



OBSERVATOIRE DE LA CÔTE
NOUVELLE-AQUITAINE

Document public

Rapport final

Acquisition de données topographiques par drone sur la Dune du Pilat, comparaison des méthodes et outils

RP-73755-FR
Version 2 du 01/10/2024

Longueville F. et Bernon N.



Ce rapport a été vérifié le 05/08/2024 et approuvé le 01/10/2024 selon la procédure interne en vigueur au sein du BRGM, qui garantit le respect de ses engagements contractuels, de l'intégrité et de l'impartialité du contenu scientifique et technique du présent rapport, de l'éthique et de la déontologie du BRGM, ainsi que des dispositions réglementaires et législatives auquel il est soumis pour l'exercice de son activité.

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu contractuellement.

Le demandeur assure lui-même la diffusion qu'il souhaite des exemplaires de ce tirage initial, dont il est seul propriétaire.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur, ainsi que par les termes de la convention.

Les justificatifs du contrôle qualité de ce rapport (auteur, vérificateur, approbateur) peuvent être communiqués à titre confidentiel au destinataire du rapport, à sa demande et dans le strict respect de la réglementation applicable au traitement des données à caractères personnels.

Le BRGM ne saurait être tenu responsable de la divulgation du contenu total ou partiel de ce rapport à un tiers non-autorisé qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire accessible par cette adresse <https://forms.office.com/r/yMgFcU6Ctq> ou par ce code :



Mots-clés : Drone, levé LiDAR, photogrammétrie, érosion, Dune du Pilat, Nouvelle-Aquitaine

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Longueville F. et Bernon N. (2024) - Acquisition de données topographiques par drone sur la Dune du Pilat, comparaison des méthodes et outils. Rapport final version 2 du 01/10/2024. BRGM/RP-73755-FR, 31 p., 12 fig., 4 tab.

Synthèse

Depuis quelques années, le développement de l'imagerie par drone a connu un important essor dans de nombreux domaines, y compris les géosciences. Les techniques de cartographie LiDAR et par photogrammétrie ont fait leur preuve dans les environnements côtiers, telles que les côtes rocheuses, côtes vaseuses et certaines côtes sableuses. Néanmoins, elles ont peu été déployées pour les systèmes dunaires telle que la Dune du Pilat.

Dans ce contexte, la présente étude vise à tester la faisabilité d'un levé photogrammétrique et LiDAR par drone pour suivre l'évolution de la Dune du Pilat. Cet exercice, à vocation méthodologique, a pour objectif de comparer les différentes méthodes d'acquisition entre elles (LiDAR, DGPS, photogrammétrie) et de déterminer les avantages et inconvénients des levés drone pour un système dunaire littoral telle que la Dune du Pilat.

L'étude s'inscrit dans les missions de 2023 de l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine (OCNA). Une première campagne d'acquisition devait se dérouler au cours de l'été 2023. Elle a été reportée à octobre 2023, suite à l'arrêté municipal de la commune de La Teste-de-Buch interdisant tout vol de drone au-dessus de la dune. En raison de problèmes techniques, une nouvelle campagne d'acquisition par drone LiDAR a été organisée en février 2024, entraînant une analyse des résultats au cours du 1^{er} semestre 2024.

Les résultats de cette étude mettent en évidence la faisabilité de déployer un drone dans un contexte tel que celui de la dune qui est une surface sableuse :

- ① très réfléchive, affectant les paramètres de prise de vue photogrammétrique ;
- ① au contraste local réduit, ce qui gêne l'identification de points homologues en photogrammétrie ;
- ① subissant les marées, donc masquant un large domaine intertidal en pied à marée haute et nécessitant un protocole du déploiement des repères de calage, de mesure de validation et de prises de vues phasées avec les marées ;
- ① sujette au vent et à la mise en suspension de sable dans la lame d'air proche de la surface (réduisant le contraste des photos et pouvant provoquer des échos LiDAR à une altitude supérieure au niveau du sol).

Que ce soit par photogrammétrie ou par LiDAR, les levés ont permis d'acquérir un Modèle Numérique de Terrain au pas de 10 cm/pixel, précis d'environ 8 cm en altimétrie et qui couvre plus de 90 % de l'emprise initiale de 170 ha. Il est nécessaire, pour garantir une précision inférieure à la dizaine de centimètres du MNT, de réaliser des points de calage au DGPS pour l'ensemble du secteur suivi. Les levés au DGPS, que ce soit le long des profils de référence ou au niveau des points de contrôle, représentent une technique complémentaire à l'approche par drone. Réalisées depuis 2009 dans le cadre de l'OCNA, les campagnes d'acquisition au DGPS constituent un socle de connaissance permettant de caractériser les déplacements sédimentaires de la dune, le long de profils discrets, et améliorer la compréhension des processus d'évolution en jeu.

À l'échelle de la Nouvelle-Aquitaine, le levé drone peut être déployé sur l'ensemble des environnements côtiers qui composent le littoral. Les levés drone permettent d'acquérir rapidement, précisément et régulièrement la topographie d'un objet sédimentaire relativement étendu. Adapté pour les côtes rocheuses et les plages de poches, il est pertinent pour suivre des cellules hydrosédimentaires dynamiques et relativement peu étendues (quelques kilomètres de linéaire côtier), tels que la Dune du Pilat, le banc d'Arguin, le système de barre-bâines ou encore les embouchures. Le long des grands linéaires, l'avion représente un vecteur d'acquisition plus rentable et plus rapide pour acquérir de la donnée de haute précision (~10 cm).

Sommaire

1. Introduction	7
1.1. CONTEXTE	7
1.2. CADRE DE L'ETUDE	7
1.3. CONDITIONS DE REALISATION	8
1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT	8
2. Méthodologie d'acquisition	9
2.1. ZONE D'ETUDE	9
2.2. DONNEES DISPONIBLES	10
2.3. ACQUISITION	11
2.3.1. Déroulé de la campagne d'acquisition	11
2.3.2. Matériels déployés et paramètres d'acquisition	12
2.3.3. Principes des technologies d'acquisition	12
2.4. METHODE DU CONTROLE "QUALITE"	14
2.4.1. Vérification planimétrique	14
2.4.2. Vérification altimétrique	15
3. Résultats	17
3.1. ACQUISITION PHOTOGRAMMETRIE PAR LE PRESTATAIRE	17
3.2. ACQUISITION LIDAR PAR LE PRESTATAIRE	18
3.2.1. Vérification altimétrique du MNT et du nuage de points	19
3.2.2. Vérification planimétrique	21
4. Discussion	23
4.1. SYNTHESE	23
4.2. CHOIX DU VECTEUR DANS LES ACQUISITIONS TOPOGRAPHIQUES	24
4.3. CHOIX DU CAPTEUR D'ACQUISITION : PHOTOGRAMMETRIE VS LIDAR	25
4.4. EXEMPLE D'APPLICATION DU LEVE TOPOGRAPHIQUE PAR DRONE SUR LA DUNE DU PILAT	27
5. Conclusion	29
6. Bibliographie	31

Liste des figures

Figure 1 - Présentation de la Dune du Pilat avec le flanc long tourné vers le bassin d'Arcachon et le flanc court très pentu tourné vers les terres (©Larrousinéy)	9
Figure 2 - Emprise de la zone à lever avec les coordonnées dans le repère RGF93/Lambert-93 (EPSG2154) des 4 sommets de l'emprise (fond : IGN et Pléiade 2022).....	10
Figure 3 - Présentation des données réalisées par l'OCNA : a) lidar de 2023 ; b) « Pilat_la_Foret » extrait de la fiche transect de l'OCNA	11
Figure 4 - Schéma explicatif du fonctionnement d'un DGPS (Hoareau, 2016)	13
Figure 5 - Présentation des acquisitions par photogrammétrie et par LiDAR (©Escadrone)	14
Figure 6 - Levé au DGPS d'une cible d'1m x 1m en bâche (design de la cible ©BRGM) (Photo ©BRGM)	14
Figure 7 - a) Orthophotographie d'une résolution de 2 cm, issue du traitement par photogrammétrie des images drone (Les zones blanches correspondent à des secteurs sans données) ; b) Nuage de points issu du traitement par photogrammétrie, la majeure partie sommitale de la dune n'est pas cartographiée ; Le polygone vert correspond à l'estran et le bas de la Dune du Pilat	17
Figure 8 - Phénomène de mise en suspension et de saltation du sable sur le sommet de la Dune du Pilat, le 17 octobre 2023 (©BRGM)	18
Figure 9 - a) Modèle numérique de terrain (MNT) et b) Modèle numérique de surface (MNS) de la Dune du Pilat acquis par drone en février 2024 ; l'emprise rouge correspond à l'emprise initialement attendue dans le cadre du CCTP ; le carroyage est désorienté pour faciliter la représentation (flèche du nord indiqué dans le coin supérieur droit)	19
Figure 10 - 809 points de contrôle relevés au DGPS dans la totalité de la zone d'étude (fond = MNT issu de la campagne annuelle LiDAR de septembre 2023, réalisée par avion ; carroyage désorienté pour faciliter la représentation (flèche du nord indiqué dans le coin supérieur droit))	19
Figure 11 - a) Répartition spatiale de l'ensemble des points de contrôle prenant en compte la différence entre l'altitude du nuage de points issu du levé LiDAR par drone du 14 février 2024 (Z_{LiDAR}) et l'altitude des points de contrôle relevés au DGPS le 14 février 2024 (Z_{DGPS}) ; b) Histogramme de la différence entre les altitudes du nuage de points LiDAR et des données DGPS ; La ligne grise est une courbe de Gauss dont la moyenne est autour de -0,9 cm.....	21
Figure 12 - Différentiel d'altitude entre le MNT acquis en septembre 2023 et celui acquis en février 2024.....	27

Liste des tableaux

Tableau 1 - Détails des vols et paramètres d'acquisition pour les vols effectués sur la Dune du Pilat	12
Tableau 2 - Statistiques des différences observées entre le nuage de points LiDAR et les points de référence.....	20
Tableau 3 - Comparaison entre les vecteurs drone, les aéronefs avec pilotes et les techniques non aéroportées, pour différents critères économiques, techniques et environnementaux	25
Tableau 4 - Comparaison entre le LiDAR et la photogrammétrie, en fonction de critère d'opérabilité, de qualité de rendu et de coût	26

1. Introduction

1.1. CONTEXTE

Les technologies d'acquisition d'image par drone ont émergé ces dernières décennies, dans différents domaines : média, loisir, militaire, sécurité civile, sciences. Ce vecteur léger, facilement mobilisable, pouvant transporter de la charge utile, a également pris essor dans le domaine de la topographie, avec la miniaturisation des capteurs photographiques et LiDAR de haute précision. Ces techniques d'acquisition ont atteint une certaine maturité technologique permettant d'atteindre des échelles de hautes précisions sur de larges surfaces.

