



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**

Document à accès immédiat

# Méthodologie d'acquisition de données LiDAR par drone et perspectives de couplages géophysiques. Application à l'exploration aurifère alluvionnaire en Guyane

Rapport final

**BRGM/RP-72082-FR**

Version 1 - Septembre 2022

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

**T. Dewez, M. Chevillard, P. Le Maire, B. François, G. Aertgeerts, B. Roux,  
J. Platevoet, M. Houles**

## Vérificateur :

Nom : Guillaume Bertrand

Fonction : Responsable d'unité GEM

Date : 29/08/2022

Signature :

## Approbateur :

Nom : Christophe Didier

Fonction : Directeur des Géorressources

Date : 21/09/2022

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM  
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : [qualite@brgm.fr](mailto:qualite@brgm.fr)

## 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, Méthodes géophysiques, Prospection alluvionnaire, Exploration, Or, Guyane.

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

**T. Dewez, M. Chevillard, P. Le Maire, B. François, G. Aertgeerts, B. Roux, J. Platevoet, M. Houles (2022) –** Méthodologie d'acquisition de données LiDAR par drone et perspectives de couplages géophysiques. Application à l'exploration aurifère alluvionnaire en Guyane. Rapport final V1. BRGM/RP-72082-FR, 70 p., 43 fig., 7 tabl.

© BRGM, 2022, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.  
IM003-MT008-P2-20/01/2022

## Synthèse

Depuis quelques années, on assiste au développement de l'**imagerie par drone** dans de nombreux domaines, en particulier dans les géosciences, où ce type d'outil est de plus en plus utilisé. Bien qu'encore très spécialisé pour certaines applications, la cartographie lidar par drone voit ses coûts fortement diminuer et ses équipements être de plus en plus accessibles, concurrençant les levés aéroportés conventionnels (avion ou hélicoptère).

Dans ce contexte, la présente étude se propose de **tester la faisabilité d'un levé lidar par drone**, afin d'établir la topographie de la plaine alluviale d'une rivière en contexte forestier équatorial guyanais. Cet exercice, à vocation méthodologique, a pour objectif de **déterminer les bonnes pratiques et d'évaluer les limites d'un tel levé au couvert forestier important**, ceci dans le cadre particulier de l'évaluation du potentiel aurifère alluvionnaire d'un cours d'eau, afin de mesurer la topographie avant exploitation et de pouvoir contextualiser les informations d'exploration.

Pour cela, une mission topographique a été organisée pour tester les apports de la technologie drone dans ce type de contexte. Elle a consisté à **couvrir en lidar et photogrammétrie deux zones de 1 km<sup>2</sup>**, la surface typique d'une ARM (Autorisation de Recherche Minière). Les deux secteurs cartographiés sont situés sur les criques Georgeon et Valentin, sur le flanc nord des Montagnes Tortue, le long de la piste de Bélizon. Ils présentent des caractéristiques morphologiques différentes : la zone de Georgeon est particulièrement encaissée, avec un dénivelé de 200 m entre l'amont et l'aval, alors que la crique Valentin est une large vallée à fond plat, sans relief marqué.

Compte tenu de la surface à couvrir, le choix de l'équipement s'est porté sur un **drone à aile fixe et décollage vertical** : le Trinity F90+ de *Quantum system*, équipé du lidar léger Qube240. Comparativement aux drones multicoptères bien connus du grand public, le Trinity a une grande autonomie et ne nécessite pas de pistes d'envol. Il a effectué d'une seule traite des transits de plusieurs kilomètres et couvert l'emprise de 1 km<sup>2</sup> en une quarantaine de minutes.

La **mission d'acquisition** a été réalisée en octobre 2021 et les résultats exploités en 2022. Plusieurs vols lidars et photogrammétriques ont été réalisés. La stratégie adoptée pour les vols lidar a consisté à effectuer des premiers vols de reconnaissance à haute altitude (200 m du sol) afin d'évaluer la hauteur de la canopée, puis progressivement, l'altitude de vol a été réduite pour permettre aux rayons lidar de traverser la végétation et obtenir des points atteignant la surface du sol.

Les résultats ont permis d'obtenir une résolution satisfaisante, qui a pu être évaluée selon différents critères. Au total, sur le secteur de Georgeon, les 4 vols lidar pris en compte dans le traitement des données, ont permis de générer un nuage de points cumulé de 191,5 millions de points, à partir duquel les livrables cartographiques suivants ont été produits :

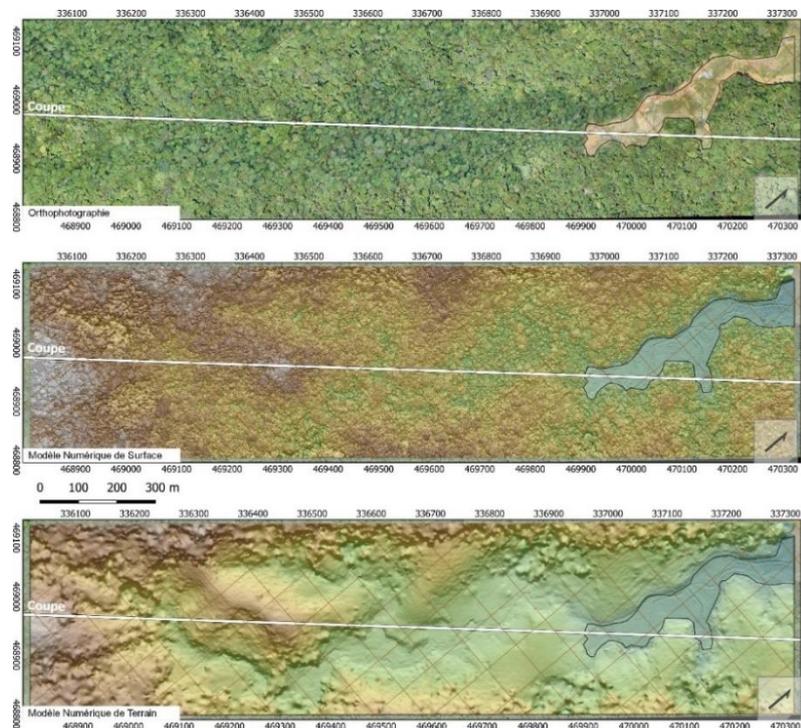
- un modèle numérique de surface (MNS) à 20 cm/pixel ;
- un modèle numérique de terrain (MNT), correspondant à l'interpolation uniquement des « points sol », à 1 m/pixel ;
- et enfin, une orthophoto à 5 cm/pixel, à partir de la compilation des photos aériennes.

L'ensemble des résultats (bruts et traités) a été discuté dans une **démarche méthodologique d'analyse des données**. Différents paramètres ont ainsi été analysés en détail, permettant

d'établir les conditions limites de ce type d'acquisition et des équipements testés. Ont été analysées en particulier i) la capacité du lidar à traverser la canopée ; ii) la densité de points à arriver au sol : 4 points sur 1 000 (1/250) sont parvenus au sol sous la forêt ; iii) la portée effective du lidar suivant l'altitude de vol : le Qube240 reste efficace jusqu'à des portées de 160-180 m même s'il est évidemment meilleur à moins de 140 m, sa portée nominale ; iv) les mailles d'interpolation à utiliser compte tenu de la dispersion des points au sol : un maillage à 10 m ne contient que 5 % de pixels d'altitude interpolée, 95 % est contraint par une altitude lidar au sol, dans un maillage à 1 m, 85 % des pixels sont interpolés. En guise de synthèse, une **comparaison des solutions drones** (à aile fixe vs multicoptère), en réponse à la problématique initiale, a été réalisée, reprenant les avantages et inconvénients de chacun des porteurs.

