. Une fois combinées, toutes ces incertitudes forment la CSMU (*Combined Standard Measurement Uncertainty*), qui n'est rien d'autre que l'incertitude globale du système. En pratique, cette incertitude se matérialise par une épaisseur plus ou moins importante du nuage de points ; plus la CSMU est élevée plus le tapis de points est épais. Sachant que cette épaisseur peut-être un facteur de perte en performance pour nombre d'outils de traitement et d'analyse de nuage de points, il est souhaitable de le réduire au maximum. C'est ce que permet de faire l'outil mdInfinity de débruitage de nuage de points.

Le débruitage est particulièrement important pour des LiDAR miniatures tels que ceux qui sont embarqués dans des drones légers. En effet, ces matériels ont généralement des niveaux de bruit assez forts au niveau du retour de distance, souvent dû au fait que l'intensité reçue est d'un niveau assez faible ce qui perturbe les algorithmes de détection de la distance effective.

Comme pour les outils décrits précédemment, notre outil d'amélioration de la précision (*Precision Enhancement* dans la plateforme mdInfinity), décrit plus amplement dans [Mugner et al. 2019], prend en compte à la fois la connaissance :

- *a priori* du système de levé utilisé lors de la mission ;
- *a posteriori* de l'historique d'acquisition de chaque point.

Autrement dit, en associant notre maîtrise matérielle du drone et de la charge utile à nos outils avancés de modélisation de l'incertitude [Seube, 2020], nous sommes en mesure de déterminer une position débruitée pour chaque point. Cette position débruitée est obtenue par une approche à la fois géométrique et probabiliste, et peut être assimilée à "la position la plus probable

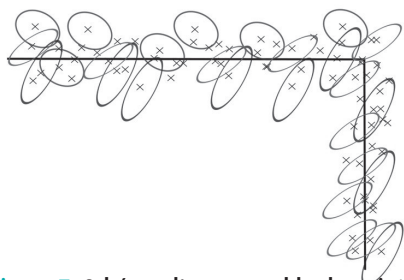


Figure 7. Schéma d'un ensemble de points et leur CSMU représentée en 2D par une ellipse d'incertitude à 95 pourcent.

d'un point d'après la physique de son acquisition".

Dans notre approche, comme dans d'autres méthodes de débruitage de nuage de points ([Digne, 2017] ou [Gao, 2000]), on retrouve l'usage d'un filtre bilatéral. Toutefois, l'outil de débruitage mdInfinity se démarque par le fait que la pondération est faite en combinant à la fois des considérations géométriques et probabilistes. Ces considérations permettent, en favorisant le respect de la manière dont chaque point a été acquis, d'obtenir un nuage de points débruité dans lequel la morphologie du terrain et les éléments structurels ne sont pas impactés (*figure 7*). Il est également bon de noter que l'usage de cet outil n'introduit pas de biais sur l'exactitude du nuage de points.

L'algorithme est intégré dans la plateforme mdInfinity accompagné de jeux de paramètres pré choisis en fonction du matériel de levé utilisé. De cette manière, le travail de l'utilisateur se concentre davantage sur le choix des paramètres permettant de moduler le résultat à son usage, que sur la détermination de paramètres adaptés à son matériel.

Appliqué sur le nuage de points géoréférencé du barrage de Labrioulette, l'outil a permis une amélioration de la précision d'environ 75 %. Cela signifie que, sur la surface verticale du barrage par exemple, on passe d'une précision relative à 1σ de 4 cm à 0.95 cm. Cette amélioration est du même ordre sur d'autres types de surfaces, tels que le sol goudronné de la route menant au barrage ou les parements du canal. Pour les éléments pour lesquels l'outil n'est pas en mesure de déterminer une position débruitée des points avec un niveau de confiance suffisant, par exemple les zones de faible densité sous le couvert végétal ou les petits éléments de l'air

