



Études de la précision altimétrique (nuage de points) des géo-écosystèmes littoraux via la photogrammétrie et la lasergrammétrie par drone aérien

Dorothee JAMES¹, Antoine COLLIN¹, Régis GALLON², Emmanuel POIZOT²

1. Centre de GéoÉcologie Littorale, École Pratique des Hautes Études, Université PSL, 15 boulevard de la mer 35800 Dinard, France.

dorothee.james@ephe.psl.eu

2. Conservatoire National des Arts et Métiers, Intechmer, 50100 Cherbourg-En-Cotentin, France.

Résumé :

Les relevés aériens rendent plus aisées les études de l'altimétrie littorale en couvrant de vastes étendues. Les capteurs actifs topographiques comme le *LiDAR* (*Light Detection And Ranging*) permettent de détecter finement les micro-topographies littorales.

Ce projet de recherche se focalise sur l'évaluation des méthodes de reconstruction par photogrammétrie et par lasergrammétrie. Il vise à évaluer la précision des nuages de points issus de la photogrammétrie passive, de la lasergrammétrie active et de la combinaison des deux, en fonction de la nature de l'occupation du sol.

Le drone DJI Matrice 300 - RTK équipé d'un capteur *LiDAR* L1 doté d'une caméra Rouge-Vert-Bleu (20 M-p) a été connecté au réseau *RTK* Teria pour assurer un positionnement horizontal et vertical centimétrique en temps réel. A partir des cibles géoréférencées grâce à un GNSS RTK, les méthodes de reconstructions de l'altimétrie (photogrammétrie, lasergrammétrie, et fusion photogrammétrie + lasergrammétrie) ont été évaluées d'un point de vue de la densité de points puis de la précision verticale (*Z*) entre eux, à l'échelle paysagère du site (0,3 km²), et aussi, à l'échelle des géo-écosystèmes présents sur le site.

La densité de points est manifestement supérieure pour les nuages de points issus de la photogrammétrie, de la lasergrammétrie et de la fusion photogrammétrie + lasergrammétrie par drone par rapport au nuage de points avion (104 M, 167 M, 242 M et 3 M, respectivement). Les analyses de la précision altimétriques entre les nuages de points et les cibles géoréférencées affichent une *RMSE* de 0,16 m (photogrammétrie), de 0,07 m (lasergrammétrie) et 0,08 m (fusion). A l'échelle des géo-écosystèmes, la densité de points est nettement augmentée pour le nuage de points issus de la fusion.

Mots-clés :

LiDAR, Drone, Photogrammétrie, Lasergrammétrie, Voxel.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

1. Introduction

1.1 Contexte

Les levés aériens ou l'imagerie satellite jouent un rôle crucial dans l'avancement du domaine de l'altimétrie côtière en raison de leur capacité à couvrir efficacement de vastes zones (JAMES *et al.*, 2022). Ces levés fournissent des données précieuses qui peuvent être utilisées pour étudier et comprendre la micro-topographie côtière de manière plus détaillée. L'un des capteurs topographiques actifs couramment utilisés dans les levés aériens est le *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*). La technologie *LiDAR* utilise des impulsions laser pour mesurer la distance entre le capteur et la surface de la Terre, ce qui permet de cartographier avec précision les caractéristiques côtières pour mieux comprendre la dynamique des processus intervenants dans le façonnage de des paysages (COLLIN *et al.*, 2018). Cependant, la technique embarquée par avion jusqu'ici utilisée, offre une précision et une densité de points limitées (8 point/25m² pour le produit Litto3D® - Bretagne 2018-2021 IGN/SHOM).