Au-delà de la démarche méthodologique, les données ont été recontextualisées dans une logique d'application à la prospection alluvionnaire. Une **interprétation géomorphologique** de la zone d'étude a été effectuée, ayant permis de caractériser précisément la géométrie de la vallée alluviale. Au-delà de la définition de la zone de flat, le tracé du cours d'eau, des zones de terrasse, des traces d'orpillage historique, ainsi que des glissements de terrain oblitérant localement le flat ont été mis en évidence. Les données produites y sont suffisamment fines pour venir en appui à des travaux de prospection, démontrant l'applicabilité de la méthode proposée. Bien qu'en partie déjà utilisée par la profession, cet exemple démontre une nouvelle fois **la plus-value que peut apporter une cartographie lidar** (qu'elle soit acquise par drone ou aéronef habité), comparativement aux documents conventionnels (cartes IGN, SRTM), qui généralement ne présentent pas une résolution suffisamment fine pour caractériser précisément une zone de flat.

Enfin, un travail de synthèse a été réalisé sur les **méthodes géophysiques** pouvant être adaptées à la prospection alluvionnaire, afin de mettre en perspective les outils qui pourraient être développés sur des solutions drones. Différentes méthodes de géophysique au sol, dont les profondeurs d'investigation sont de l'ordre de quelques mètres, ont été détaillées, ainsi qu'un aperçu des travaux de recherche en cours concernant **l'adaptation de ces capteurs sur drone**.



*Orthophotographie, Modèle Numérique de Surface (MNS) et Modèle Numérique de terrain (MNT) ayant été produits suite à l'acquisition lidar par drone effectuée dans le cadre de cette étude méthodologique.*

## Sommaire

<b>1. Introduction</b>	<b>11</b>
1.1. CONTEXTE	11
1.2. CADRE DE L'ÉTUDE	11
1.3. CONDITIONS DE RÉALISATION	11
1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT	12
<b>2. Méthodologie d'acquisition de données LiDAR par drone</b>	<b>15</b>
2.1. POSITIONNEMENT DU PROBLÈME	15
2.2. ZONES D'ÉTUDE	15
2.3. ÉQUIPEMENTS SÉLECTIONNÉS	18
2.3.1. Sélection du drone	18
2.3.2. Choix du lidar	19
2.3.3. Capteur photo	20
2.3.4. Système de positionnement	20
2.3.5. Drone photogrammétrique de reconnaissance	21
2.4. ACQUISITION	21
2.4.1. Déroulé de la campagne topographique	21
2.4.2. Vols et paramètres d'acquisition	21
2.4.3. Levé topographique et systèmes de validation des données	25
2.5. TRAITEMENT DES DONNÉES	28
2.5.1. Trajectoire du drone	28
2.5.2. Traitement des données photogrammétriques	28
2.5.3. Traitement des données lidar	29
2.6. RÉSULTATS	31
2.6.1. Cartographie de la crique Georgeon	31
2.6.2. Cartographie du couvert forestier avec le lidar Qube240	33
2.6.3. Interprétation géomorphologique : plaine alluviale et glissements de terrain	35
2.6.4. Applications des données dans le contexte de l'exploration alluvionnaire	38
2.7. DISCUSSION	40
2.7.1. Pénétration du lidar jusqu'au sol	40
2.7.2. Altitude de vol et portée effective du lidar	43
2.7.3. Densité de points au sol et maillage de MNT	43
2.7.4. Largeur des zones sans points sol	47
2.7.5. Choix de la technologie : Aile fixe vs Multicoptère	48
2.8. CONCLUSION	51
<b>3. Synthèse des méthodes géophysiques</b>	<b>53</b>
3.1. GÉOPHYSIQUE AU SOL	53
3.1.1. Méthodes sismiques	53
3.1.2. Radar géologique	57
3.1.3. Tomographie de résistivité électrique	58
3.1.4. Conclusion	60
3.2. GÉOPHYSIQUE PAR DRONE	61
3.2.1. Les drones	61
3.2.2. La géophysique en drone	61
3.2.3. Les verrous techniques	66
3.2.4. Conclusion	67
<b>4. Bibliographie</b>	<b>69</b>

## Liste des figures

- Figure 1 : Emprise des deux secteurs ayant été couverts dans le cadre de cette étude : la Crique Georgeon, en contexte collinaire et la Crique Valentin, en contexte de plaine. Report cartographique sur fond IGN 1/50 000 (A) et sur fond SRTM à 30 m de résolution (B). ..... 16
- Figure 2 : Vue par drone vers l'amont de la crique Georgeon dont le relief est particulièrement encaissé. Environ les deux-tiers de la surface boisée comprend des arbres de 30-35 m de hauteur, avec localement des arbres qui peuvent atteindre 65 m au-dessus du relief (photo : L'Avion Jaune). ..... 17
- Figure 3 : A. Canopée vue depuis le sol. Malgré un couvert abondant, il existe de nombreux interstices dans le feuillage qui permettent de voir le ciel. C'est par ces trouées que les rayons du lidar parviennent au sol. B. Exemple de couvert végétal dans les strates les plus proches du sol. Le sol y est recouvert d'une litière de feuilles sombre, dont l'humidité peut absorber une partie des rayons laser qui parviendraient à atteindre le sol (photos : T. Dewez). ..... 17
- Figure 4 : Drone Quantum Trinity F90+ sur son aire de décollage (photo : T. Dewez). Malgré une envergure de 2,40 m, le drone se loge démonté dans la valise à l'arrière-plan. La batterie de 64,8 Wh permet de voler pendant 1h en alimentant le lidar Yellowscan Qube240. .... 18
- Figure 5 : Lidar Qube 240 (source : L'Avion Jaune) ..... 19
- Figure 6 : Capteur Sony RX1 II intégré dans le Trinity (source : L'Avion Jaune) ..... 20
- Figure 7 : Drone DJI Mavic Pro 2. Il s'agit d'un modèle à voilure tournante de petite dimension (< 40 cm) pouvant permettre de faire facilement des vols photogrammétriques de reconnaissance dans ce type de contexte (source : BHPPhotoVideo.com, photo : M. Chevillard)..... 21
- Figure 8 : Trajectoires des 6 vols lidar Trinity réalisés sur Georgeon, le 7 octobre (à gauche), le 8 octobre (à droite, en jaune et bleu), et le 9 octobre (à droite, en rouge). Source : L'Avion Jaune. .... 23
- Figure 9 : Trajectoire des 2 vols photogrammétriques Trinity réalisés sur Georgeon, le 7 (en jaune) et 8 octobre (en rouge). Source : L'Avion Jaune. .... 23
- Figure 10 : Trajectoire des vols Trinity réalisés sur Valentin le 12 octobre. A. Vol photogrammétrique. B. Vols lidar. Source : L'Avion Jaune..... 24
- Figure 11 : Technique de validation ayant été testée au cours de la mission. Elle a consisté à placer des parasols dans des zones dégagées, afin de servir à la validation de l'altitude relative des points lidar (photo : T. Dewez). Le sommet du parasol se trouve exactement à 1,50 m du sol. .... 26
- Figure 12 : Cibles de géoréférencement photogrammétrique de 20 x 20 cm (photos : T. Dewez, M. Chevillard). A. Cible en contexte. B. Vue de détail. Le centre de la cible est percé pour planter un clou qui immobilise la cible en position. Ce clou matérialise précisément le point stationné avec la canne de l'antenne GNSS mobile (C). ..... 27
- Figure 13 : Position GNSS Trimble (points rouges) validant la position planimétrique de l'orthomosaïque. Les détails employés : rebord abrupt de berge, extrémités et points axiaux d'un tronc d'arbre, bordure d'un réservoir métallique montre la parfaite adéquation de la position entre l'orthophoto et les points de contrôle. .... 29
- Figure 14 : Visualisation du nuage de points après ajustement des lignes de vol (1 couleur par ligne de vol). Source : L'Avion Jaune. .... 30