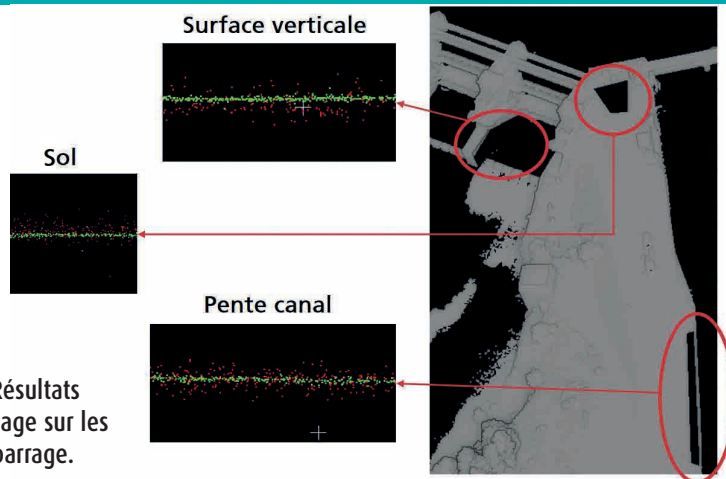


Figure 8. Résultats du débruitage sur les zones de barrage.

de transformation électrique décrits par peu de points, nous faisons le choix de ne pas corriger la position des points (parce qu'il vaut mieux un nuage de points bruité qu'un nuage de points déformé par un traitement erroné !). La *figure 8* illustre le résultat du débruitage sur plusieurs types de surfaces situées dans la zone du barrage.

■ Élimination des points aberrants

L'outil d'amélioration de la précision décrit dans le paragraphe précédent s'attaque également à l'élimination des points aberrants, pour lesquels il n'existe aucune position probable qui soit cohérente avec la structure morphologique décrite par leurs points voisins.

Nous avons basé notre approche de détection de points aberrants sur une définition originale : un point aberrant est géométriquement isolé de ses plus proches voisins, dans le sens où il ne partage pas les mêmes propriétés géométriques (comme la densité locale par exemple), et morphologiquement isolé de ces mêmes voisins. En effet, lorsque l'on s'attaque à un nuage de points acquis au moyen d'un système drone LiDAR (comme ce fut notre cas lors de cette mission), le simple fait d'être géométriquement isolé ne paraît pas suffisant pour justifier l'élimination d'un point du nuage, tant la densité du nuage varie au gré de la dynamique du porteur.

Partant de cette définition, nous avons donc mis au point une méthode de détection de points aberrants combinant une approche classique comparable à celle décrite dans [Kriegl, 2009] et une méthode originale d'estimation de la cohérence morphologique d'un point avec son environnement. Ces deux algorithmes fournissent des résultats

sous forme d'une probabilité ; on peut donc assimiler le résultat du premier à la probabilité qu'un point soit aberrant au sens de l'isolement géométrique (LoOP), et le résultat du second à la probabilité qu'un point soit aberrant au sens de l'isolement morphologique (MOP).

La combinaison de ces deux probabilités en une seule, que nous avons intitulée *Combined Outlying Probability* (COP), permet d'identifier les points aberrants qui doivent être éliminés. Le LoOP est un excellent détecteur de points isolés géométriquement, mais génère un haut ratio de faux positifs. À l'inverse, le MOP offre un très bon taux de vrais positifs sur les outliers morphologiques, mais montre un nombre non négligeable de faux négatifs, presque exclusivement des points très isolés géométriquement. Leur association forme donc un indicateur fiable de points aberrants, où le MOP vient affiner les résultats trop stricts du LoOP.

Le système LiDAR embarqué dans la charge utile mdLiDAR1000HR générant une certaine quantité d'*outliers* (ou valeurs aberrantes) dans la colonne d'air et à proximité des surfaces à faible réflectance, cette étape est primordiale pour pouvoir par la suite générer de bons produits à partir du nuage de points.