1.2 Couple technologique drone - LiDAR

Depuis les années 2000, les drones sont devenus des outils courants dans les études scientifiques (NEX *et al.*, 2022), initialement équipés de capteurs fonctionnant dans le spectre visible (rouge-vert-bleu ; RVB), puis évoluant vers l'utilisation de capteurs infrarouges (IR). Ces avancées ont permis des applications telles que l'analyse de l'occupation des sols grâce à des algorithmes de classification (COLLIN *et al.*, 2023), ainsi que l'évaluation de la santé de la végétation à travers l'utilisation d'indices de végétation spécifiques. Le *LiDAR* monté sur drone a ouvert la porte à des études plus précises grâce au survol basse altitude (KELLNER *et al.*, 2018). La très haute (TH) résolution spatiale des données *LiDAR* obtenues par des survols à basse altitude permet de saisir des détails complexes du terrain, de la végétation et d'autres caractéristiques environnementales. Souvent utilisé pour qualifier et quantifier la biomasse forestière, il est aujourd'hui utilisé pour étudier les micro-variations topographiques des géo-écosystèmes induites par le changement climatique grâce à sa TH résolution spatiale, spectrale et temporelle. La technologie *LiDAR* s'est révélée inestimable dans ses applications dans les paysages côtiers (PINTON *et al.*, 2023). Le couple drone-*LiDAR* facilite la compréhension de la dynamique côtière grâce à son aisance de déploiement et à la TH densité de points observés et collectés.

1.3 Nuages de points tri-dimensionnels

La cartographie en trois dimensions (3D) constitue une avancée dans la compréhension des impacts du changement climatique. Outre la représentation d'objets et d'environnements, les voxels, contraction de *volumetric pixels* (ou pixel volumétriques), jouent un rôle désormais crucial. Chaque point est représenté dans une grille

tridimensionnelle horizontale (XY) et verticale (Z). Les voxels ont la capacité de capturer et stocker des informations supplémentaires comme le nombre de retours ou les informations spectrales (RVB, ou IR). En enregistrant le nombre de retours, la cartographie 3D peut fournir une compréhension plus détaillée de la structure et de la complexité de l'environnement étudié.

Cependant, il existe deux méthodes de reconstruction 3D pour capter la topographie à partir de levés drone : la photogrammétrie et la lasergrammétrie. La première est basée sur les photographies ayant suffisamment de recouvrement entre elles pour modéliser l'environnement étudié. La seconde est basée sur les observations précises des éléments du paysage grâce au multi-écho.

Ce projet de recherche se focalise sur l'évaluation des méthodes de reconstruction par photogrammétrie et par lasergrammétrie. Il vise à évaluer la précision des nuages de points issus de la photogrammétrie passive, de la lasergrammétrie active et de la combinaison des deux à partir de cibles géoréférencées. Au-delà de l'évaluation de la précision des nuages de points, cette étude explore également l'impact des différents types d'occupation du sol sur les méthodes de reconstruction.

2. Matériel et Méthodes

2.1 Site d'étude

Le site d'étude se situe dans la Baie du Mont-Saint-Michel à proximité de la chapelle Sainte-Anne (48°36'37" N ; 1°40'06" O). La zone s'étend sur 0,3 km² et se caractérise à la fois par des structures anthropiques (route, chemin, parking) et des habitats côtiers (marais maritime, strate arbustive et arborée, mare, prairie).



Figure 1. Cartographie du site d'études (rectangle rouge) et localisation des cibles géoréférencées (points rouge).

2.2 Mesures GNSS et survols drone

La collecte de données s'est déroulée le 5 juin 2023 entre 13h00 et 15h00. En amont du survol drone, 6 cibles ont été réparties de manière homogène sur le site (voir Figure 1)

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

puis géolocalisées grâce au *GNSS* (*Global Navigation Satellite System*) Emlid Reach RS2+ connecté au réseau *RTK* (*Real Time Kinematic*) Teria.

Un drone DJI Matrice 300 - RTK équipé d'un capteur *LiDAR* L1 doté d'une caméra Rouge-Vert-Bleu (20 M-p) a été connecté au réseau *RTK* Teria pour assurer un positionnement horizontal et vertical centimétrique en temps réel (voir Tableau 1). Le survol a duré 15 min.

Tableau 1. Paramètre de vol.