- Figure 15 : Vue en coupe du nuage de points classé sur Georgeon. En orange, les points classés « sol » ; en vert, les points « végétation basse » ; en vert foncé, les points « végétation haute ». Image : L'Avion Jaune. .... 30
- Figure 16 : Nuage 3D des 191,5 millions de points lidar de la crique Georgeon colorisé par altitude. Dans le bas de la figure, la plaine alluviale dégagée apparaît comme une zone plane entre les versants boisés. A mi-distance et en fond de vallée, la topographie s'élève, ayant obligé le drone à garder une altitude suffisante pour voler sans risque..... 31
- Figure 17 : Orthophotographie, Modèle Numérique de Surface (MNS) et Modèle Numérique de terrain (MNT) lidar de la crique Georgeon acquis par drone en octobre 2021. Le carroyage est désorienté pour faciliter la représentation (flèche du nord indiquée dans le coin inférieur droit des cartes). La coupe longitudinale du nuage de points est figurée en trait blanc (cf. Figure 18). .... 32
- Figure 18 : Coupe longitudinale à travers le nuage de points lidar brut (voir position sur Figure 17). La surface la plus visible est évidemment la canopée de la forêt où le maximum de points lidar s'est arrêté. Néanmoins, localement, les rayons laser ont pu pénétrer jusqu'au sol..... 33
- Figure 19 : Carte de densité de points (en pts/m<sup>2</sup>) intégrée par pixel de 10 x 10 m (100 m<sup>2</sup>) pour les vols lidar 1, 2 et 3. Haut : densité de points au sommet de canopée. Les variations de densité sont causées par les variations de distance au drone. Les zones les plus denses sont les plus hautes. Les zones les moins denses se trouvent dans les zones particulièrement encaissées combinant relief à proximité et hauteur des arbres. Bas : densité de points classés « sol » (catégorie 2). La plaine alluviale déboisée ressort nettement avec 4-100 pts/m<sup>2</sup> (en vert). Le reste de la zone, essentiellement forestière a quant à elle majoritairement une densité de 0 à 1 pt/m<sup>2</sup> (voir détails dans le Tableau 4)..... 34
- Figure 20 : A. Zoom permettant d'apprécier la résolution des données lidar. On distingue en particulier des formes linéaires proches du lit mineur, correspondant à des buttes de matériaux remaniés résultant d'orpillage historique « créole », dont la nature a pu être vérifiée sur le terrain (B). Photo : M. Chevillard..... 36
- Figure 21 : Interprétation géomorphologique de la vallée alluviale à partir de la couverture lidar ayant été obtenue par acquisition drone. En haut : MNT et ombrage interpolé à 1 m de résolution. En bas : interprétation des principaux éléments géomorphologiques. Les contours qualifiés de « certains » sont indiqués en traits pleins, les contours « incertains » en traits pointillés. .... 37
- Figure 22 : Illustration de l'apport de données lidar, par comparaison aux données conventionnelles à disposition de la profession dans le cadre de travaux d'exploration alluvionnaire sur une ARM. A. Données SRTM 30 m. B. Fond IGN au 1/50 000, où sont représentées les courbes de niveau et la position approximative des cours d'eau. C. Cartographie lidar haute-résolution permettant d'apprécier en détail la morphologie de la vallée alluviale et de pouvoir recontextualiser les données d'exploration..... 39
- Figure 23 : Coupe transversale à travers la crique Georgeon. Le nuage de point original est figuré en même temps que les valeurs d'altitude minimale, médiane et maximale pour des mailles de 30 m de côté. La médiane (barres grise à mi-hauteur) est généralement déportée vers le haut de la colonne de points. Ceci indique que plus de la moitié des points lidar sont situés à proximité de la canopée..... 40

Figure 24 :	Cartes de densité des points 3D lidar en sommet de canopée pour chaque vol individuel exprimées en pts/m <sup>2</sup> agrégés par mailles de 1 m <sup>2</sup> . Les liserés blancs figurent les courbes de niveaux tous les 10 m. Les altitudes de vol au-dessus du sol ont été progressivement abaissées pour couvrir la totalité du relief. Les vols 1 et 2 étaient beaucoup trop haut au-dessus du relief pour atteindre ne fusse que la canopée en fond de vallée. Le vol 3 est le plus complet spatialement à une hauteur de vol comprise entre 35 et 176 m du sol (le plus souvent à 136 m/sol). Le vol 4 est celui qui présente nettement la plus forte densité de points.....	42
Figure 25 :	Densité des points ayant atteint le sol lors des vol 3 (majoritairement 136 m/sol) et 4 (majoritairement 74 m/sol). Le trait jaune délimite la plaine alluviale déboisée, où la densité de points est évidemment la plus forte. Au vol 3, le sol est identifié par des groupements de points denses mais spatialement dispersés. Au vol 4, la densité est clairement meilleure, mais la manoeuvrabilité limitée du drone n'a pas permis de voler en sécurité au-dessus de la canopée.....	44
Figure 26 :	Densité de points « sol » par maille de 10 x 10 m. Sur l'emprise la zone d'étude, quelques pixels ne contiennent aucune information d'altitude. Le vol 3 seul ne parvient pas à mesurer correctement la morphologie du fond de vallée en amont de la zone déboisée. Seul le vol 4 parvient à couvrir densément cette zone critique pour les applications recherchées. ....	45
Figure 27 :	Densité de points « sol » par maille de 20 x 20 m. Il ne reste que quelques pixels dans les zones périphériques qui ne contiennent aucune information d'altitude. Le vol 3 couvre quasiment toute l'emprise. Le vol 4 couvre évidemment très densément le flat alluvial avec plus de 500 pts/400m <sup>2</sup> .....	46
Figure 28 :	Carte des distances au point lidar sol le plus proche. Plus la teinte est jaune plus les distances sont grandes. L'emprise figurée correspond au domaine des points ayant atteint le sol lors du vol 4. Ceci pour uniformiser les résultats.....	47
Figure 29 :	Schéma de principe d'une acquisition de sismique réfraction (à gauche) et par ondes de surface (à droite). Le dispositif d'acquisition est similaire, seul le traitement de l'information diffère.....	54
Figure 30 :	Exemple de coupe de vitesse sismique (ondes S) obtenue par traitement MASW en contexte alluvial.....	56
Figure 31 :	Exemple de coupe de vitesse sismique (ondes S) obtenue par traitement MASW, où est superposée l'interface définie par réfraction.....	56
Figure 32 :	Description schématique du principe de mesure (à gauche) et de l'enregistrement correspondant (à droite). ....	57
Figure 33 :	Profil radar extrait de Goutaland et al. (2008), décrivant les principales unités de dépôt en contexte glacio-fluviatile.....	58
Figure 34 :	Principe de la tomographie de résistivité électrique.....	58
Figure 35 :	Ordres de grandeur des résistivités de certaines formations géologiques courantes. ....	59
Figure 36 :	Exemple de résultat d'une tomographie de résistivité électrique réalisée aux abords du bourg de Maripasoula, Guyane. ....	60
Figure 37 :	Exemples de photographies des différents types de drone. ....	61
Figure 38 :	Schéma présentant les différentes échelles d'acquisition géophysique possibles : aéroportée, aéroportée légère et sol. ....	62

Figure 39 : Schéma présentant les différentes méthodes géophysiques et leurs degrés de maturité pour des acquisitions en drones. Les méthodes avec un contour en pointillés noirs sont les méthodes adaptées à la prospection alluvionnaire, qui seront détaillées par la suite. ....	63
Figure 40 : Dispositif TDEM hélicopté (SkyTEM®) utilisé par le BRGM pour les DROM (Reninger, 2012). A. Vue arrière du dispositif. B. Vue avant du dispositif et de la boucle émettrice. C. Dispositif en plein vol. D. Exemple de coupe de résistivité et interprétations (adapté de Thiery et al., 2018). ....	64
Figure 41 : Énergie perdue pour différent type d'interface air/sol (AMIRA project, 2020). ....	65
Figure 42 : Radargrammes obtenues pour différentes hauteurs d'antenne, les hauteurs vont de 75 cm à 200 cm avec un pas de 25 cm (Cabrera & Bekic; 2018) .....	66
Figure 43 : Évolution du nombre de publications scientifiques et de brevets pour l'électromagnétisme aéroporté (Jürgens et al., 2020). ....	67