Analyse de l'exactitude et de la précision

Grâce à l'implantation de cibles de contrôle au sol, *Ground Control Target* (GCT), présentées dans le chapitre consacré au matériel utilisé lors de cette mission, nous pouvons effectuer une analyse de l'exactitude du nuage de points obtenu à l'issue de la chaîne de traitement mdInfinity.



Cette analyse se base sur la comparaison entre la position du point de contrôle au sol *Ground Control Point* (GCP) tel que définie par le récepteur GNSS installé sur la cible et celle déterminée à partir du nuage de points. En effet, grâce à la géométrie particulière de notre cible (forme hexagonale) nous avons pu développer un outil totalement automatique d'identification de celle-ci dans le nuage de points et de détermination de la position du point de contrôle à partir des points obtenus sur les réflecteurs (figure 9). Cette procédure d'exploitation de GCP totalement automatisée évite la désignation manuelle par un opérateur et les éventuelles erreurs qui en découlent.

Appliqué à la mission de Labrioulette, cet outil a permis d'estimer l'exactitude du levé et surtout de confirmer l'adéquation entre cette exactitude a posteriori et les spécifications annoncées par Microdrones pour le système mdLiDAR1000HR. Les résultats obtenus sur les deux vols sont résumés dans le tableau ci-dessous (figure 10).

Pour obtenir l'exactitude d'un levé il est possible de placer plusieurs cibles sur des GCP. Une autre cible mdInfinity, se présentant sous la forme de deux chaînes, a également été mise au point et brevetée. Le centre des deux chaînes est calculé par intersection de deux modèles de chaînes, préalablement segmentées (figure 9).



Figure 9. Cible chaînette.

	X	Y	Z
SD de l'estimation du centre de la cible	0.4 cm	0.4 cm	0.35 cm
Exactitude Vol Barrage	1.9 cm	-3.9 cm	-4.4 cm
Exactitude Vol Turbine	2.8 cm	-3.7 cm	-5.1 cm

Figure 10. Table récapitulative de l'analyse d'exactitude. Les coordonnées du GCP et la position calculée à partir du nuage de points sont exprimées en ITRF2014 (époque des observations) et projetées en UTM31N.



Figure 11. Nuage de points LiDAR de turbine colorisé.

Quelques produits obtenus à partir du nuage de points

Au-delà des outils permettant d'obtenir un nuage de points précis et exact à partir de données acquises par un système drone LiDAR, la suite de traitement mdInfinity comprend également un certain nombre d'outils permettant la génération de produits à partir du nuage de points. Parmi eux, les deux outils qui ont été utilisés lors de ce levé au barrage de Labrioulette : la colorisation directe du nuage de points et la classification des points de sol.

■ Colorisation directe

Bien que les nuages de points générés à partir de données LiDAR acquises par drone modélisent avec précision et exactitude le milieu scanné, il peut parfois être difficile d'y identifier certains éléments ; en particulier lorsque ces éléments ne se démarquent

pas géométriquement de leur environnement. Pour ces raisons, il est souhaitable de pouvoir coloriser les nuages de points LiDAR.

La charge utile mdLiDAR1000HR, tout comme les autres charges utiles proposées par Microdrones, est équipée d'une caméra pouvant être utilisée pour la colorisation des nuages de points.

La méthode de colorisation que nous avons imaginée pour mdInfinity se démarque de celles proposées dans d'autres outils de traitement de trois manières. Premièrement, il s'agit d'une méthode de colorisation directe. La méthode directe est de plus en plus considérée par les logiciels existants pour la colorisation du nuage de points. Elle permet de s'abstraire des problèmes liés à une projection perspective qui génère notamment des phénomènes de double cartographie (des objets vus en double). Deuxièmement, elle utilise une approche de détection d'occlusion unique, ce qui lui permet de se démarquer de toutes les autres méthodes de colorisation. Cette méthode d'occlusion travaille directement sur les nuages de points et le principe est de projeter les points dans un espace où l'extraction des points occlus se fait de façon directe. Enfin, la colorisation de mdInfinity intègre une méthode qui permet de corriger le désalignement angulaire entre le LiDAR et la caméra et



Figure 12. Nuage de points LiDAR de bord de canal colorisé.

d'estimer simultanément les paramètres de la caméra. C'est une étape primordiale, car elle a un impact considérable sur la qualité de la colorisation. Tout ceci permet donc à la colorisation de mdInfinity de générer des résultats de très bonne qualité.