Sur le littoral, la technologie drone est utilisée pour suivre les évolutions sédimentaires dans différents environnements côtiers : côtes rocheuses (Dewez *et al.*, 2016), côtes sableuses (Belon *et al.*, 2015 ; environnement vaseux (Brunier *et al.*, 2016 ; Longueville *et al.*, 2017), ou encore dunes éoliennes (Desmazes *et al.*, 2018). En Nouvelle-Aquitaine, ce type de levé a été déployé pour suivre l'évolution des brèches d'érosion de la dune du Truc Vert, l'évolution de l'anse du Gurp et des plages de Lacanau (Castelle *et al.*, 2019 ; Laporte-Fauret *et al.*, 2019). Toutefois, elle n'a jamais été encore déployée sur un objet telle que la Dune du Pilat.

Plus grande dune d'Europe, la Dune du Pilat fait l'objet d'un suivi chaque année, dans le cadre de l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine (OCNA). Au printemps, quatre profils topographiques transversaux sont levés au DGPS (*Differential Global Positioning System*) ainsi que la position du trait de côte¹ et de la crête. En automne, un levé LiDAR d'environ 10 pts/m², réalisé par avion, cartographie toute la région Nouvelle-Aquitaine, dont la Dune du Pilat.

D'un point de vue morphologique, la Dune présente plusieurs défis techniques pour l'acquisition de données topographiques par drone, en raison de sa surface sableuse très réfléchive qui affecte les paramètres de prise de vue photogrammétrique, du contraste local réduit, qui gêne l'identification de points homologues en photogrammétrie. De plus, la zone intertidale de la Dune est soumise aux marées, nécessitant un protocole d'acquisition phasé avec les marées et la partie sommitale de la Dune est sujette au vent et à la mise en suspension de sable dans la lame d'air proche de la surface, ce qui réduit le contraste des photos et peut provoquer des échos LiDAR à une altitude supérieure au niveau du sol.

Dans ce contexte, la présente étude vise à tester la faisabilité d'un levé photogrammétrique et LiDAR par drone pour suivre l'évolution de la Dune du Pilat. Cet exercice, à vocation méthodologique, a pour objectif de comparer les différentes méthodes d'acquisition entre elles (LiDAR, DGPS, photogrammétrie) et de déterminer les avantages et inconvénients de ces outils et méthode pour la Dune du Pilat.

1.2. CADRE DE L'ETUDE

Cette étude s'inscrit dans le programme d'actions de l'OCNA pour l'année 2023. Elle est financée par l'Union européenne via le fonds FEDER, l'Etat, la Région Nouvelle-Aquitaine, les départements de la Charente-Maritime, de la Gironde, des Landes, des Pyrénées-Atlantiques, le Syndicat Intercommunal du Bassin d'Arcachon (SIBA), le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et l'Office National des Forêts (ONF).

¹ Le descripteur utilisé dans le cadre de l'OCNA pour mesurer la position du trait de côte est le pied de la dune

L'OCNA, opéré techniquement par le BRGM et l'ONF, est un outil fédérateur des acteurs politiques et scientifiques du littoral, qui vise à acquérir, bancaiser et partager la connaissance relative à l'évolution de la côte de Nouvelle-Aquitaine.

1.3. CONDITIONS DE REALISATION

La campagne d'acquisition photogrammétrique, prévue initialement au cours de l'été 2023, a été décalée à octobre 2023 en raison d'un arrêté municipal en vigueur interdisant tout survol drone de la Dune en période estivale. Une seconde campagne d'acquisition de données LiDAR par drone a été réalisée en février 2024. Les résultats ont été exploités au cours de l'année 2024.

Les captations par drone ont été réalisées par la société Drone On Air, située en Loire-Atlantique, retenue sur la base de leur mémoire technique, suite à la publication et la soumission d'un cahier des charges précisant les caractéristiques de la prestation à réaliser. Drone On Air est une société spécialisée dans la cartographie aérienne et la formation de télépilote pour les secteurs de l'environnement, la modélisation 3D, l'audiovisuel et le suivi de chantier, notamment.

1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport a pour objectif de présenter les résultats de l'étude méthodologique relative à l'acquisition drone sur la Dune du Pilat. Les résultats sont structurés en trois grandes parties :

- ① les méthodes d'acquisitions topographiques par drone : le lidar et la photogrammétrie ;
- ① les résultats des différentes campagnes d'acquisition ;
- ① une partie de discussion, comparant les vecteurs d'acquisition (drone, avion) et les solutions des capteurs (LiDAR et photogrammétrie).

Enfin, dans la dernière partie, une application succincte des acquisitions drone est présentée, en comparant le LiDAR pris par avion en septembre 2023 et le LiDAR pris par drone en février 2024.

2. Méthodologie d'acquisition

2.1. ZONE D'ETUDE

La zone d'étude regroupe la Dune du Pilat et la plage localisée devant la dune. Située sur la commune de La Teste-de-Buch, la Dune du Pilat est la plus haute dune d'Europe. En 2023, elle culmine à 103,6 m (OCNA²).

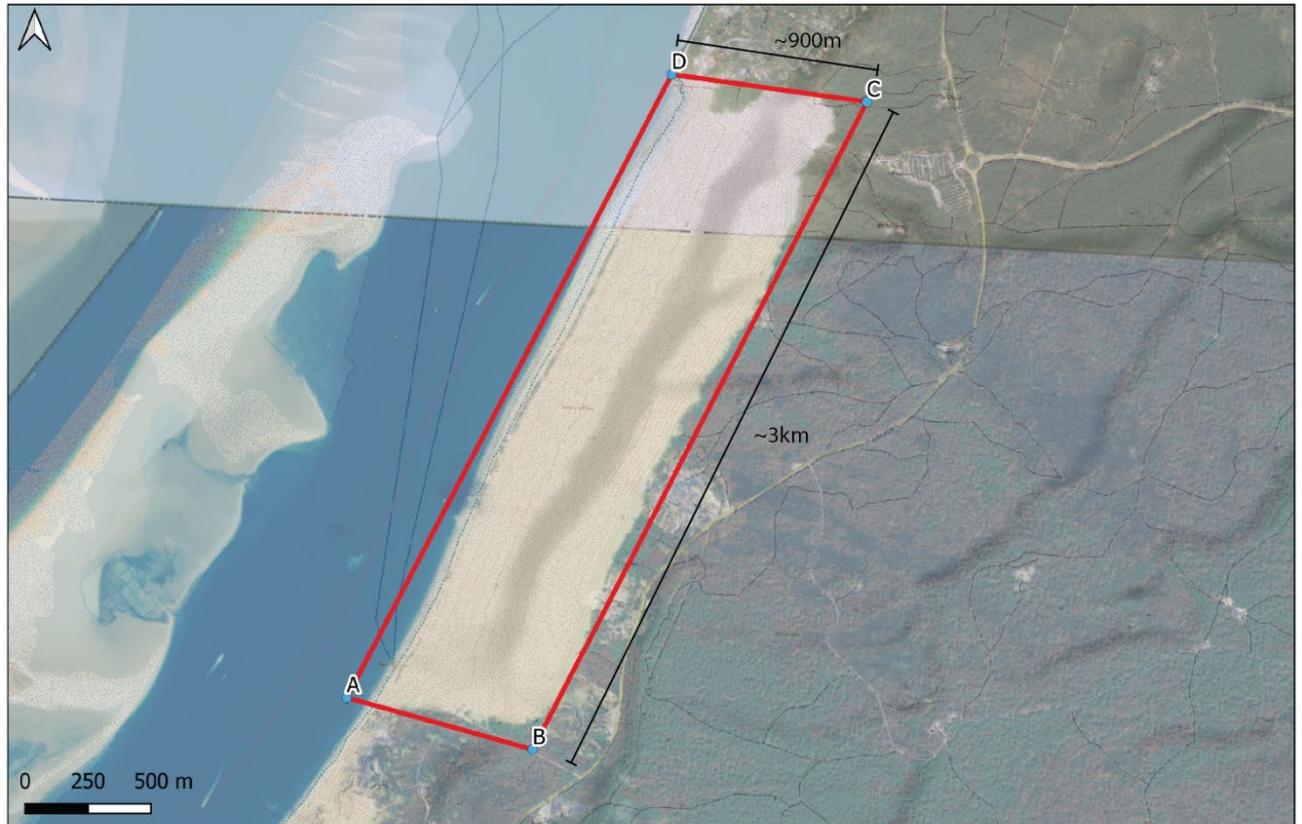
La dune s'est formée par accumulation de sable éolien, transporté au fil du temps de la plage vers les terres. Ce déplacement lui a donné cette forme caractéristique de dune transversale (Figure 1), plus ou moins barkhanoïde, avec un flanc long qui montre des pentes comprises entre 5 et 20° et un flanc court, sous le vent, avec des pentes plus fortes de 30 à 40°. Les suivis de l'Observatoire de la côte de Nouvelle Aquitaine quantifient les vitesses de migration de la dune entre 2 et 5 m/an vers les terres (Mallet *et al.*, 2015).



Figure 1 - Présentation de la Dune du Pilat avec le flanc long tourné vers le bassin d'Arcachon et le flanc court très pentu tourné vers les terres (©Larrousiney)

Ce secteur d'étude, très dynamique, est long d'environ 3 km et large d'environ 900 m, soit 1,7 km² (170 ha) (Figure 2). Il comprend la dune et l'estran. Conformément au cahier des charges, l'estran est levé à marée basse de vives eaux afin de maximiser la surface intertidale cartographiée.

² <http://www.observatoire-cote-aquitaine.fr>



Repère: RGF93/Lambert93 (EPSG:2154)
Fond: Orthophotographie 2022 et IGN

Nom	X [m]	Y [m]
A	364591.957	6395493.803
B	365460.694	6395288.104
C	366701.15	6397926.683
D	365844.943	6398119.852

Figure 2 - Emprise de la zone à lever avec les coordonnées dans le repère RGF93/Lambert-93 (EPSG2154) des 4 sommets de l'emprise (fond : IGN et Pléiade 2022)

2.2. DONNEES DISPONIBLES

La Dune du Pilat fait l'objet de suivis topographiques réguliers. Dans le cadre de l'OCNA, deux levés sont réalisés annuellement Figure 3 :

- ① un levé au DGPS, au printemps réalisé depuis 2009, le long de 4 profils transversaux à la dune ainsi que la position du trait de côte (Mugica et Hoareau, 2010);
- ① l'acquisition de données LiDAR par avion chaque automne depuis 2016.