Option	Paramètre
<i>Altitude de vol</i>	50 m
<i>Densité de points</i>	2 247 points/m ²
<i>Nombre d'images acquises</i>	253
<i>Résolution de l'image bleu-vert-rouge ; 20 Mpixels)</i>	0,019m
<i>Vitesse moyenne</i>	4 m/s
<i>Chevauchement des images latérales / frontales</i>	50% / 80%

2.3 Photogrammétrie et lasergrammétrie

Le logiciel DJI TERRA® a permis d'une part, de créer une orthomosaïque et un nuage de points par photogrammétrie *structure for motion* (*SFM*) à partir des 253 images RVB et d'autre part, de réaliser un nuage de points issu des observations acquises par *LiDAR* monté sur drone.

A partir des deux nuages de points créés, un troisième a été généré grâce à la fusion de ces derniers via Agisoft Metashape®.

Les méthodes de reconstruction (photogrammétrie, lasergrammétrie et la fusion photogrammétrie + lasergrammétrie) ont été analysées et évaluées selon (1) la densité de points à partir du nuage de point (sol et sursol) de référence du Service Hydrographique de la Marine (SHOM) récolté en septembre 2021 ; (2) la précision verticale (*Z*) à partir des points de contrôle au sol levés au *GNSS* *RTK*.

Les nuages de points ont été évalués à l'échelle paysagère du site grâce au logiciel CloudCompare et à l'échelle des géo-écosystèmes présents sur le site grâce au logiciel ArcGis Pro® (voir Figure 2).



Figure 2. Cartographie de la localisation des géo-écosystèmes.

3. Résultats et discussion

3.1 Analyse paysagère des nuages de points

D'un point de vue de la densité de points, les nuages de points basse altitude ont été analysés en fonction du type de reconstruction. La confrontation photogrammétrie vs. lasergrammétrie a montré une densité de points supérieure entre les deux techniques 104 M et 167 M, respectivement. La lasergrammétrie est basée sur les observations contrairement à la photogrammétrie dont le produit résultant est une modélisation (voir Figure 3).

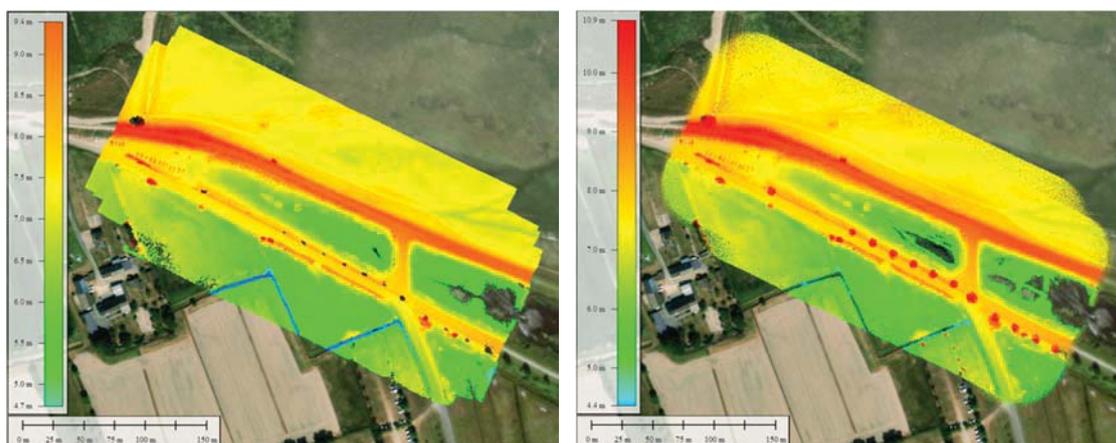


Figure 3. Cartographie des nuages de points issus de photogrammétrie (A) et de lasergrammétrie (B).