Le taux de recouvrement recommandé pour la colorisation d'un nuage de points LiDAR est moins important que pour une acquisition photogrammétrique. De plus, les approches directes de colorisation sont rapides par rapport à un processus photogrammétrique. Ces performances sont améliorées dans mdInfinity grâce notamment à la maîtrise des systèmes utilisés qui permet de faire des optimisations nécessaires.

Dans le cadre de la mission à Labrioulette, les avantages de notre méthode de colorisation se sont notamment manifestés lors du traitement de la zone de la turbine. En effet, comme le montrent les *figures 11 et 12*, cette zone comprend de nombreuses lignes électriques, sur lesquelles la gestion de l'occlusion ainsi que notre maîtrise des angles de visée du LiDAR et de la caméra permet d'avoir une colorisation fidèle. Une autre méthode aurait sans doute pu attribuer au sol la couleur des câbles, ou inversement.

■ Classification des points de sol

Afin d'obtenir la description topographique du terrain, il est nécessaire d'avoir une bonne description morphologique du sol nu, c'est-à-dire dépourvu de toute infrastructure ou de végétation. Dans un nuage de points LiDAR, ce sol nu est représenté par les points issus de faisceaux LiDAR qui ont atteint le sol. Pour le reconstituer, il est donc nécessaire d'extraire ces points du reste du nuage.

Plusieurs outils permettant de classifier les nuages de points LiDAR en points de sol et points de non-sol sont disponibles. Certains d'entre eux sont inspirés de la méthode décrite dans [Axelsson, 2000], qui a depuis été déclinée en de nombreuses variations dont le principe majeur reste la densification itérative d'une triangulation construite à partir de points de sol uniquement. Initialisée sur un ensemble de points germes, considérés a priori comme des points de sol, cette triangulation est progressivement densifiée en ajoutant un ou plusieurs points dans chaque facette à chaque itération, s'ils satisfont un ensemble de critères géométriques.

La clé pour faire fonctionner ce genre de méthodes, est d'avoir une initialisation irréprochable de la triangulation. L'outil de classification de sol que nous avons développé pour la plateforme mdInfinity fait également appel à une densification de TIN (*Triangulated Irregular Network*), mais cette étape ne sert que pour la finalisation de la classification. Elle est précédée d'un algorithme d'obtention de points germes couvrant l'intégralité du nuage de points et d'une routine de segmentation par croissance de région permettant la multiplication de chaque point germe en un premier ensemble

de points de sol qui servira à initialiser la triangulation de manière plus robuste. Grâce à l'attention qui est portée sur la constitution d'un groupe de points de sol suffisamment complet pour initialiser correctement la triangulation, notre outil est capable de classifier avec justesse des scènes difficiles telles que des zones montagneuses escarpées où les autres outils disponibles sur le marché montrent parfois quelques limites. Notre outil, grâce à la densification finale, est également capable de classifier tous les points de sol dans les zones denses ou les points de sol isolés sous un couvert végétal. Toutes ces caractéristiques furent particulièrement utiles lors du traitement du nuage de points acquis à Labrioulette, car la zone contient à la fois des reliefs escarpés et des berges sous couvert végétal épais (*figure 13*).

Conclusion

L'objectif de cette journée d'acquisition au barrage de Labrioulette était d'observer avec quelle facilité la chaîne de traitement mdInfinity peut être utilisée afin d'effectuer le traitement intégral d'un levé LiDAR réalisé au moyen d'un système Microdrones mdLiDAR1000HR, et de tirer autant d'enseignements que possible concernant l'intégration de nos algorithmes de traitement dans la plateforme mdInfinity.