Les données LiDAR par avion, ont été acquises début septembre 2023, avant les tempêtes hivernales, avec une densité de 8 points/m² synthétisées dans un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 1 m. En parallèle du levé, une orthophotographie de 10 cm/pixel a été réalisée. Les caractéristiques techniques du LiDAR sont regroupées dans le rapport de Ayache et David, 2024.

La côte de Nouvelle-Aquitaine a connu d'importants déplacements sédimentaires, suite aux tempêtes survenues dans le courant de l'hiver 2023/2024. Sur cette période, au niveau de la Dune du Pilat, le relief de la dune et les rides présentent à sa surface ont subi des changements excédant la tolérance de la mesure. Les données LiDAR acquises en septembre 2023, en période pré-hivernale, ne peuvent donc pas être utilisées pour analyser la qualité des données LiDAR acquises par drone en période post-tempête.

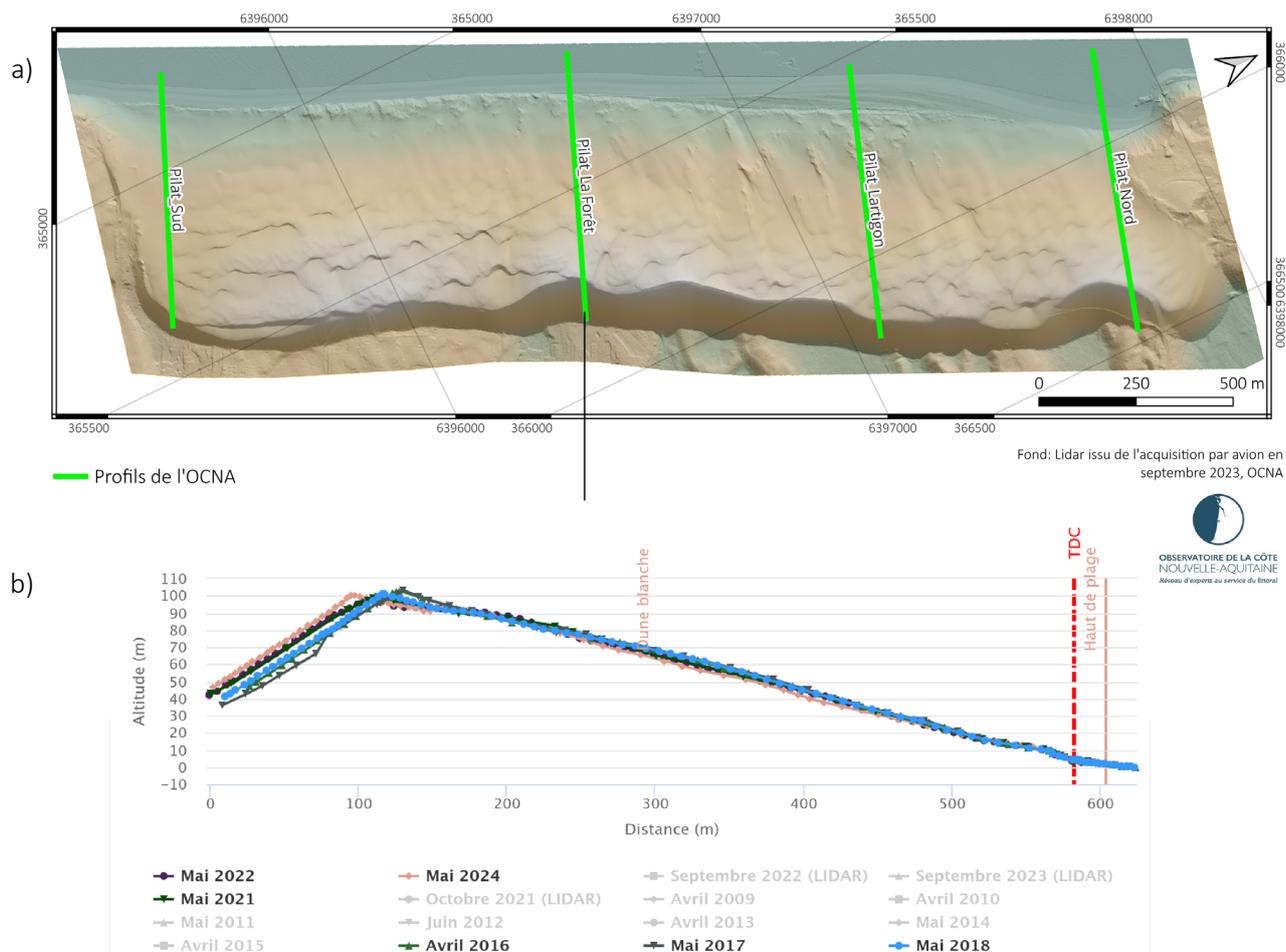


Figure 3 - Présentation des données réalisées par l'OCNA : a) lidar de 2023 ; b) « Pilat_la_Foret » extrait de la fiche transect de l'OCNA

2.3. ACQUISITION

2.3.1. Déroulé de la campagne d'acquisition

La campagne topographique par drone s'est déroulée en deux époques :

- ① une première époque avec un vol d'acquisition de photographies en couleurs naturelles drone, pour la production photogrammétrique, en date du 17 octobre 2023, accompagné de l'implantation de cibles de calage et de contrôle relevées topographiquement par DGPS par le prestataire (15 cibles installées au sol) ;
- ② une seconde époque avec deux vols pour acquérir les données LiDAR, les 14 et 15 février 2024, avec l'implantation de cibles de calage et de contrôle le 13 février 2024, relevées topographiquement par DGPS par le prestataire (10 cibles installées au sol).

Le second vol a été déclenché à la suite de l'analyse des premiers résultats issus du vol d'octobre 2023 qui n'atteignait pas les standards définis dans le CCTP initial (cf. § 3.1).

Lors des deux campagnes, une équipe du BRGM/OCNA s'est déplacée en parallèle de l'acquisition drone, afin de mesurer des points de contrôle au DGPS indépendants de ceux du prestataire, répartis sur tout le secteur d'étude. Ces points, dont la précision est centimétrique, servent à contrôler la qualité du nuage de points et du MNT fournis par le prestataire. Le 17 octobre 2023, 384 points ont été relevés, le long de

transects parcourant toute la dune, de la zone intertidale au tombant côté forêt, en passant par la crête de la dune. Le 14 février 2024, 809 points ont été relevés.

2.3.2. Matériels déployés et paramètres d'acquisition

Lors de l'acquisition des images drone pour la photogrammétrie, avec le capteur Zen Muse P1, le 17 octobre 2023, les conditions météorologiques³ étaient ensoleillées avec un vent de 22 km/h et des rafales pouvant atteindre 45 km/h.

Pour l'acquisition des données LiDAR, le drone utilisé est un Matrice 300RTK DJI, avec un capteur Zen Muse L1 en guise de capteur LiDAR. L'antenne D-RTK2 du drone a été installée au sommet de la dune, à proximité du profil « Pilat Nord ». Pour garantir les conditions de basse mer au niveau de l'estran (coefficient de marée de 84), un deuxième vol a été réalisé le 15 février 2024. Les conditions météorologiques étaient ensoleillées avec un vent inférieur à 10 km/h. Les vols ont eu lieu le long de transects parallèles à l'axe longitudinale de la Dune.

Le détail des deux vols est regroupé dans le Tableau 1.

Date	Vecteur/capteur	Hauteur	Recouvrement	GNSS/signaux reçus
17/10/2023	Matrice 300 RTK DJI/Zen Muse P1	50 m en suivi de terrain	latéral: 49% / frontal: 70%	Station mobile D-RTK 2/ GPS, Beidou, Glonass, Galileo
14/02/2024	Matrice 300 RTK DJI/Zen Muse L1	100 m en suivi de terrain	latéral: 35%	Station mobile D-RTK 2/ GPS, Beidou, Glonass, Galileo
15/02/2024	Matrice 300 RTK DJI/Zen Muse L2	100 m en suivi de terrain	latéral: 35%	Station mobile D-RTK 2/ GPS, Beidou, Glonass, Galileo

Tableau 1 - Détails des vols et paramètres d'acquisition pour les vols effectués sur la Dune du Pilat

Le matériel utilisé par le BRGM/OCNA est composé de deux DGPS R10, tous de marque Trimble, captant les 4 constellations : GPS, Beidou, Glonass et Galileo.

2.3.3. Principes des technologies d'acquisition

Principe du DGPS

Les mesures topographiques sont effectuées à l'aide d'un DGPS Trimble R10 en mode RTK (*Real Time Kinematic*).

Le levé topographique au DGPS consiste à utiliser un récepteur en le plaçant sur un point connu (la base), dont les coordonnées précises sont mesurées au préalable grâce au réseau Orphéon. Le système compare la position calculée en temps réel par ce récepteur et sa position connue, et détermine une correction de position à appliquer à un récepteur mobile qui effectue le levé. Cette correction est transmise au mobile en temps réel par liaison radio.

Le mode RTK permet d'obtenir des mesures de précision centimétrique en planimétrie et en altimétrie.

Sur le drone, le mode RTK est capable, en théorie, d'atteindre une exactitude de localisation meilleure qu'environ 5 cm (à 1 sigma) sans faire usage des cibles. Le paysage est théoriquement suffisamment dégagé pour ne pas occasionner de perte de signal entre la base et le drone.