La fusion (photogrammétrie + lasergrammétrie) des deux nuages points a permis d'obtenir un nuage de points d'une densité de 242 M tirant ainsi le bénéfice des deux techniques de reconstruction en un seul vol (voir Figure 4). Les zones non reconstruites comme les mares peu profondes ont pu être comblées grâce à la photogrammétrie.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

Contrairement au drone, le nuage de points avion capturé à une altitude comprise entre 400 et 900m du SHOM a obtenu une densité inférieure équivalente à 3 M de points. Les différences observées entre la technologie drone et avion, est d'une part, liée à la densité de mesures observées : 8 points /m² pour le *LiDAR* SHOM et 2 247 points / m² pour le *LiDAR* drone.

Les comparaisons des précisions altimétriques entre les ensembles de points et les cibles géoréférencées révèlent des *RMSE* de 0,16 m pour la photogrammétrie, de 0,07 m pour la lasergrammétrie et de 0,08 m pour la fusion de la photogrammétrie et de la lasergrammétrie.

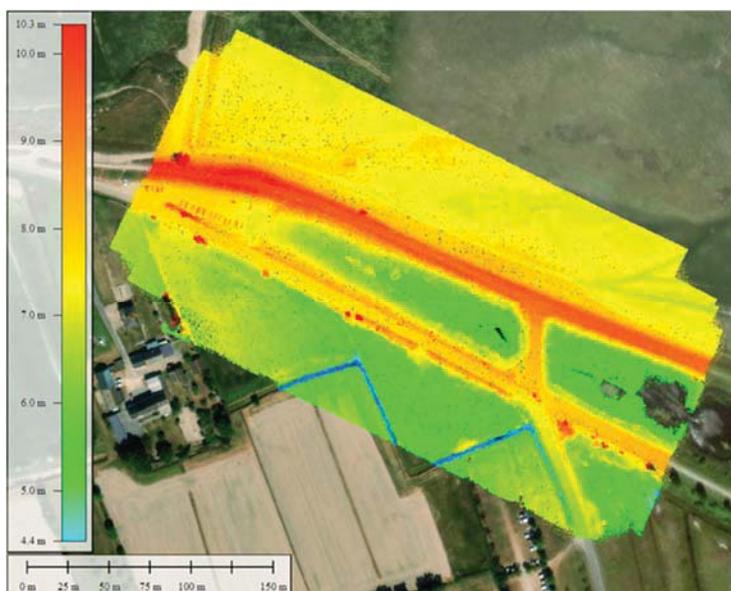


Figure 4. Cartographie des nuages de points issus de la fusion photogrammétrie + lasergrammétrie (B).

3.2 Analyse des nuages de points à l'échelle des géo-écosystèmes

Une évaluation des différents géo-écosystèmes du site d'étude a été réalisée. Le géo-écosystème « arbres » présente des densités de points de 1 226, 29 245, 208 903 et 238 142 respectivement selon l'origine des nuages de points SHOM, photogrammétrie, lasergrammétrie ou fusion (voir Figure 5).

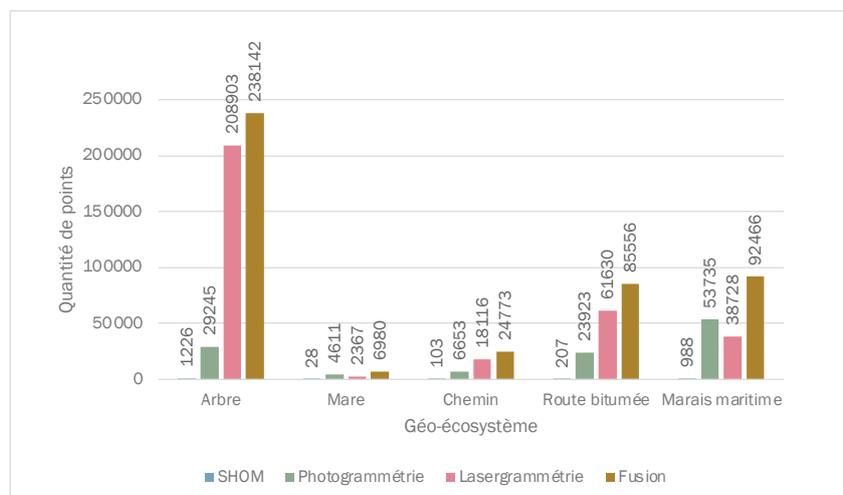


Figure 5. Histogramme de la densité de points par géo-écosystème.