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Extrait des caractéristiques techniques du Trinity F90+ (source : L'Avion Jaune). .	19
Tableau 2 : Caractéristique technique du capteur lidar Qube 240 (source : L'Avion Jaune). ....	19
Tableau 3 : Détail des vols et paramètres d'acquisition des vols effectués sur Georgeon et Valentin. (source : L'Avion Jaune). Les vols ayant été pris en compte pour la compilation des livrables finaux sont indiqués en surbrillance : en bleu, les vols lidar ; en vert, les vols photos. Les numéros des 4 vols lidar étant repris régulièrement dans la suite du rapport sont indiqués à droite du tableau. ....	22
Tableau 4 : Densité de points lidar issus des vols 1, 2, et 3 (voir répartition spatiale Figure 19) et caractéristiques des vols (Tableau 3). ....	35
Tableau 5 : Évaluation du nombre de points lidar ayant atteint le sol sur l'ensemble de la zone et spécifiquement en milieu forestier, en fonction des vols réalisés. L'altitude du drone au-dessus de la végétation et au-dessus du sol sont renseignés par un triplet de valeurs : hauteur de vol minimale, modale (càd. valeur la plus fréquemment observée pendant le vol) et hauteur maximale. ....	41
Tableau 6 : Tableau de comparaison des capacités techniques d'un drone à aile fixe (le Trinity F90+) et d'un multicoptère (exemple du DJI M300) pour couvrir une zone de 1 km <sup>2</sup> en contexte forestier équatorial. L'évaluation des différents paramètres est issue du retour d'expérience de l'étude ayant été réalisée et de discussions complémentaires sur le sujet. Pour une vision objective, cette analyse demanderait à être complétée par une étude équivalente avec un drone multicoptère. Les scores en gras indiquent s'il s'agit d'un point fort (+2), d'un avantage (+1), d'un inconvénient (-1) ou d'un aspect très défavorable (-2) de l'outil employé. ....	50
Tableau 7 : Ordres de grandeur des vitesses de propagation des ondes Vp et Vs dans les formations géologiques les plus courantes. ....	54

## Liste des acronymes

**ADAV** : Avion à Décollage et Atterrissage Vertical. En anglais, VTOL : Vertical Take-Off and Landing.

**ARM** : Autorisation de Recherche Minière.

**BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières.

**GLONASS** : Globalnaïa navigatsionnaïa spoutnikovaïa sistéma, pour « système global de navigation satellitaire ». Il s'agit du système de positionnement par satellites russe.

**GNSS** : Global Navigation Satellite Systems. Ce terme englobe toutes les constellations de satellite de positionnement.

**GPR** : Ground Penetrating Radar.

**GPS** : Global Positioning System. Système de positionnement satellitaire des Etats-Unis.

**IA** : Intelligence artificielle.

**LAS** : LASer format.

**LiDAR** : « Light Detection And Ranging » ou « Laser imaging Detection and Ranging ».

**MASW** : Multiple Analysis of Surface Waves.

**MNS** : Modèle Numérique de Surface. Modèle incluant à la fois le relief du sol et tous les éléments recouvrant le sol dont la végétation et d'éventuelles infrastructures.

**MNT** : Modèle Numérique de Terrain. Modèle comprenant uniquement les éléments de terrain, sans élément recouvrant le sol.

**PPK** : Precise Point Kinematic.

**R&D** : Recherche & Développement.

**SRTM** : Shuttle Radar Topography Mission. Modèle numérique de terrain à résolution horizontale de 30 m, mis à disposition par la NASA (National Air and Space Agency des Etats-Unis).

**UAV** : Unmanned Aerial Vehicle.

# 1. Introduction

## 1.1. CONTEXTE

Depuis quelques années, on assiste au développement de l'imagerie par drone dans de nombreux domaines – militaire, média, environnement, infrastructures, tourisme – mais également dans les géosciences où ce type d'outils est de plus en plus utilisé. Bien qu'encore très spécialisé dans certains domaines, la technologie drone voit ses coûts fortement diminuer et ses équipements être de plus en plus accessibles, concurrençant les levés conventionnels par aéronef (avion ou hélicoptère).

Ce type de levé, de par ses caractéristiques (facilité de déploiement, coût, résolution, accessibilité de zones difficiles) semblerait être parfaitement adapté au contexte guyanais et, a fortiori à l'exploration et à l'exploitation alluvionnaire, dont les surfaces en jeu (de l'ordre de la centaine d'ha) peuvent être compatibles avec ce type d'acquisition.

Dans ce contexte, la présente étude se propose de tester la **faisabilité d'un levé lidar par drone**, afin d'établir la topographie de la plaine alluviale d'une rivière en contexte forestier équatorial. Cet exercice, à vocation méthodologique, a pour objectif d'**évaluer les bonnes pratiques et déterminer les limites** d'un tel levé sous couvert forestier, ceci dans le cadre particulier de l'évaluation du potentiel aurifère alluvionnaire d'un cours d'eau, afin de mesurer la topographie avant exploitation et de pouvoir contextualiser les informations d'exploration.

De plus, au-delà du lidar, d'autres techniques d'acquisition par drone sont possibles, en particulier géophysiques, dont certaines pourraient être adaptées à la prospection alluvionnaire et pour lesquelles des pistes de couplage sont à étudier et abordés succinctement dans le présent rapport.

## 1.2. CADRE DE L'ÉTUDE

Cette étude a été financée conjointement par le BRGM et le bureau de la politique des ressources minérales non énergétiques du Ministère de la Transition Écologique (MTE/DGALN/DEB/EARM2), dans le cadre de leurs actions d'appui technique à la filière extractive en Guyane.

Elle s'inscrit dans le cadre de la Convention DEB-BRGM 2021, relative aux ressources minérales, au littoral, aux milieux marins et à l'inventaire national du patrimoine géologique <sup>1</sup>.

## 1.3. CONDITIONS DE RÉALISATION

L'étude a été réalisée durant l'année 2021 et les résultats exploités au cours de l'année 2022.

La mission de terrain faisant l'objet de l'essentiel de ces travaux a été réalisée en octobre 2021. Elle a consisté à effectuer une **acquisition lidar et photogrammétrique** sur deux secteurs (criques Georgeon et Valentin), d'une emprise de 100 ha chacun (2 km x 500 m), localisés au nord du massif de Montagnes Tortue, le long de la route de Bélizon, à 100 km au sud de Cayenne (Figure 1).

---

<sup>1</sup> Convention DEB-BRGM 2021, n° 210 330 3671.

Les travaux de terrain ont été réalisés avec la collaboration d'Amazone Gold – société exerçant des activités d'orpaillage dans la région – dont nous tenons à remercier l'ensemble de l'équipe pour leur accueil sur site et leur appui logistique ayant permis de mener à bien la mission.

La couverture drone a été réalisée par la société L'Avion Jaune, dont les services ont été retenus suite à la publication et la soumission d'un cahier des charges reprenant les caractéristiques de la prestation à réaliser. L'Avion Jaune<sup>2</sup> est une société de service reconnue à l'échelle internationale, spécialisée dans la cartographie aérienne et la conception de solution lidar pour drone, via leur filiale Yellow Scan<sup>3</sup>. La démarche méthodologique testée sur ce projet était particulièrement expérimentale, et nous tenons à remercier l'ensemble de l'équipe technique pour l'implication et l'ingéniosité dont elle a fait preuve, cela malgré les incertitudes et les conditions de terrain particulièrement contraignantes, non sans risque pour les équipements testés. Nous les remercions également pour les nombreuses discussions que nous avons eues, durant la mission et a posteriori, ayant permis d'aboutir à cette étude.