³ Les données météorologiques sont tirées du site <https://www.infoclimat.fr>

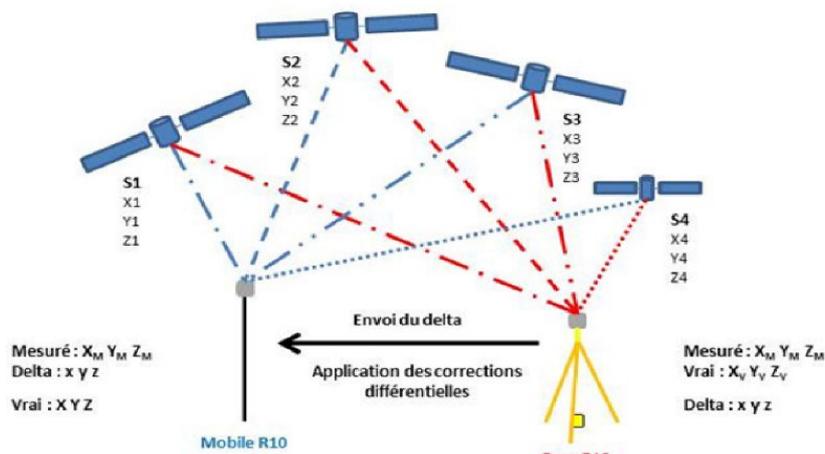


Figure 4 - Schéma explicatif du fonctionnement d'un DGPS (Hoareau, 2016)

Principe de la photogrammétrie

La photogrammétrie repose sur le principe de la stéréoscopie. À partir d'images en deux dimensions (2D) issues d'un capteur photographique passif, l'algorithme permet de générer un modèle en trois dimensions (3D). Il s'appuie sur deux images qui ont un recouvrement et un nombre de points analogues suffisants pour en déduire, d'un point de vue géométrique, l'altitude des points qui composent l'image.

La photogrammétrie dépend de la qualité de la captation de l'image qui se rapporte à sa netteté ou sa texture. La texture permet de reconnaître des points homologues. Elle provient de résidus d'objets sur la plage (restes de végétation d'algues, de déchets), de l'ombre provenant de variations d'orientation de la surface par rapport aux sources de lumière ambiante, ou encore de variations d'humidité ou de matière organique dans le sable de la dune. La technique de la photogrammétrie est limitée par rapport à ce que le capteur de l'image peut détecter (difficulté en cas de forte luminosité, canopée...) (Figure 5).

Principe du LiDAR

Le capteur LiDAR (*Light Detection And Ranging*) permet de « scanner » le sol au moyen de l'émission-réception d'un signal laser (Figure 5). A l'inverse de la photogrammétrie, c'est un *capteur actif*, car il émet une impulsion de lumière plutôt que de détecter l'énergie émise par les objets au sol. Quand il est aéroporté, il doit être couplé avec une station inertielle pour prendre en compte les mouvements du porteur et d'un système GNSS afin d'obtenir une précision absolue optimale.

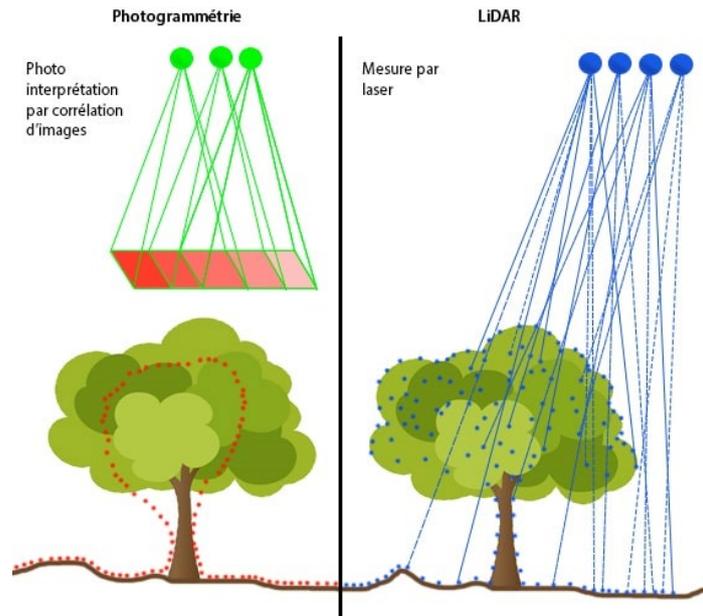


Figure 5 - Présentation des acquisitions par photogrammétrie et par LiDAR (©Escadrone)

2.4. METHODE DU CONTROLE "QUALITE"

La méthode de vérification s'appuie sur celle détaillée par Ayache et David (2024) pour la comparaison annuelle des données LiDAR de l'OCNA.

2.4.1. Vérification planimétrique

Le positionnement planimétrique est vérifié par des objets mesurés sur le terrain, visibles à la fois sur les photos aériennes et dans le signal du LiDAR. Dans le cadre de ce levé, le prestataire a eu recours à des cibles à damiers d'1m x 1m, posées sur le sable, relevées à l'aide d'un DGPS (Figure 6). Au total, dix cibles ont permis de caler le modèle. D'autres cibles de vérification ainsi que des points remarquables présents sur la dune (végétation, souche d'arbre, etc.) ont été levées en parallèle des points de calage. Ces points servent à valider la précision des coordonnées x et y des livrables, à partir de l'orthophotographie réalisée.

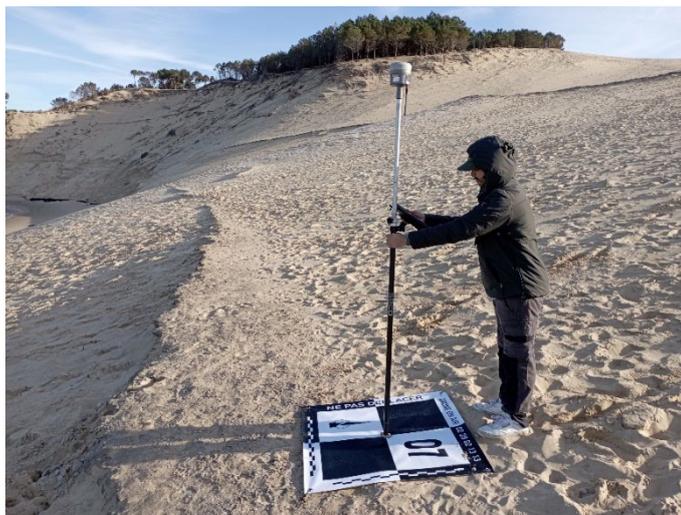


Figure 6 - Levé au DGPS d'une cible d'1m x 1m en bâche (design de la cible ©BRGM) (Photo ©BRGM)

2.4.2. Vérification altimétrique

L'analyse statistique est réalisée à l'aide d'un logiciel SIG et d'un logiciel de traitement de nuage de points CloudCompare⁴.

L'objet étudié est en 3 dimensions. Pour déterminer l'erreur entre un point du nuage de points et un point de contrôle, la distance orthogonale entre le point du nuage et celui de contrôle le plus proche a été calculée. Ce calcul s'est basé sur une sphère autour du point de contrôle, modélisée sous CloudCompare. Cette distance a été déterminée pour la totalité des points de contrôle.

La qualité altimétrique est évaluée à partir de la racine de l'erreur quadratique moyenne (EQMz) en altitude :

$$EQMz (MNT \text{ ou Nuage de points sol}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (ZLi - Zci)^2}{n}}$$

avec (ZLi-Zci) : distance orthogonale entre le point issu du LiDAR et le point de contrôle relevé au DGPS et n : le nombre total de points de contrôle.

Cette comparaison a pour intérêt de quantifier la précision, la fiabilité et l'exactitude des données spatiales et d'identifier les erreurs potentielles dans une optique d'amélioration des méthodes d'acquisition et de traitements des données.

⁴ www.danielgm.net/cc

3. Résultats

3.1. ACQUISITION PHOTOGRAMMETRIE PAR LE PRESTATAIRE

À la suite de l'acquisition d'images drone pour réaliser la photogrammétrie, le prestataire a fourni un nuage de points photogrammétriques, qui contient plus de 68,7 millions de points pour les 170 ha de la zone d'étude, et une orthophotographie d'une résolution de 2 cm (Figure 7). L'algorithme du logiciel de traitement utilisé par le prestataire n'a pas permis de détecter suffisamment de points communs entre les images pour permettre l'alignement de celles-ci et un calcul optimal de la géométrie. Cette difficulté engendre un manque important de données sur la partie sommitale de la dune (Figure 7 b). Seules les images de l'estran et de la façade maritime de la zone d'étude présentent une densité de points suffisante permettant de générer l'orthophotographie et le nuage de points (polygone vert de la Figure 7).

Pour réaliser l'orthophotographie, une partie du nuage de points a été interpolée afin de compléter les données manquantes. Cependant, le résultat demeure insatisfaisant du fait de l'absence de données à certains endroits et le manque de netteté des zones interpolées.

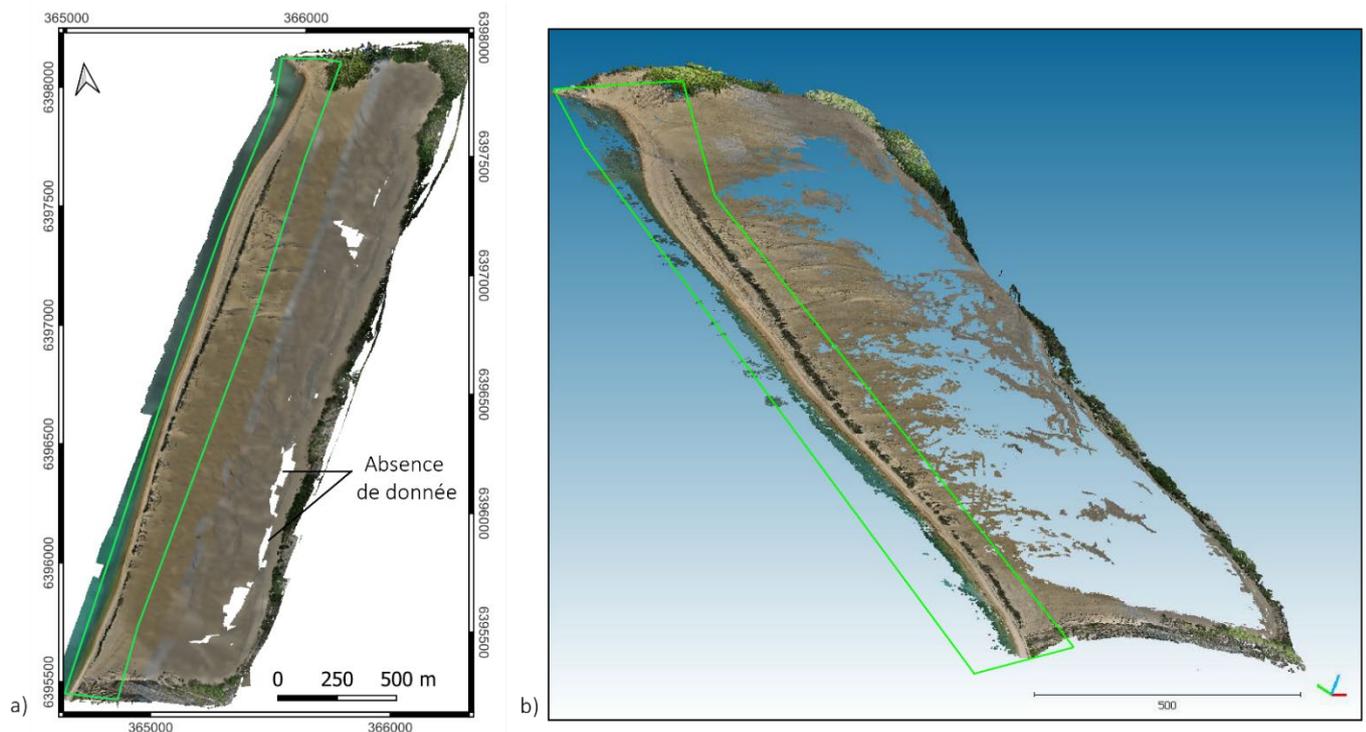


Figure 7 - a) Orthophotographie d'une résolution de 2 cm, issue du traitement par photogrammétrie des images drone (Les zones blanches correspondent à des secteurs sans données) ; b) Nuage de points issu du traitement par photogrammétrie, la majeure partie sommitale de la dune n'est pas cartographiée ; Le polygone vert correspond à l'estran et le bas de la Dune du Pilat