En revanche, le géo-écosystème « route » montre des densités variant de 28 pour les données SHOM à 2 367 pour la lasergrammétrie, puis à 4 611 pour la photogrammétrie, et enfin à 6 980 pour la fusion des deux techniques. Les géo-écosystèmes « chemin » et « route bitumée » suivent une tendance similaire d'augmentation de densité en fonction du type de reconstruction. Les surfaces minérales et leur rugosité entraînent un retour d'onde plus court que celui des arbres ou des marais maritimes (POULLAIN, 2013). Enfin, le géo-écosystème « marais maritimes » présente la meilleure densité avec la photogrammétrie et la fusion.

En termes d'altitude, le géo-écosystème « arbre » affiche des moyennes de 13,47 m, 15,50 m et 15,95 m et une variance de 1,96 m, 2,89 m et 2,65 m pour les données SHOM, fusion et lasergrammétrie respectivement (voir Figure 6). Cette variation s'explique par l'intensité du retour *LiDAR* et la densité de points. Les résultats de la photogrammétrie sont moins précis (9,37 m pour la moyenne de l'altitude et 3,43 m pour la variance), en raison de la technique de modélisation du paysage. Le géo-écosystème « mare » présente des altitudes similaires, entre 5,32 m et 5,70 m et peu de variance de l'altitude au sein de celui-ci. Les altitudes moyennes des géo-écosystèmes « chemin » et « route bitumée » varient de la même manière, avec une légère prévalence pour la lasergrammétrie par drone. Enfin, le géo-écosystème « marais maritime » montre peu de variation entre les quatre types de données et une variance comprise entre 0.01 m et 0.02 m.

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection

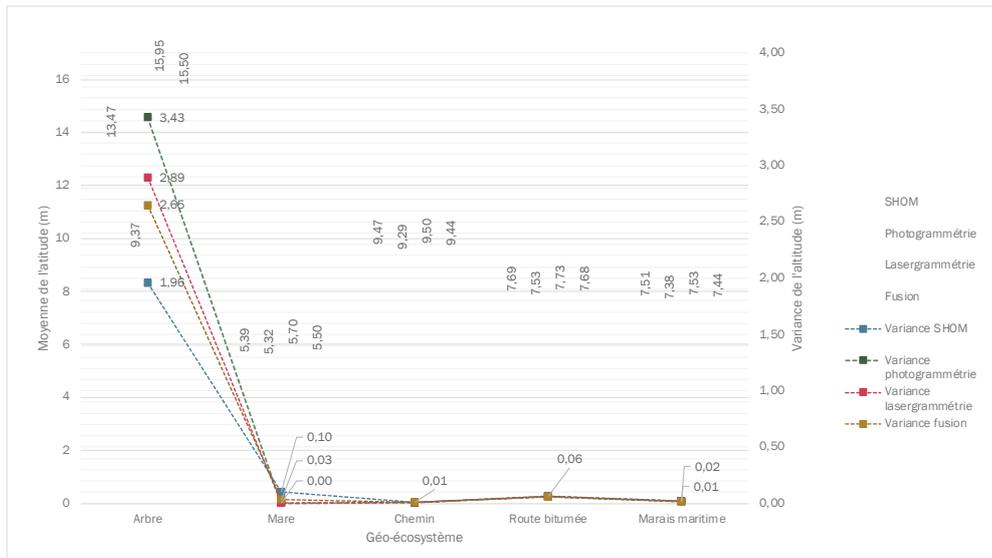


Figure 6. Histogramme de l'altitude moyenne et la variance de l'altitude à l'échelle des géo-écosystèmes.