En ce qui concerne les éléments mis en œuvre avant et sur le terrain, la première conclusion est que nos outils destinés à préparer le levé et en particulier celui de calibration des angles de visée, permettent à l'opérateur d'arriver sur le terrain dans les meilleures conditions possibles. Ensuite, nos modules de contrôle de la trajectoire et de prévisualisation

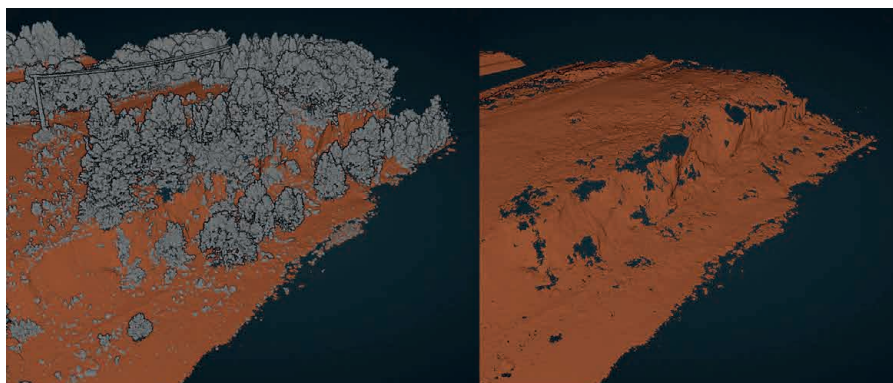


Figure 13. Résultat de classification de sol sur les berges de l'aval barrage.



du nuage de points géoréférencé nous ont effectivement permis de rentrer au bureau avec des données de qualité, couvrant convenablement l'intégralité des zones que nous souhaitions relever (y compris l'intérieur du barrage pour lequel nous avons rajouté un vol).

De retour au bureau, nous avons pu apprécier l'efficacité de la solution mdInfinity pour le traitement des données Microdrones dès l'étape de post-traitement des données de trajectoire, pour laquelle aucun logiciel externe n'est requis. Puis, l'enchaînement quasi automatique des modules de géoréférencement, d'ajustement de lignes et d'amélioration de la précision nous a permis d'obtenir rapidement un nuage de points géoréférencé exempt de toute erreur systématique et grossière, et avec un niveau d'erreur aléatoire plus que satisfaisant considérant les spécifications du LiDAR Velodyne embarqué dans le drone. L'exactitude de ce nuage de points a ensuite pu être contrôlée grâce à la cible hexagonale installée durant le levé et son logiciel associé. Cette opération a été faite très simplement, sans avoir besoin de rechercher ou de désigner le point de contrôle dans le nuage de points, évitant de possibles erreurs humaines.

Enfin, nous avons utilisé et évalué les performances des deux modules les plus récemment ajoutés à la plateforme mdInfinity : la colorisation directe et la classification du sol. Chacun de ces deux modules, une fois paramétré correctement pour convenir au système mdLiDAR1000HR, a offert des résultats satisfaisants.

Nous avons donc appris de cette mission que toute la partie de la chaîne de traitement mdInfinity consacrée à l'obtention d'un nuage de points précis et exact est aujourd'hui entièrement fonctionnelle (et pratique) et que les premiers outils destinés à la génération de produits donnent déjà de bons résultats.

Remerciements

Le site du barrage de la Brioulette nous a été rendu accessible grâce à Morgann Le Devehat et à Thomas Touzé, tous deux chargés d'affaire à la Cellule bathymétrie d'EDF-DTG. Nous les remercions pour

leur disponibilité et surtout pour leur intérêt qui a motivé ce travail.