Différentes raisons peuvent expliquer la difficulté à cartographier la partie sommitale de la dune par photogrammétrie :

- ① la surface n'était pas assez variée et texturée pour permettre au logiciel de procéder à la phase d'appariement des images nécessaire au calcul de géométrie. Cette homogénéité s'explique généralement par l'absence de végétation ou/et de figure sédimentaire sur la partie sommitale ;

- ❶ la présence d'un masque à la surface de la dune au moment de la captation, liée aux phénomènes de suspension et de saltation des grains de sable sous l'action du vent (Figure 8) qui participe à l'absence de texture variée de la dune.



Figure 8 - Phénomène de mise en suspension et de saltation du sable sur le sommet de la Dune du Pilat, le 17 octobre 2023 (©BRGM)

3.2. ACQUISITION LIDAR PAR LE PRESTATAIRE

A la suite de ce constat, la société Drone On Air, conformément au cahier des charges, a effectué un nouveau survol en drone en utilisant un capteur LiDAR. Contrairement à la photogrammétrie, la technologie LiDAR utilise un capteur actif, dont la performance est relativement indépendante de l'état de surface du sol. Le prestataire a réalisé deux vols : le 14 février et le 15 février 2024.

Les différentes acquisitions ont débouché sur la production d'un nuage de points 3D LiDAR original, avec environ 750 pts/m² (non livré au BRGM). Le nuage livré a été rééchantillonné afin de réaliser un nuage de points régulier d'une densité de 100 pts/m², pour une surface de 160 ha. Celui-ci contient plus de 160 millions de points et concerne uniquement le vol du 14 février. Le prestataire a expliqué n'avoir pas pu recalibrer les deux sessions de vol. Ce faisant, le BRGM n'est pas en mesure d'analyser le continuum dune-estran, comme anticipé à la commande. Les données analysées ne concerneront donc que la partie supratidale de la zone d'étude.

Ainsi, à partir de ce nuage de points 3D, les produits cartographiques suivants ont été générés (Figure 9) :

- ❶ un modèle numérique de surface (MNS), utilisant les points les plus élevés du nuage de points 3D, interpolés à 10 cm/pixel. Il représente les éléments bruts du terrain comprenant le sol et la végétation ;
- ❷ un modèle numérique de terrain (MNT) compilant seulement les points 3D classés « sol », puis interpolés à 10 cm/pixel. Il représente la morphologie du terrain. La majorité du MNS est confondue avec le MNT car le secteur levé présente de la végétation principalement sur les bords du secteur d'étude.

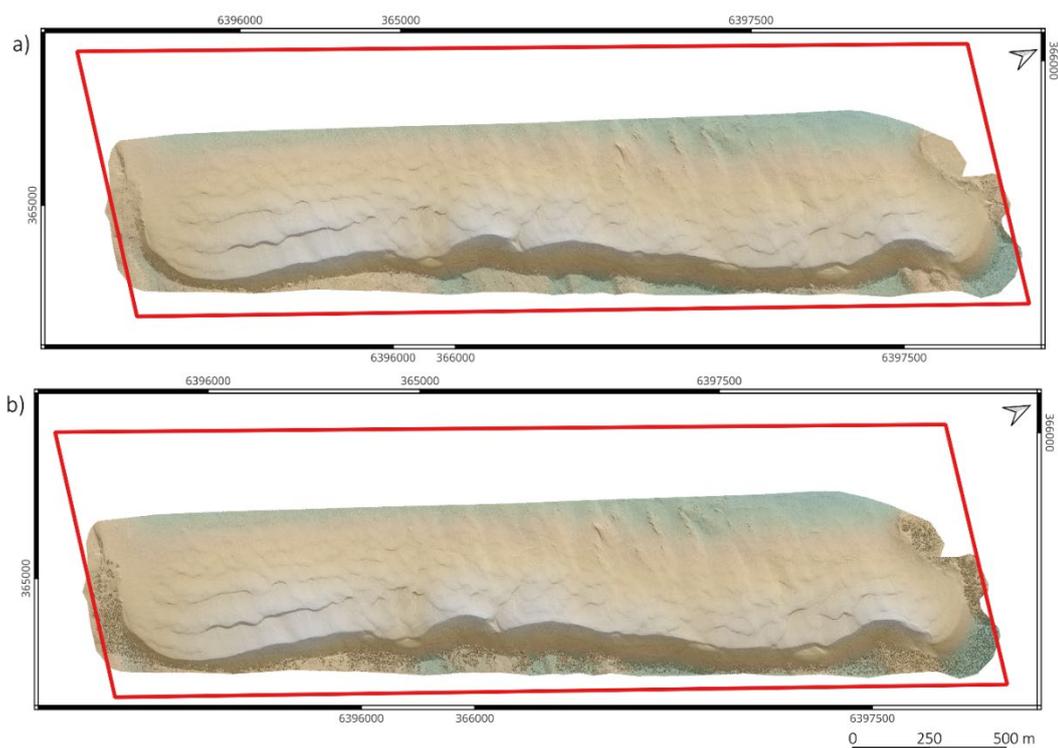


Figure 9 - a) Modèle numérique de terrain (MNT) et b) Modèle numérique de surface (MNS) de la Dune du Pilat acquis par drone en février 2024 ; l'emprise rouge correspond à l'emprise initialement attendue dans le cadre du CCTP ; le carroyage est désorienté pour faciliter la représentation (flèche du nord indiqué dans le coin supérieur droit)

3.2.1. Vérification altimétrique du MNT et du nuage de points

Le 14 février 2024, 809 points de contrôle, répartis uniformément dans la zone d'étude, ont été relevés au DGPS au même moment que le levé drone. La répartition des points de contrôle se base sur les 4 profils topographiques historiques de l'OCNA et sur une distribution spatiale homogène entre ces 4 profils (Figure 10).

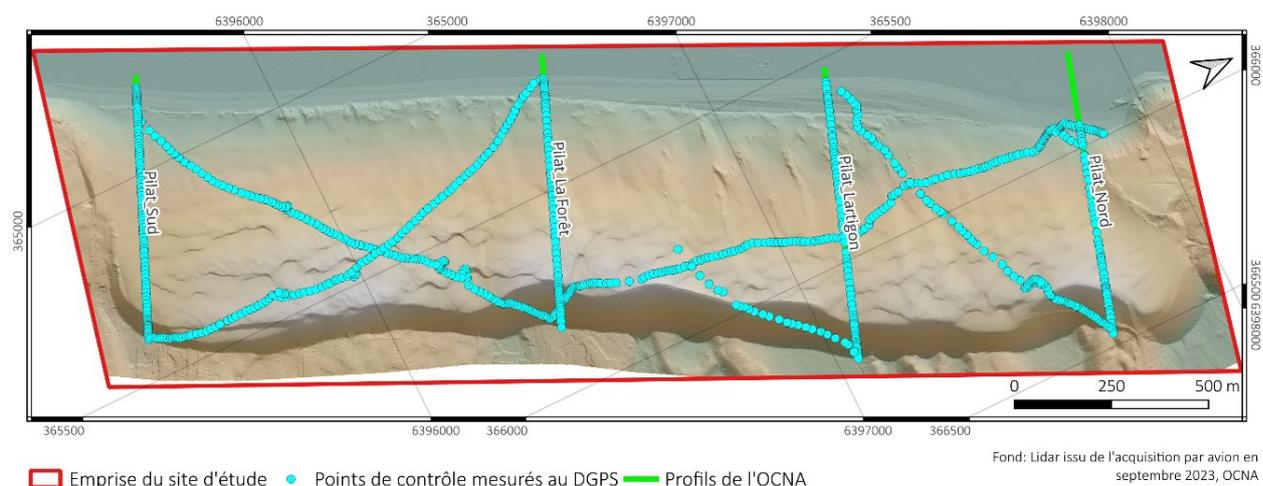


Figure 10 - 809 points de contrôle relevés au DGPS dans la totalité de la zone d'étude (fond = MNT issu de la campagne annuelle LiDAR de septembre 2023, réalisée par avion ; carroyage désorienté pour faciliter la représentation (flèche du nord indiqué dans le coin supérieur droit))

Compte tenu du rééchantillonnage du nuage de points à 100 pts/m² et la résolution du MNT de 10 cm/pixel fournis par le prestataire, les comparaisons du nuage de points et du MNT avec les points de contrôle donnent des résultats semblables. En l'absence des données LiDAR pour l'estran et le bas de la dune, seuls les points de contrôle (sur les 809 points mesurés) recoupant l'acquisition du prestataire ont été utilisés pour comparer les données : soit 678 points de contrôle au total.

La racine de l'erreur quadratique moyenne calculée pour la totalité des points communs entre les acquisitions, tout au long du secteur d'étude, est de 8,0 cm, soit du même ordre de grandeur que le pixel de rééchantillonnage (Tableau 2).