Dans l'ensemble, en termes de densité de points et de précision par géo-écosystème, les résultats de la photogrammétrie impactent négativement les résultats de la fusion (photogrammétrie + lasergrammétrie), en raison du type de reconstruction et de modélisation par rapport aux observations. Cependant, en ce qui concerne la densité de points par géo-écosystème, la fusion offre une nette amélioration par rapport aux autres techniques. La photogrammétrie permet de combler certaines lacunes associées au capteur *LiDAR* topographique limité, notamment en présence d'eau sur le site, en raison de l'absorption des longueurs d'onde dans le spectre infrarouge (PALMER & WILLIAMS, 1974).

4. Conclusions

Le couple drone-*LiDAR*, en plein essor, a désormais la capacité de suivre à très haute résolution spatiale et temporelle les changements subtils du paysage grâce à sa précision. Cette étude s'est penchée sur l'évaluation des méthodes de reconstruction du paysage : la photogrammétrie (modélisation), la lasergrammétrie (observation) et la fusion de deux méthodes au travers de la comparaison des nuages de points, d'un point de vue de la densité et d'un point de vue de la précision de l'altitude. La fusion des deux méthodes augmentent significativement la densité de points que ce soit à l'échelle du site ou du géo-écosystème. Cette combinaison comble les scories de la lasergrammétrie et apporte de la texture. D'un point de vue de l'altitude, les résultats ont démontré que la fusion des méthodes diminue la moyenne et la variance de l'altitude au niveau des géo-écosystèmes de manière générale. Cette étude pourra être complétée grâce au *LiDAR* DJI L2 dont la densité de points sol est trois fois supérieure au L1.

5. Références bibliographiques

COLLIN A., RAMAMBASON C., PASTOL Y., CASELLA E., ROVERE A., THIAULT L., DAVIES, N. (2018). *Very high resolution mapping of coral reef state using airborne bathymetric LiDAR surface-intensity and drone imagery*. International journal of remote sensing, 39(17), pp 5676-5688. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1500072>.

COLLIN A., JAMES D., GALLON R., POIZOT E., FEUNTEUN E. (2023). *The use of ultra high resolution uav lidar infrared intensity for enhancing coastal cover classification*. 5th International Electronic Conference on Remote Sensing, Vol. 7, pp 21. <https://doi.org/10.3390/ECRS2023-16610>.

JAMES D., COLLIN A., MURY A., QIN R. (2022). *Satellite-derived topography and morphometry for VHR coastal habitat mapping: The Pleiades-1 tri-stereo enhancement*. Remote Sensing, Vol. 14, pp 219. <https://doi.org/10.3390/rs14010219>.

KELLNER J.R., ARMSTON J., BIRRER M., CUSHMAN K.C., DUNCANSON L., ECK C., ZGRAGGEN C. (2019). *New opportunities for forest remote sensing through ultra-high-density drone lidar*. Surveys in Geophysics, Vol. 40, pp 959-977. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09529-9>.

NEX, F., ARMENAKIS, C., CRAMER, M., CUCCI, D. A., GERKE, M., HONKAVAARA, E., KIKKO, A., PERSELLO, C., SKALOUD, J. (2022). *UAV in the advent of the twenties: Where we stand and what is next*. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 184, 215-242. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.12.006>.

PALMER K.F., WILLIAMS D. (1974). *Optical properties of water in the near infrared*. JOSA, Vol. 64, pp 1107-1110. <https://doi.org/10.1364/JOSA.64.001107>.

PINTON D., CANESTRELLI A., WILLIAMS S., ANGELINI C., WILKINSON B. (2023). *Estimating mussel mound distribution and geometric properties in coastal salt marshes by using UAV-Lidar point clouds*. Science of The Total Environment, Vol. 883, pp 163707. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163707>.

POULLAIN E. (2013). *Exploitation de l'intensité du signal LASER d'un LiDAR topographique aéroporté pour des environnements littoraux sableux*. PhD, Université de Caen, 199 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163707>.

SHOM – IGN (2024). Litto3D – Produit Bretagne 2018-2021.

https://doi.org/10.17183/LITTO3D_BZH_2018_2021

Thème 3 – Instrumentation, mesures, imagerie et télédétection