#### 1.4. OBJET ET CONTENU DU RAPPORT

Le présent rapport a pour objectif de présenter les résultats de l'étude méthodologique ayant été réalisée sur le sujet de l'**acquisition drone en contexte forestier** et les **perspectives d'évolution technique** en application à l'exploration aurifère alluvionnaire.

Les résultats y seront structurés en deux grands chapitres.

L'étude méthodologique d'acquisition de données lidar par drone, qui constitue l'essentiel des travaux réalisés, sera présentée en détail au sein du **chapitre 2**. Les résultats y seront développés en 8 parties :

- Le **positionnement du problème** et les moyens d'y répondre ;
- La **localisation de la zone d'étude** et des secteurs ayant été couverts ;
- Les caractéristiques des **équipements sélectionnés** (modèle du drone et des capteurs utilisés) ;
- Le détail des **acquisitions de terrain**, reprenant le déroulé de la mission, les paramètres des vols effectués, et les levés topographiques de validation ayant été mis en œuvre ;
- Les **traitements et post-traitement** effectués ayant permis d'avoir des données exploitables ;
- Les **résultats cartographiques** obtenus sur les zones d'étude. Dans cette partie seront présentés les principaux livrables pouvant être obtenus suite à ce type d'acquisition, ainsi que l'interprétation géomorphologique ayant été réalisée sur la zone ;
- Une partie **discussion** où seront analysés différents paramètres de couverture, de pénétration et de résolution – en particulier la capacité du lidar à traverser la canopée – permettant d'établir les conditions limites de ce type d'acquisition et des équipements testés. Une comparaison des solutions drones (à aile fixe vs multicoptère), en réponse à la problématique initiale, y sera discutée ;

---

<sup>2</sup> <https://lavionjaune.com/>

<sup>3</sup> <https://www.yellowscan-lidar.com/fr/>

- Une dernière partie faisant office de **conclusion** clôturera ce chapitre. Une synthèse des principaux éléments mis en évidence seront repris, ainsi que quelques perspectives de développement.

Enfin, dans un **troisième chapitre**, seront détaillées les perspectives d'adaptation des outils géophysiques en drone et les possibilités d'acquisitions géophysiques au sol, pouvant être mises en œuvre dans le contexte de la prospection alluvionnaire et plus généralement dans le cadre de l'exploration minière.



## 2. Méthodologie d'acquisition de données LiDAR par drone

### 2.1. POSITIONNEMENT DU PROBLÈME

La question principale à laquelle cette étude cherche à répondre est la suivante : dans quelle mesure un lidar monté sur drone offre-t-il plus d'avantage, en particulier de flexibilité, qu'un lidar sur avion ou hélicoptère pour mesurer la topographie d'une zone alluviale en contexte forestier équatorial ?

L'emprise du territoire à cartographier est celle d'une autorisation de recherche minière (ARM) dont la surface est de 1 km<sup>2</sup> (100 ha). Il s'agit d'une emprise rectangulaire, centrée généralement sur une vallée alluviale, où le fond de vallée, non-rectiligne, est plus ou moins encaissé entre des collines, dont la surface est généralement couverte de forêt, et au sein duquel l'existence a priori de zones de décollage n'est pas garantie.

Le produit principal d'une campagne de mesures topographiques dans ce type de contexte, est de reconnaître avec suffisamment de précision, la position et l'extension d'une zone de flat alluvionnaire au sein d'un massif forestier, dont le croisement avec les données de prospection au sol (épaisseur de graviers minéralisés et teneurs en or), permettra d'évaluer son exploitabilité.

Il s'agit donc de tester si une campagne lidar par drone est capable de **fournir une cartographie assez fine** de la plaine alluviale et de ses versants, dans un **contexte forestier dense** où les arbres peuvent être très hauts et la **végétation dense** à toutes les strates, où le **relief peut être accidenté** et où les **points de décollage** peuvent être parfois distants de plusieurs kilomètres de la zone d'étude.

La capacité des lidars aéroportés (par porteur hélicoptère ou par avion) à faire ce type de cartographie en contexte équatorial est de notoriété publique, y compris en Guyane. La question porte spécifiquement sur l'apport des drones, dont la réputation est d'être moins coûteux qu'un aéronef habité, faciles à transporter, à déployer, à faire voler proche du sol pour obtenir une plus grande densité de points et capables de profiter de fenêtres météorologiques favorables de plus courtes durées.

Dans ce cadre, une mission topographique a donc été réalisée en octobre 2021 pour tester les apports de la technologie drone dans ce type de contexte.

### 2.2. ZONES D'ÉTUDE

Les deux zones d'étude ayant été couvertes sont situées sur les criques Georgeon et Valentin. Elles sont localisées sur le flanc nord du district aurifère de Montagnes Tortue, le long de la piste Bélizon, à 100 km au sud de Cayenne (Figure 1). Elles présentent chacune une surface de 1 km<sup>2</sup> (2 000 m de longueur x 500 m de largeur), équivalente à celle d'une ARM. Les deux criques ciblées présentent des profils topographiques différents :

- La **crique Georgeon** (Figure 1) est particulièrement encaissée. Elle se situe en contexte collinaire. La crique présente un dénivelé de 200 m entre l'amont et l'aval, et est encaissée d'environ 130 m entre les crêtes bordant son bassin versant ;

- La **crique Valentin** se situe environ 5 km plus à l'aval du relief (Figure 1). Le relief transversal de la crique Valentin n'est que d'une centaine de mètres au maximum avec un large fond de vallée plat.

Ces deux configurations, bien que différentes, sont représentatives des contextes dans lesquels les exploitants aurifères alluvionnaires sont amenés à évoluer dans le cadre de leurs activités d'exploration. En termes de documentation, les informations classiquement à disposition pour l'appréciation topographique de ce type d'emprise sont les suivantes (Figure 1) :

- Le **relief** issu du SRTM 30 m (Shuttle Radar Topography Mission, Figure 1) dont l'acquisition a été réalisée en février 2001 par la navette spatiale Endeavor (Farr *et al.*, 2007). Cette donnée topographique à couverture mondiale est obsolète (2001), de résolution insuffisante (30 m) et ne restitue que l'altitude de la canopée du fait de la technologie radar en bande C implémentée pour la mesure topographique. Cette donnée n'est pas utilisable pour les besoins de cartographie topographique sous forêt et à l'échelle métrique ;
- Le **fond cartographique IGN** au 1/50 000 reprenant les informations topographiques essentiels (position des cours d'eau, routes, pistes, villages, courbes de niveau, *etc.*), mais dont la définition n'est pas suffisante pour contextualiser suffisamment précisément les informations de prospection dans le cadre de l'exploration d'un flat alluvial.