Nombre points de contrôle	678
EMQz [m]	0,080
Ecart min [m]	-0,39
Ecart max [m]	0,32
Ecart min abs [m]	0,00
Ecart max abs [m]	0,39
Ecart moyen abs [m]	0,06
Nb<abs(0,03m) [pts]	181
Nb< abs 0,05m [pts]	339
Nb< abs(0,1m) [pts]	581
%< abs(0,03m) [%]	27
%< abs(0,05m) [%]	50
%< abs(0,1m) [%]	86
Nb 1er Quartile [pts]	172
Nb 2e Quartile [pts]	339
Nb 3e Quartile [pts]	509
Nb 4e Quartile [pts]	678
% 1er Quartile [%]	25,4
% 2e Quartile [%]	50,0
% 3e Quartile [%]	75,1
% 4e Quartile [%]	100

Tableau 2 - Statistiques des différences observées entre le nuage de points LiDAR et les points de référence

La spatialisation des écarts entre les points de contrôle et les données LiDAR permet d'identifier les causes des différences observées. Ainsi les plus gros écarts (> 10 cm) sont situés principalement au bord de la zone de captation (points bleus sur la Figure 11). Ces zones constituent les limites de vol pour le drone et ne permettent pas d'avoir un recouvrement suffisant entre les différentes lignes de vols pour assurer une mesure fiable. La majorité des points de l'histogramme sont centrés autour de 0,9 cm, avec 78 % des points qui ont une différence d'altitude inférieure à 5,3 cm (Figure 11).

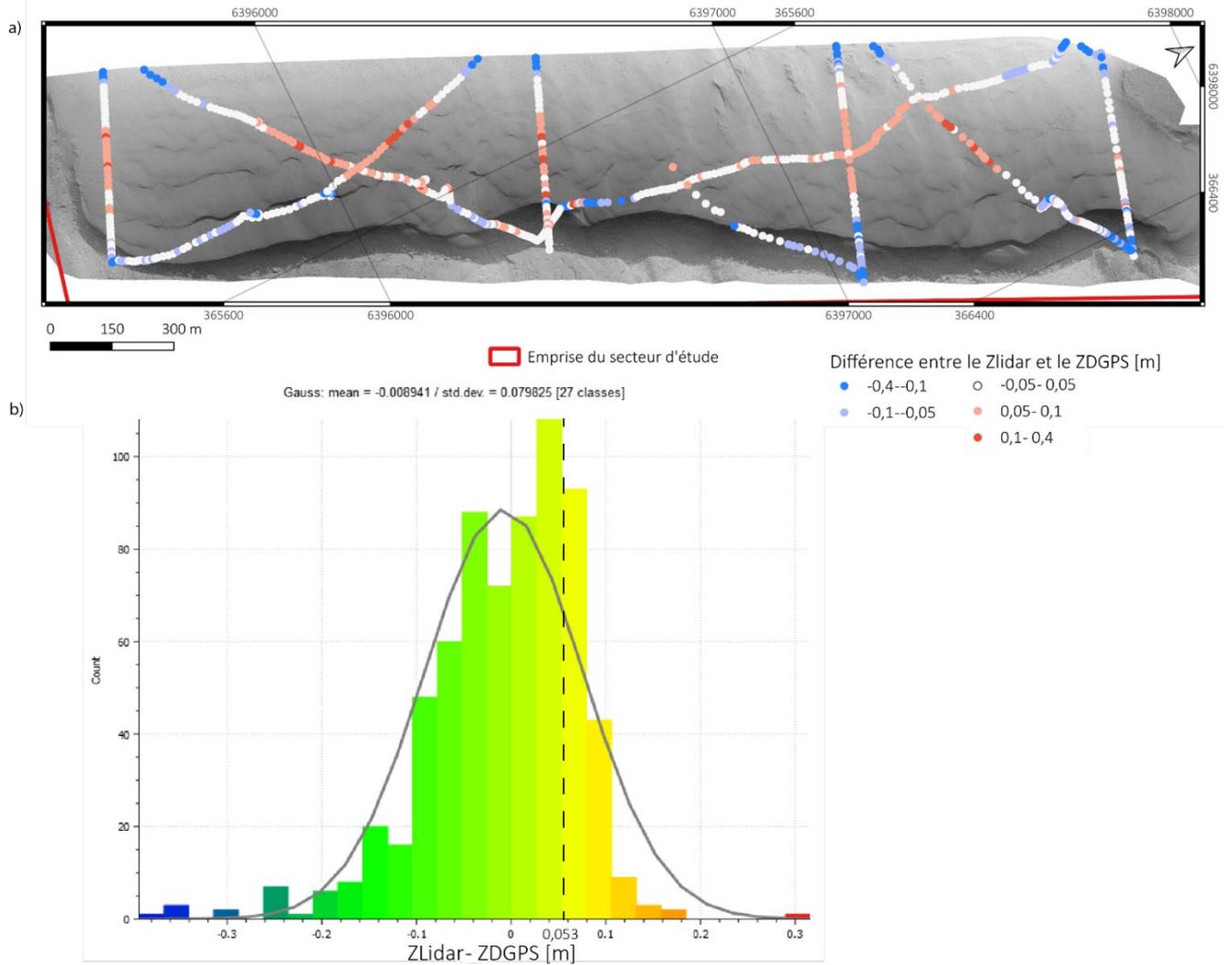


Figure 11 - a) Répartition spatiale de l'ensemble des points de contrôle prenant en compte la différence entre l'altitude du nuage de points issu du levé LiDAR par drone du 14 février 2024 (Z_{LiDAR}) et l'altitude des points de contrôle levés au DGPS le 14 février 2024 (Z_{DGPS}); b) Histogramme de la différence entre les altitudes du nuage de points LiDAR et des données DGPS; La ligne grise est une courbe de Gauss dont la moyenne est autour de -0,9 cm

3.2.2. Vérification planimétrique

En absence d'orthophotographie fournie par le prestataire, il n'a pas été possible de contrôler la planimétrie du levé LiDAR.

4. Discussion

4.1. SYNTHÈSE

Malgré des difficultés d'acquisitions et de post-traitement par le prestataire retenu, les levés topographiques par drone ont permis de réaliser un Modèle Numérique de Terrain à partir du pas de 10 cm/pixel, qui couvre plus de 90% de l'emprise initiale. Le biais altimétrique entre les données LiDAR et les données au DGPS est inférieur à -1 cm, et plus de 78% des points de contrôle montrent des écarts d'altitude inférieurs à 5,3cm. Ce produit final, conforme avec le CCTP, présente donc l'intérêt d'obtenir des mesures topographiques très précises sur une surface de plusieurs centaines d'hectares.

La comparaison des données LiDAR, avec 678 points de contrôle acquis au DGPS, montre que la qualité du MNT de 10 cm de résolution obtenu est satisfaisante, avec une racine de l'erreur moyenne quadratique de 8 cm. En comparaison, les données LiDAR acquises dans le cadre de l'OCNA, en 2023, par avion, présente une racine de l'erreur moyenne quadratique de 6,7 cm pour un MNT d'une résolution d'1 m (Ayache *et al.*, 2024). La différence peut s'expliquer par le nombre et par la localisation des points de contrôle. Pour le levé des données LiDAR par drone, la totalité des points a été retenue pour analyser la qualité du MNT et notamment ceux aux ruptures de pentes et aux extrémités, qui peuvent présenter des différences plus importantes, liées aux limites du capteur et de la captation.

Dans le cadre de cette expérimentation, les acquisitions par drone, que ce soit pour de la photogrammétrie ou par LiDAR, présentent différentes limites et contraintes :

- ① des limites dans les conditions d'acquisition : les acquisitions par drone présentent des contraintes de vol (impossibilité de voler sur le créneau initialement envisagé au printemps, lignes de vol à adapter pour une couverture complète du secteur d'étude) et des contraintes météorologiques ;
- ① des limites techniques de la méthode de photogrammétrie : l'absence de contrastes dans ce milieu dunaire dépourvu en grande partie de végétation, et la perturbation liée au sable en suspension à la surface de la dune, n'ont pas permis au prestataire de restituer le résultat demandé (orthophotographie et produit topographique) ;
- ① des contraintes techniques en matière de post-traitement : le manque de l'emprise totale lors de l'acquisition LiDAR traduit les limites à caler le continuum entre deux vols, en x, y et z, lors du post-traitement par le prestataire.

En parallèle des vols drone, les levés au DGPS, réalisés par le BRGM/OCNA, ont consisté à mesurer in-situ l'altitude du sol, avec une antenne mobile et une base (*cf.* §2.3). Ces levés sont facilement déployables, nécessitent peu de temps de post-traitement et ont une précision de l'ordre du centimètre. Étant donné que les transects de mesure sont parcourus à pied, les surfaces délimitées sont dépendantes du temps d'acquisition disponible et sont par conséquent souvent réduites à des mesures de profils ou à des points de contrôle. Même si la technologie progresse et qu'avec les drones RTK (*Real Time Kinematic*), il est théoriquement possible de s'affranchir des points de contrôle au sol (Belloni *et al.*, 2022), il n'est cependant pas recommandé de s'en passer car les levés au DGPS demeurent la technique la plus fiable et la plus simple à mettre en œuvre pour s'assurer d'une précision absolue au centimètre pour le MNT produit.

Pour discuter de la pertinence du déploiement d'un drone dans l'acquisition de données topographiques, il est nécessaire de comparer sa mise en œuvre à partir de différents critères que ce soit économique, qualité du rendu, champs d'action et post-traitement. Ainsi, les analyses détaillées par la suite s'attacheront à comparer les vecteurs utilisés (drone vs avion / hélicoptère vs levé pédestre) et les techniques d'acquisition (LiDAR vs photogrammétrie vs DGPS).

4.2. CHOIX DU VECTEUR DANS LES ACQUISITIONS TOPOGRAPHIQUES

Pour cartographier une surface telle que celle de la Dune du Pilat, de l'ordre de 170 ha, avec une résolution décimétrique, la préparation des vols, la mobilisation/démobilisation du matériel topographique (capteur, station inertielle etc.) et la mobilisation d'un avion/hélicoptère (distance entre l'aérodrome et le site d'étude, carburant, pilote, etc.) entraînent des coûts d'acquisition environ 3 à 5 fois plus élevés pour un levé par avion ou hélicoptère que par drone.

Bien que le déploiement d'un drone soit soumis aux limites réglementaires, comme cela a été le cas lors du vol initial prévu pour l'été 2023, annulé à cause d'un arrêté municipal interdisant tous survols de la dune par un drone, la mobilisation de celui-ci reste plus flexible en termes de mise en œuvre du fait de sa rapidité de déploiement, comparativement à celle d'un hélicoptère ou avion (autorisation de vols, créneau d'aéroports, etc.).

Pour des grands linéaires et surfaces d'étude, les levés par aéronefs avec pilotes (avion/hélicoptère) présentent l'avantage d'être plus économiques, car les acquisitions se déroulent à des altitudes plus hautes, sur des temps plus réduits et par conséquent sur de plus grandes distances. Pour ces grandes surfaces, de plusieurs centaines de kilomètres carrés, les avions sont donc plus adaptés que les drones pour acquérir de la donnée topographique à une haute précision.