Contacts

Maxime LAFLEUR - Elliot MUGNER

Rabine KEYETIEU-NLOWE

Nicolas SEUBE Directeur R&D
nicolas.seube@mdinfinity.com
mdInfinity France

Bibliographie

- [Gao, 2000] Z. Gao and U. Neumann. "Feature enhancing aerial lidar point cloud refinement", In Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., volume XXVII-B1, pages 456-469, 2000.
- [Axelsson, 2000] P. Axelsson. "Dem generation from laser scanner data using adaptive tin model", In Int. Archives of Photogram. Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B4, 2000.
- [Filin et al., 2004] Filin, S., Vosselman, G., 2004. Adjustment of airborne laser altimetry strips. In: ISPRS Congress Istanbul, Proceedings of Commission III.
- [Glennie, 2007] Glennie, C., 2007. *Rigorous 3d error analysis of kinematic scanning lidar systems*. Journal of Applied Geodesy 1, 147-157.
- [Kriegel, 2009] H-P. Kriegel, P. Kroger, E. Schubert, and A. Zimek. "Loop: Local outlier probabilities", In CIKM '09: Proceedings of the 18th ACM conference on Information and knowledge management, pages 1649-1652, November 2009.
- [Kumari et al., 2011] Kumari, P., Carter, W. E., Shrestha, R. L., 2011. Adjustment of systematic errors in ALS data through surface matching. Advances in Space Research 47, 1851-1864.
- [Seube et al., 2012] Seube, N, Picard, A. and Rondeau, M., 2012. A simple method to recover the latency time of tactical grade IMU systems, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 74 (2012) 85-89.
- [Canavosio-Zuzelski et al., 2013] Canavosio-Zuzelski, R., Hogarty, J., Rodarmel, C., Lee, M., Braun, A. (2013): *Assessing LiDAR Accuracy with Hexagonal Retro-Reflective Targets*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol 79, No 7, pp663-670.
- [LeDeunf, 2015] LeDeunf, J., 2015. *Data selection for a boresight estimation algorithm*, Master thesis report, UNH/CIDCO/ENSTA Bretagne, Sept 2015.
- [Seube et al., 2015] N. Seube, S. Levilly, R. Keyetieu-Nlowe, "Automatic 3D Boresight and Latency Estimation of IMU and Multi-Beam Echo-Sounder Systems", Proc. of the

USHYDRO 15 Conf, 16-19 March, Washington DC, USA

[Gira, 2016] Gira, P. et al., 2016. *Rigorous Strip Adjustment of UAV-Based Laserscanning Data Including Time-Dependent Correction of Trajectory Errors*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 82. 945-954.

[Digne, 2017] J. Digne, C. De Franchis. "The bilateral filter for point clouds", Image processing on-line, 2017.

[Mugner et al., 2019] E. Mugner, N. Seube "Denoising of 3D point clouds", Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W17, 217-224, 2019, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W17-217-2019>.

[Seube et al., 2019] R. Keyetieu, N. Seube, "Automatic Data Selection and Boresight Adjustment of LiDAR Systems", Remote Sens. 2019, 11, 1087 <https://doi.org/10.3390/rs11091087>.

[US Patent 62/626.465] "Method and apparatus for automatic calibration of mobile LiDAR systems", 2020.

[Seube, 2020] Seube, N. "Validation of LiDAR survey data by comparison of several uncertainty models", ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XLIII-B3-2020. 1385-1390. [10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1385-2020](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-1385-2020), 2020

ABSTRACT

The LiDAR survey presented in this article was carried out as part of a mission to assess the mdInfinity processing chain, applied to data acquired by a LiDAR Microdrones drone system. The various tools that make up this processing chain have been developed and integrated on the mdInfinity processing platform in a version particularly suited to the survey system used for this mission. The site used for this assessment is the Labrioulette dam (Haute-Garonne, France), an infrastructure located on the Garonne and operated by EDF. This area contains many elements where the precision and accuracy of LiDAR data is essential in order to obtain an actionable point cloud; in particular the structural complexity of the dam, the areas under dense vegetation cover, the electrical transformation area, etc. For this reason, in addition to confirming the good interoperability of the LiDAR Microdrones systems with the mdInfinity processing tools, we have taken advantage of this acquisition to evaluate the performance of our algorithms.