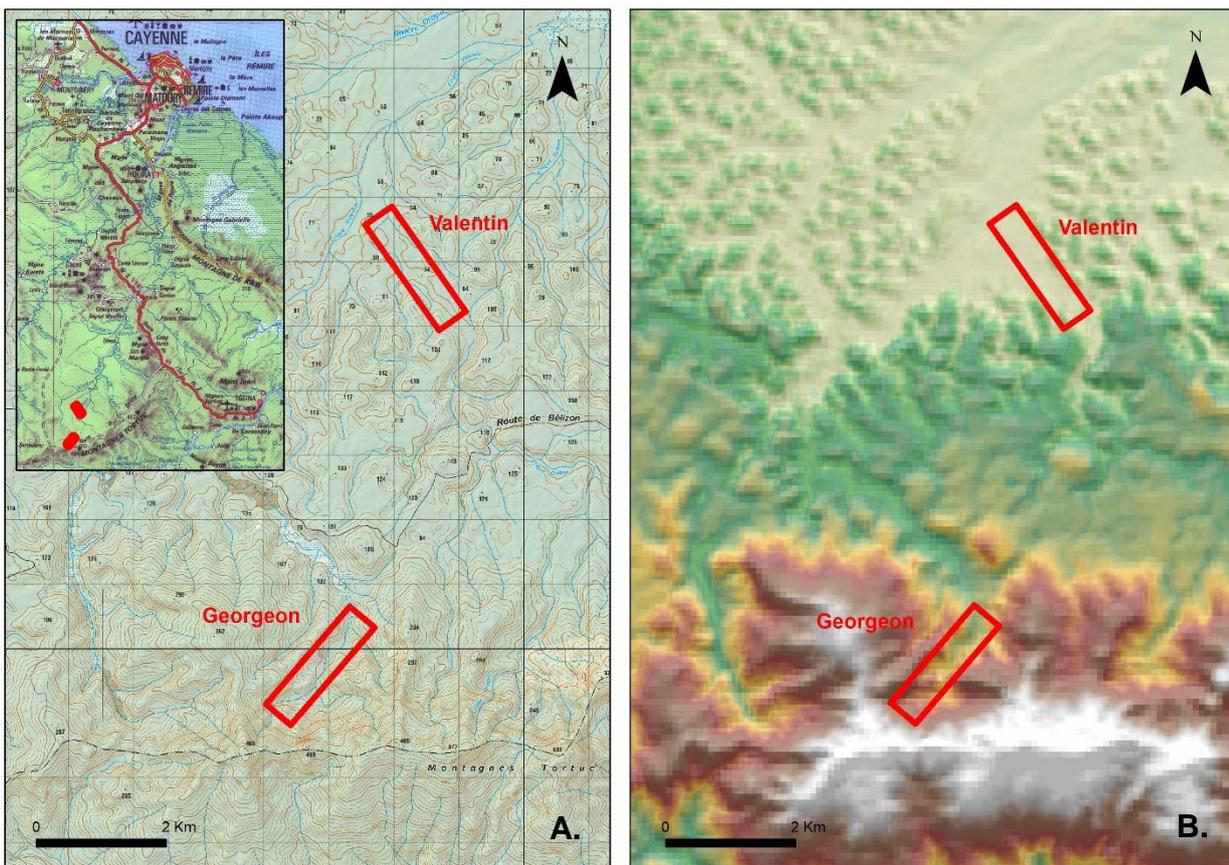


Figure 1 : Emprise des deux secteurs ayant été couverts dans le cadre de cette étude : la Crique Georgeon, en contexte collinaire et la Crique Valentin, en contexte de plaine. Report cartographique sur fond IGN 1/50 000 (A) et sur fond SRTM à 30 m de résolution (B).

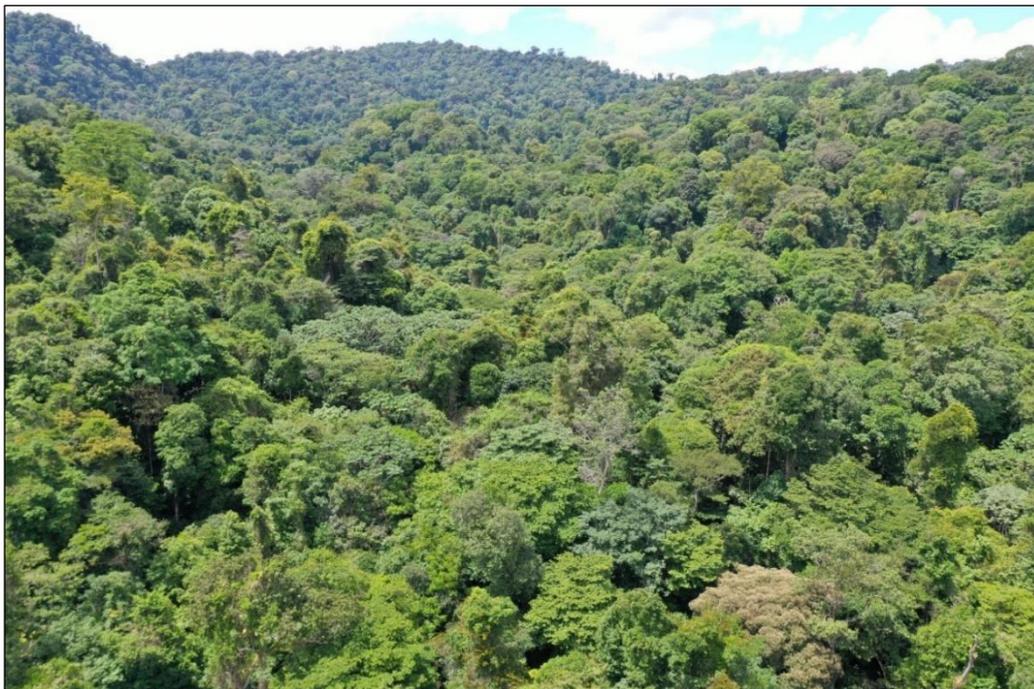


Figure 2 : Vue par drone vers l'amont de la crique Georgeon dont le relief est particulièrement encaissé. Environ les deux-tiers de la surface boisée comprend des arbres de 30-35 m de hauteur, avec localement des arbres qui peuvent atteindre 65 m au-dessus du relief (photo : L'Avion Jaune).

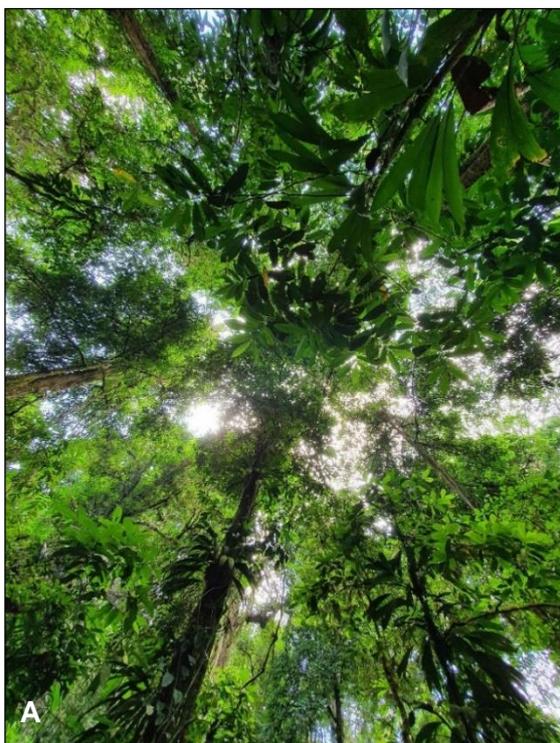


Figure 3 : A. Canopée vue depuis le sol. Malgré un couvert abondant, il existe de nombreux interstices dans le feuillage qui permettent de voir le ciel. C'est par ces trouées que les rayons du lidar parviennent au sol. B. Exemple de couvert végétal dans les strates les plus proches du sol. Le sol y est recouvert d'une litière de feuilles sombre, dont l'humidité peut absorber une partie des rayons laser qui parviendraient à atteindre le sol (photos : T. Dewez).

## 2.3. ÉQUIPEMENTS SÉLECTIONNÉS

### 2.3.1. Sélection du drone

Il existe deux familles de drones : à aile fixe ou à voilure tournante (voir détails § 3.2.1). Parmi ceux à aile fixe, on distingue les drones à décollage horizontal, nécessitant une piste de décollage/atterrissage, et les drones à aile fixe pouvant décoller à la verticale.

Pour la mission de terrain, comme il n'y avait aucune certitude quant à l'existence d'une zone de décollage, et que le déboisement d'un secteur de 20 x 20 m n'était pas envisageable dans le protocole de mise en œuvre, l'option du drone à aile fixe et décollage vertical s'est imposée.

Le choix s'est dirigé sur le modèle **Trinity F90+** de *Quantum system* (Figure 4). Il s'agit d'un convertible de 2,40 m d'envergure permettant de couvrir de grandes surfaces en photogrammétrie et en lidar grâce à une autonomie pouvant atteindre 1h30 selon la charge utile. Celui-ci est en effet capable de réaliser des vols de transit de plusieurs kilomètres depuis son aire d'envol et de parcourir de manière autonome un plan de vol couvrant un kilomètre carré avec une seule batterie.