D'un point de vue environnemental, pour une même distance parcourue, les émissions totales de CO₂ de l'hélicoptère sont 4,7 fois plus élevées que celles du drone, et celles de l'avion 1,4 fois plus élevées que celles du drone (Bachelier C. *et al.*, 2022). Contrairement aux aéronefs avec pilote, le drone, qui vole à de plus basses altitudes, peut représenter une nuisance et un stress environnemental, notamment auprès des oiseaux dans les zones de nidification.

Le choix entre le drone ou l'avion se fait en fonction de l'objectif scientifique et de l'objet étudié. Ainsi pour des objets de surfaces de moindre importance, avec une dynamique sédimentaire rapide, et pour lesquels il est intéressant d'obtenir des données rapidement et fréquemment, le vecteur drone est plus pertinent que l'avion ou l'hélicoptère. En Nouvelle-Aquitaine, le drone est particulièrement adapté pour des surfaces de quelques centaines d'hectares tels que les plages de poches, la Dune du Pilat, le banc d'Arguin ou encore les côtes rocheuses ou certaines côtes sableuses des Landes.

Enfin en comparaison, sans prendre en compte le coût d'investissement du matériel, à surface constante, les levés au DGPS qui se déroulent à pied et qui mesurent des chaînes de points discrets, nécessitent plus de temps d'acquisition et donc un coût plus élevé que l'acquisition par drone.

Le Tableau 3 regroupe les principaux paramètres de comparaison entre un levé topographique, que ce soit LiDAR ou photogrammétrique, en fonction du vecteur utilisé : drone ou aéronef avec pilote embarqué (avion/hélicoptère) ou non aéroporté.

Critères \ Vecteur	Drone	Aéronefs avec pilote (avion/hélicoptère)	Non aéroporté (pédestre)
Coût	Coût 3 à 5x moins cher que l'avion	Mise en œuvre coûteuse sur les petites surfaces	Coût humain lié au temps passé à acquérir la donnée. Pour les moyennes/grandes surfaces l'acquisition à pied est très onéreuse.
Linéaire côtier ou surface parcourus en 1 journée	Quelques kilomètres soit une centaine d'hectare	Plusieurs centaines de kilomètres et plusieurs centaines d'hectare	Quelques kilomètres très faible surface (inf. à l'hectare)
Contraintes réglementaires	Limité par la réglementation en vigueur (arrêté municipal, zone de survol)	Réglementation aéroportuaire et de vol	Peu de réglementation
Contraintes techniques	Facilement et rapidement déployable	Nécessité de mobiliser de lourd moyen matériel et humain	Limite d'accès physique
Météorologique lors du déploiement	Absence de pluie et faible vent	Peu de couverture nuageuse	Absence de pluie
Temps de mise en œuvre	Préparation de qqs jours à semaines	Préparations de plusieurs semaines à mois	Préparation de qqs jours à semaines
Impact environnemental	Nuisances éventuelles pour les oiseaux (secteur de nidification ou autres)	Emission de CO ₂ , de 1,4 à 4,7 fois plus élevé que pour le drone	Relativement faible déplacement à pieds

Tableau 3 - Comparaison entre les vecteurs drone, les aéronefs avec pilotes et les techniques non aéroportées, pour différents critères économiques, techniques et environnementaux

4.3. CHOIX DU CAPTEUR D'ACQUISITION : PHOTOGRAMMETRIE VS LIDAR

Avec le recul de cette étude, la photogrammétrie présente des difficultés pour les objets qui ont peu de variation texturée ou dans des conditions météorologiques défavorables. Le temps d'acquisition pour la photogrammétrie est également un peu plus long, car il est nécessaire d'avoir un recouvrement longitudinal et latéral compris entre 50 et 70% entre les images, alors que pour les données LiDAR, il est nécessaire d'avoir un chevauchement de 30 à 40% entre les lignes de vol. Pour des petites surfaces, cette différence de temps peut être considérée comme négligeable.

En termes de post-traitement, dans le cas où il est nécessaire de classifier le nuage de points obtenu, le traitement des images et des données LiDAR représente environ le même temps. Pour les deux technologies, comme les données sont calées sur des points de contrôle mesurés avec une mesure GNSS, il est possible d'obtenir des modèles numériques de terrain d'une résolution de 10 cm et d'une précision absolue inférieure à 10 cm. En termes d'application, une telle précision est nécessaire pour comparer deux nuages de points entre eux et obtenir des volumes de déplacement des sédiments.

Dans le cas de notre étude, la photogrammétrie s'est montrée concluante dans la zone intertidale et le bas de la Dune du Pilat. Le survol LiDAR de la zone de l'estran n'a pas pu être géoréférencé dans sa totalité. Le protocole mis en œuvre par le prestataire lors de l'acquisition LiDAR n'a pas été optimal, s'appuyant sur des cibles de calage mesurées au DGPS la veille, et qui ont pu être remobilisées par le vent ou des personnes. Cet écueil pourrait être évité via la mise en œuvre d'un protocole strict comprenant une mesure des cibles synchrone avec le levé topographique LiDAR.

A l'investissement, le capteur LiDAR présente un coût non négligeable, contrairement à la photogrammétrie qui est uniquement un capteur photographique. En fonctionnement, les deux technologies ont des coûts analogues quel que soit le vecteur utilisé.

Étant donné que le LiDAR est un capteur actif, les rayons émis par celui-ci peuvent traverser la canopée et renseigner sur la topographie du sol. Cette caractéristique permet au LiDAR d'avoir un champ d'action complet sur les environnements côtiers. Néanmoins, pour obtenir une orthophotographie en parallèle d'un MNT, il est nécessaire de coupler le LiDAR avec un capteur passif qui acquiert les images.

Enfin, les levés réalisés par DGPS permettent d'acquérir de la donnée de très haute précision (au cm) ; le matériel représente un investissement à l'achat mais, facilement mobilisable et demandant peu de post-traitement, il peut être rapidement amorti. Comparé aux autres techniques, le DGPS concerne des points discrets dans l'espace sans information contextuelle comme un nuage photogrammétrique ou LiDAR. Pour une comparaison diachronique, il est très complexe de comparer les mêmes points dans l'espace/temps. En revanche, l'exactitude des levés, lorsqu'ils sont raccordés au réseau géodésique permanent, apporte des contraintes fortes sur les données LiDAR et photogrammétriques dans l'espace et le temps. Le DGPS assure donc une grande confiance quant à la position de quelques points et le LiDAR et la photogrammétrie apportent une information contextuelle riche et continue de l'environnement.

Ce type de levé est complémentaire aux deux autres : il permet de caler les modèles des techniques aéroportées et d'en valider la précision.

Le Tableau 4 regroupe les principaux paramètres de comparaison entre un levé LiDAR, un levé par photogrammétrie et un levé au DGPS, en fonction de différents critères d'analyse.

Critères \ Capteur	LiDAR	Photogrammétrie	DGPS
Champs d'action	Capteur actif, opérationnel dans tous les milieux, fournit un produit topographique mais nécessite un capteur photographique supplémentaire pour livrer une orthophotographie	Capteur passif dépendant des conditions météorologiques. performant sur des milieux présentant des contrastes de texture marqués. Fournit un produit topographique et une orthophotographie	Déployable dans tous les milieux limité par l'approche d'accès à pieds. Ne permet pas de réaliser une orthophotographie
Temps de post-traitement	Modéré	Modéré à long	Court à modéré si réalisation d'un MNT
Résolution du MNT final	Précision absolue de l'ordre de 5 et 10cm	Précision absolue de l'ordre de 10cm	Précision absolue de l'ordre de qqs cm
Coût	Investissement onéreux (~10k€)	Capteur photographique relativement peu onéreux	Investissement onéreux (entre 10k€ et 30k€)

Tableau 4 - Comparaison entre le LiDAR et la photogrammétrie, en fonction de critère d'opérabilité, de qualité de rendu et de coût

Le vecteur drone, dans l'acquisition de données topographiques a déjà fait ses preuves dans plusieurs milieux côtiers et malgré les difficultés rencontrées, il s'est montré concluant dans cet environnement dunaire. Compte tenu de l'objet peu texturé qu'est la dune, le LiDAR s'est montré plus fiable que la photogrammétrie.

L'expérimentation menée dans cette étude, ayant mobilisé deux capteurs distincts, témoigne de la nécessité de la mise en œuvre de protocoles d'acquisition adaptés au résultat attendu (points de calage, lignes de vol, contraintes météorologiques), et d'un post-traitement rigoureux. Les protocoles d'acquisition en photogrammétrie continuent de progresser, notamment dans les environnements complexes, avec la prise en compte de nouvelles stratégies d'acquisition, comme l'utilisation de grilles croisées ou d'images obliques permettant de consolider la géométrie de la structure observée et d'améliorer la précision sur les altitudes mesurées (Elias *et al.*, 2024).

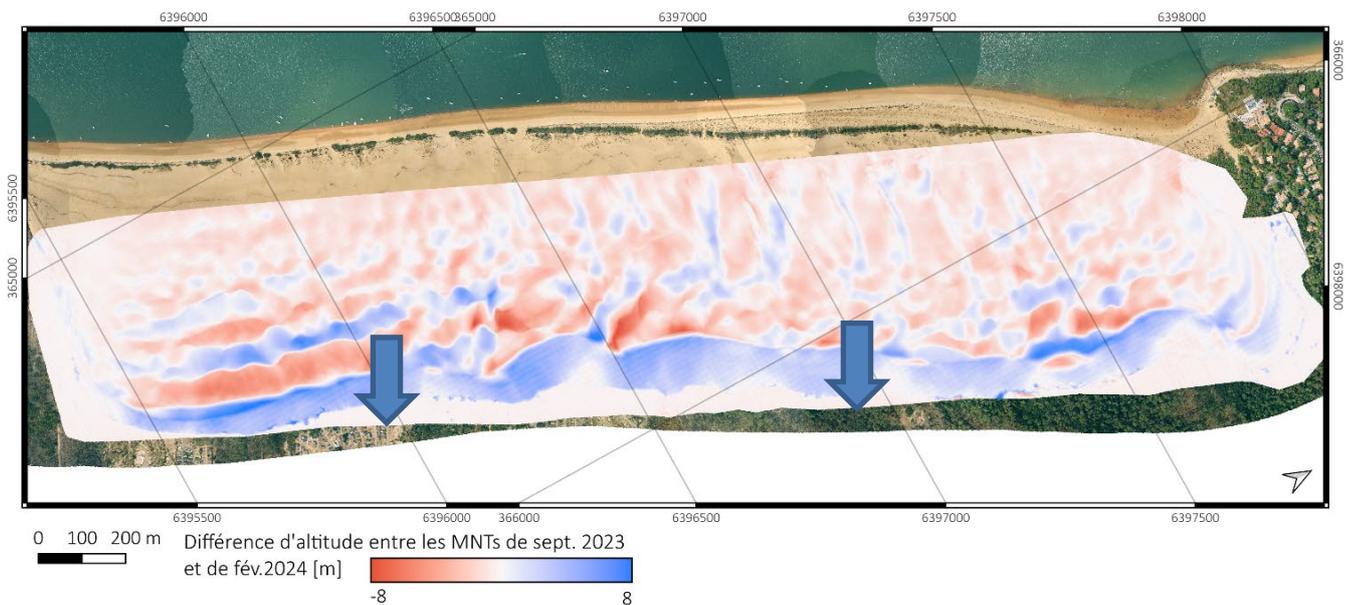
4.4. EXEMPLE D'APPLICATION DU LEVE TOPOGRAPHIQUE PAR DRONE SUR LA DUNE DU PILAT

L'intérêt principal des levés topographiques par drone est de comparer des informations spatiales acquises à des époques différentes, afin d'analyser les évolutions sédimentaires du milieu.

Ainsi la Figure 12 présente le différentiel d'altitude entre le MNT, acquis par l'OCNA à l'aide d'un capteur LiDAR embarqué sur un avion en septembre 2023, et le MNT, acquis par LiDAR embarqué sur un drone en février 2024.

Les couleurs renseignent sur les déplacements sédimentaires entre ces deux dates, grâce à l'altitude en chaque point : le rouge indique une perte d'altitude entre septembre 2023 et avril 2024, et inversement, le bleu indique un gain d'altitude entre ces deux dates. Ainsi pendant la saison hivernale, le différentiel montre un déplacement de la dune vers la forêt, avec une avancée du flanc court (flèches bleues de la Figure 12). Pour approfondir l'analyse, il serait nécessaire de ramener ce différentiel à la surface, pour en déduire un volume de déplacement. Ce travail ne fait pas partie de cette étude.

Compte-tenu de la taille de l'emprise, le calcul des volumes est sensible à la précision de l'altitude obtenue. Il est préférable de travailler à une précision absolue, i.e. rapporté au système référentiel terrestre, si les moyens d'acquisition sont différents (LiDAR, photogrammétrie, etc.). Si ce sont les mêmes protocoles d'acquisition (capteur, méthode, etc.) mis en place, il est alors possible de travailler avec une précision relative entre les jeux de données.



5. Conclusion

Dans un contexte côtier de dune, présentant des fortes pentes topographiques et un sol peu texturé, le levé topographique à l'aide d'un capteur drone a rempli la majorité des objectifs initiaux. Malgré les limites d'acquisition, une cartographie précise (MNT de 10 cm de résolution et exacte à +/-8 cm) a pu être dressée pour la majorité de la zone d'étude.

Les comparaisons des méthodes d'acquisition et des vecteurs montrent que le drone représente un outil novateur et performant dans la cartographie des environnements côtiers. Facilement déployable, pour un coût faible, il permet d'acquérir de la donnée à haute fréquence et de haute précision sur des surfaces d'une centaine d'hectares. Même si, par rapport au LiDAR, la photogrammétrie présente actuellement des limites liées à l'environnement d'acquisition, les évolutions en la matière sont fréquentes et présentent des perspectives encourageantes (adaptation à l'aide de vols obliques, des hauteurs de vols, rigueur d'acquisition et du post-traitement).

En parallèle, les levés topographiques au DGPS sont complémentaires au levé drone, car ils permettent de déterminer la qualité de la donnée produite. Le DGPS demeure une technique maîtrisée, fiable, rapide et simple à mettre en œuvre, pour couvrir de faibles surfaces ou de simples profils, tout en garantissant une précision absolue au centimètre. Réalisées depuis 2009, les campagnes d'acquisition au DGPS constituent un socle de connaissances nécessaire pour l'amélioration de la compréhension des processus d'évolution sédimentaire de la dune.

À l'échelle de la Nouvelle-Aquitaine, le levé drone peut être déployé pour l'ensemble des environnements côtiers qui composent le littoral. Adapté pour les côtes rocheuses et les plages de poches, il est pertinent pour suivre des cellules hydrosédimentaires dynamiques et relativement peu étendues (quelques kilomètres de linéaire côtier ou des surfaces d'une centaine d'hectares), tels que la Dune du Pilat, le banc d'Arguin, un système de barre-bâines ou encore des embouchures. Pour couvrir de grandes surfaces, l'avion représente le vecteur d'acquisition le plus rentable et rapide pour acquérir de la donnée topographique de haute précision.

Ainsi, cette expérimentation a démontré la capacité du drone à opérer des levés topographiques de précision, moyennant le déploiement d'un capteur adapté et la mise en place d'un protocole et d'un post-traitement rigoureux. Dans les environnements côtiers, ils sont notamment pertinents pour caractériser la dynamique sédimentaire d'un site, en appui aux gestionnaires des espaces littoraux.

6. Bibliographie

- Ayache, B., David, E., 2024. Avis technique relatif à la qualité du lidar et de l'orthophotographie 2023, acquis dans le cadre de l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine.
- Bachelier C., Duhamel P., Campanaro P., Vallée P., 2022. Enjeux environnementaux des activités aériennes par drones. ADIF v5, 12 p.
- Belloni, V., Fugazza, D., Di Rita, M., 2022. UAV-BASED GLACIER MONITORING: GNSS KINEMATIC TRACK POST-PROCESSING AND DIRECT GEOREFERENCING FOR ACCURATE RECONSTRUCTIONS IN CHALLENGING ENVIRONMENTS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLIII-B1-2022, 367–373. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2022-367-2022>
- Belon, R., De La Torre, Y., Sibert, V., Mouroux, X., 2015. Contribution des relevés photogrammétriques par drone pour l'analyse de la dynamique côtière – Application sur un site de la côte sableuse catalane, in: Edition 3, Ferrare, Italie. Presented at the Conférence Méditerranéenne Côtière et Maritime - Coastal and Maritime Mediterranean Conference, Editions Paralia, pp. 1–6. <https://doi.org/10.5150/cmcm.2015.001>
- Brunier, G., Fleury, J., Anthony, E.J., Gardel, A., Dussouillez, P., 2016. Close-range airborne Structure-from-Motion Photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: Examples from an embayed rotating beach. *Geomorphology* 261, 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.025>
- Castelle, B., Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Michalet, R., Rosebery, D., Bujan, S., Lubac, B., Bernard, J.-B., Valance, A., Dupont, P., Ould El Moctar, A.O.E., Narteau, C., 2019. Nature-Based Solution along High-Energy Eroding Sandy Coasts: Preliminary Tests on the Reinstatement of Natural Dynamics in Reprofiled Coastal Dunes. *Water* 11, 2518. <https://doi.org/10.3390/w11122518>
- Desmazes, F., Garcin, M., Metereau, V., Gouguet, L., Leroux, J., 2018. Utilisation des drones pour la caractérisation des phénomènes d'érosion éolienne des dunes du littoral Atlantique. Exemple des Pays de Monts, in: XVèmes Journées, La Rochelle. Presented at the Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil, Editions Paralia, pp. 353–362. <https://doi.org/10.5150/jngcgc.2018.040>
- Dewez, T.J.B., Leroux, J., Morelli, S., 2016. CLIFF COLLAPSE HAZARD FROM REPEATED MULTICOPTER UAV ACQUISITIONS: RETURN ON EXPERIENCE. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.* XLI-B5, 805–811. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B5-805-2016>
- Elias et al. - 2024 - UAS Photogrammetry for Precise Digital Elevation M.pdf, n.d.
- Gonçalves, J.A., Henriques, R., 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 104, 101–111. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009>
- Laporte-Fauret, Q., Marieu, V., Castelle, B., Michalet, R., Bujan, S., Rosebery, D., 2019. Low-Cost UAV for High-Resolution and Large-Scale Coastal Dune Change Monitoring Using Photogrammetry. *JMSE* 7, 63. <https://doi.org/10.3390/jmse7030063>
- Mallet Cyril, Millescamps Bastien, Hoareau Anaïs, 2015. Estimation de l'évolution du trait de côte aux horizons 2020-2040-2100 de la Dune du Pilat au banc du Pineau et de Capbreton à l'embouchure de l'Adour (BRGM RP-64723-FR). BRGM.



**OBSERVATOIRE DE LA CÔTE
NOUVELLE-AQUITAINE**

Réseau d'experts au service du littoral



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009

45060 - Orléans Cedex 2 - France

Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

BRGM Nouvelle-Aquitaine

Parc Technologique Europarc
24, Avenue Léonard de Vinci

33600 Pessac - France

Tél. : 05 57 26 52 70

A propos de l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine

Véritable réseau d'experts au service du littoral, l'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine est chargé de suivre l'érosion et la submersion sur le littoral régional. Le BRGM et l'ONF sont les porteurs techniques du projet, financé par l'Union Européenne (via le fonds FEDER), l'État, la Région Nouvelle-Aquitaine, les départements de la Gironde, des Landes, des Pyrénées-Atlantiques, de la Charente-Maritime, le Syndicat intercommunal du bassin d'Arcachon (SIBA), le BRGM et l'ONF.

Le rôle de l'Observatoire est de mettre au service de l'ensemble des acteurs du littoral un outil scientifique et technique d'observation, d'aide à la décision et de partage de la connaissance pour la gestion et la prévention des risques côtiers.

L'Observatoire de la côte de Nouvelle-Aquitaine travaille en étroite collaboration avec le GIP Littoral et les Universités de Bordeaux (unité mixte de recherche EPOC), de Pau et des Pays de l'Adour (laboratoire SIAME) et de La Rochelle (unité mixte de recherche LIENSs), ainsi que le Centre de la mer de Biarritz (programme ERMMA), l'Unima, le Conservatoire du littoral et le Cerema.

L'enjeu est d'accompagner les stratégies de développement durable, de manière à prendre en compte l'évolution morphologique du littoral et les richesses de son patrimoine naturel tout en s'adaptant au changement climatique.

Les actions de l'Observatoire sont multiples : mesures, suivis, expertises, diffusion des données et information vers le grand public... www.observatoire-cote-aquitaine.fr