Figure 4 : Drone Quantum Trinity F90+ sur son aire de décollage (photo : T. Dewez). Malgré une envergure de 2,40 m, le drone se loge démonté dans la valise à l'arrière-plan. La batterie de 64,8 Wh permet de voler pendant 1h en alimentant le lidar Yellowscan Qube240.

Envergure	2.4 m
Masse au décollage	5 kg
Charge utile	700 g
Autonomie	90 minutes
Portée maximale des commandes	7,5 km
Température opérationnelle	-12°C à 50°C

Tableau 1 : Extrait des caractéristiques techniques du Trinity F90+ (source : L'Avion Jaune).

### 2.3.2. Choix du lidar

Le choix du drone détermine la charge embarquée, sans guère d'alternatives possibles puisque les opérateurs n'ont souvent qu'un seul système lidar à disposition pour chaque type de drone. Pour le drone Trinity F90+ retenu pour la mission, le capteur utilisé est le **lidar Qube240**, spécifiquement développé par YellowScan pour le Trinity (Figure 5 et Tableau 2).



Figure 5 : Lidar Qube 240 (source : L'Avion Jaune)

<b>Scanner</b>	laser de classe 1 (Eye Safe, sans danger)
<b>Longueur d'onde</b>	905 nm
<b>Angle de tir</b>	70 °
<b>Vision sous végétation</b>	oui : jusqu'à 3 échos
<b>Précision</b>	1,8 à 2,5 cm
<b>Position</b>	3 cm (x, y, z)
<b>Poids</b>	0,7 kg
<b>Densité de points</b>	50 à 100 pts /m <sup>2</sup> à 100 AGL
<b>Centrale inertielle</b>	Applanix PostPACTM UAV et INS software for PPK

Tableau 2 : Caractéristique technique du capteur lidar Qube 240 (source : L'Avion Jaune).

Avec l'expérience du terrain, deux éléments semblent déterminants pour effectuer un choix de lidar spécifique : **la portée maximale du lidar** et la **densité de points en sortie d'instrument**.

La forêt équatoriale étant un milieu où l'on trouve les arbres parmi les plus hauts du monde (jusqu'à 65 m de hauteur sur la zone d'étude), la hauteur de vol minimale doit être majorée pour tenir compte du relief. En plus de cette distance de sécurité limitant l'efficacité du lidar, la surface

du sol est très souvent humide et sombre. Ces deux facteurs contribuent à absorber le signal lidar qui parvient à atteindre le sol. Le **lidar embarqué doit donc être suffisamment puissant** pour recevoir un signal exploitable.

La **densité de points** importe également. Comme les obstacles sont abondants sur toute la colonne de végétation, seule une faible proportion des tirs lidar trouvera un interstice entre les feuilles pour atteindre le sol. Plus les tirs sont abondants, plus le nombre de points atteignant le sol sera grand.

Pour augmenter encore la densité de points et les chances de pénétration de la canopée, il est évidemment possible de répéter les vols pour mesurer plusieurs fois chaque secteur. Mais ceci se fait au détriment de la couverture totale et ajoute un coût de post-traitement pour assembler toutes les lignes de vol en un seul nuage 3D.

### 2.3.3. Capteur photo

Pour la photogrammétrie, l'appareil photo utilisé est un boîtier Sony RX1R II, spécialement adapté pour le Trinity. Doté d'un obturateur central, le boîtier possède un capteur numérique de 42 mégapixels (matrice de 7 952 x 5 304 pixels sur un capteur de 36 x 24 mm, soient des photosites de 4,5  $\mu$ m). Un objectif de 35 mm était monté pour les vols. Cet objectif donne un angle de champ horizontal de 0,95 radians et vertical de 0,66 radians. L'emprise au sol d'une photo en visée nadirale vaut donc 0,95 fois la hauteur du drone au-dessus du sol en largeur et 0,66 fois la hauteur de vol en longueur.



Figure 6 : Capteur Sony RX1 II intégré dans le Trinity (source : L'Avion Jaune)

Les vols ayant été réalisés à environ 200 m du sol, l'emprise approximative des photos couvrait 190 m x 132 m. À cette hauteur, l'échelle de prise de vue est d'environ de 1/5 700 (échelle = altitude / longueur focale, exprimés en m). La taille d'un pixel projeté au sol est donc de 4,5 $\mu$ m \* 5 700 soit ~ 25 mm.

### 2.3.4. Système de positionnement

Le positionnement du drone Trinity F90+ s'est appuyé sur un système GNSS permettant le post-traitement de la trajectoire. Au moment du vol, la position du drone en vol n'est pas meilleure que celle d'un équipement GNSS de randonnée. Cependant, l'enregistrement simultané des signaux satellitaires à bord du drone et au niveau d'une balise GNSS fixe au sol (système iBase) a permis de calculer la position du drone avec une précision attendue de l'ordre de  $\pm$  5 cm.

### 2.3.5. Drone photogrammétrique de reconnaissance

Avant de déployer le drone à aile fixe, un drone à voilure tournante peu coûteux a été utilisé et a permis de reconnaître le site depuis les airs et de prendre un premier jeu de photos. Il s'agit d'un drone DJI Mavic Pro 2 nativement équipé d'un appareil photo se prêtant à la photogrammétrie (Figure 7). Grâce au premier jeu de photos, un modèle numérique de surface photogrammétrique, décrivant l'altitude du sommet de la canopée, a pu être généré et injecté dans le logiciel de pilotage automatique du drone Trinity F90+.



Figure 7 : Drone DJI Mavic Pro 2. Il s'agit d'un modèle à voilure tournante de petite dimension (< 40 cm) pouvant permettre de faire facilement des vols photogrammétriques de reconnaissance dans ce type de contexte (source : BHPPhotoVideo.com, photo : M. Chevillard).

## 2.4. ACQUISITION

### 2.4.1. Déroulé de la campagne topographique

06 octobre 2021 : Reconnaissance de la crique Georgeon et survol préliminaire photogrammétrique avec le drone Mavic.

07 octobre 2021 : Déploiement de la base GNSS ; implantation des cibles à quadrants et des parasols pour validation topographique (cf. § 2.4.3.) ; 1 vol photogrammétrique ; 3 vols lidar, dont 1 a été interrompu pour proximité du relief.

08 octobre 2021 : Mesure des cibles avec le GNSS mobile et mesures complémentaires avec la station totale ; 1 vol photo ; 2 vols lidar.

09 octobre 2021 : 1 vol lidar à basse altitude.

12 octobre 2021 : Vols d'acquisition sur la crique Valentin. 1 vol photo, 2 vols lidar.

### 2.4.2. Vols et paramètres d'acquisition

#### a) Secteur Georgeon

Le secteur de Georgeon a été survolé à plusieurs reprises entre le 6 et le 9 octobre 2021 (Tableau 1). Le premier jour a été destiné à des vols de repérage à l'aide du drone DJI Mavic 2 Pro équipé

de son propre appareil photo (Figure 7). Ce quadricoptère léger a été utilisé pour établir un modèle topographique de référence par photogrammétrie.

Ensuite, 8 vols ont été réalisés avec le drone Quantum Trinity F90+. Equipé d'un boîtier photo Sony RX1MII+35mm, le Trinity a réalisé deux vols photos, sans puis avec cibles photogrammétriques au sol, respectivement le 7 et 8 octobre.

Enfin, 6 vols lidar progressivement plus proches du sol ont été réalisés : initialement à 200 m d'altitude pour les premiers vols, jusqu'à 50 m d'altitude pour le vol le plus proche de la canopée. Une fois les premiers vols de reconnaissance traités, le modèle topographique du Mavic a été injecté dans le planificateur de vol du Trinity pour optimiser le suivi de terrain.

Le détail de l'ensemble des vols est consigné dans le Tableau 1 et les plans de vols des différentes acquisitions reportés sur les Figure 8 et Figure 9.

À noter que lors du dernier vol, à basse altitude, et malgré les précautions prises lors du paramétrage du plan de vol, les conditions météorologiques changeantes ont entraîné la perte du Trinity dans la végétation, qui a, par la suite, été retrouvé, sans dégât majeur.

Date	Zone	N° Vol	Vecteur / Capteur	Hauteur / Recouvrement	Suivi topo	Remarques
06/10/2021	Georgeon	1	Mavic / Photo	400 m 60 % - 60 %	-	Vols de repérage pour génération de MNS photogrammétrique pour suivi topographique
		2-3-4	Mavic / Photo	200 m 60 % - 60 %		
07/10/2021	Georgeon	1	Mavic / Photo	200 m 80 % - 80 %	-	Vols de repérage
		2	Trinity / Photo	200 m 80 % - 80 %	SRTM 30m	Pas d'Ibase – photos de qualité satisfaisante
		3	Trinity / Lidar	200 m 55 %	SRTM 30m	Ibase OK
		4	Trinity / Lidar	200 m 70 %	SRTM 30m	Ibase OK
		5	Trinity / Lidar	100 m 55 %	SRTM 30m	Ibase OK – Interruption du vol car proximité du relief
08/10/2021	Georgeon	1	Trinity / Lidar	100 m 70 %	MNS 5 m	Proximité du relief
		2	Trinity / Photo	200 m 80 % - 80 %	MNS 5 m	Nuages – photos de qualité insuffisante
		3	Trinity / Lidar	60 m 70 %	MNS 5 m	Fond de vallée uniquement
09/10/2021	Georgeon	1	Trinity / Lidar	50 m 75 %	MNS 1 m	Perte du drone au premier vol Journée de recherche
12/10/2021	Valentin	1	Trinity / Photo	200 m 80 % - 80 %	SRTM 30m	Ibase OK
		2	Trinity / Lidar	200 m 80 %	SRTM 30m	Ibase OK
		3	Trinity / Lidar	120 m 65 %	SRTM 30m	Ibase OK

1  
2  
3  
4

Tableau 3 : Détail des vols et paramètres d'acquisition des vols effectués sur Georgeon et Valentin. (source : L'Avion Jaune). Les vols ayant été pris en compte pour la compilation des livrables finaux sont indiqués en surbrillance : en bleu, les vols lidar ; en vert, les vols photos. Les numéros des 4 vols lidar étant repris régulièrement dans la suite du rapport sont indiqués à droite du tableau.

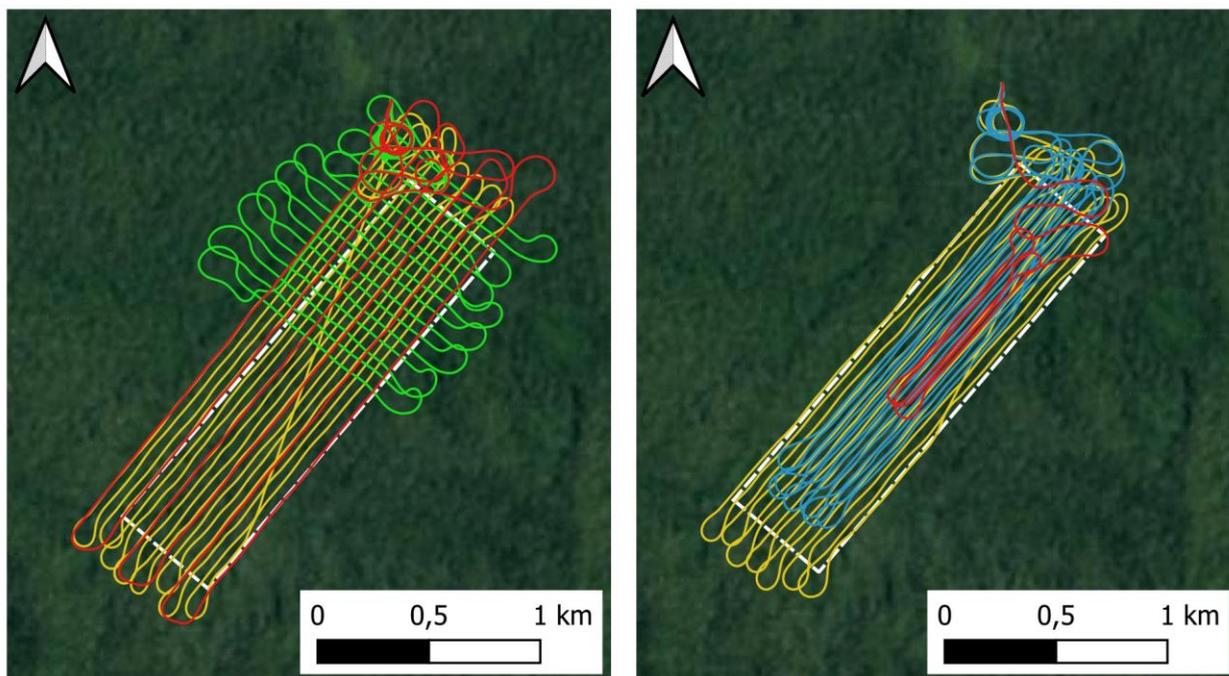


Figure 8 : Trajectoires des 6 vols lidar Trinity réalisés sur Georgeon, le 7 octobre (à gauche), le 8 octobre (à droite, en jaune et bleu), et le 9 octobre (à droite, en rouge). Source : L'Avion Jaune.

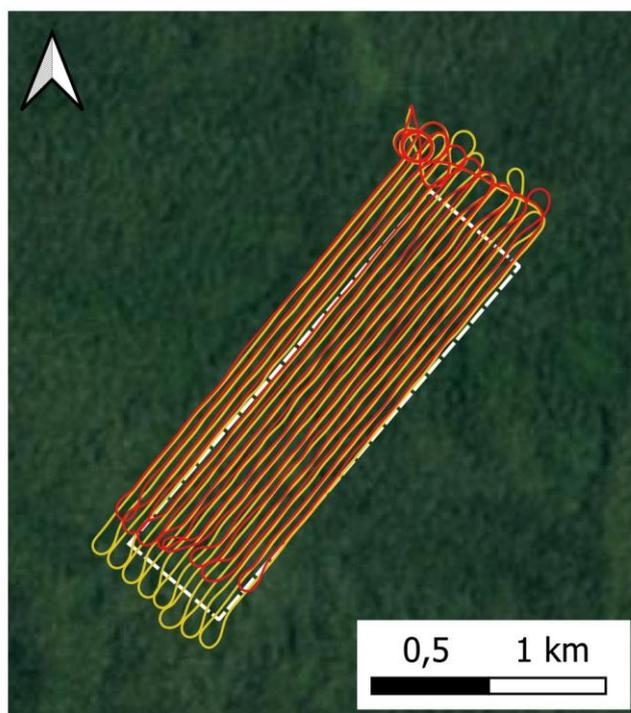


Figure 9 : Trajectoire des 2 vols photogrammétriques Trinity réalisés sur Georgeon, le 7 (en jaune) et 8 octobre (en rouge). Source : L'Avion Jaune.

b) Secteur Valentin

Sur Valentin, suite au retour d'expérience sur le secteur de Georgeon, le nombre de vol a été plus réduit. Un vol photogrammétrique et deux vols lidar ont été effectués avec le Trinity, à respectivement 200 et 120 m d'altitude. De la même manière, le détail des vols est consigné dans le Tableau 3 et les plans de vols reportés sur la Figure 10.



Figure 10 : Trajectoire des vols Trinity réalisés sur Valentin le 12 octobre. A. Vol photogrammétrique. B. Vols lidar. Source : L'Avion Jaune.

### 2.4.3. Levé topographique et systèmes de validation des données

#### a) *Solution de validation des altitudes*

En milieu forestier, la validation de données lidar est un véritable casse-tête. Les techniques de mesure topographiques courantes ne sont pas viables.

La réalisation d'un transect topographique de référence avec une station totale demande d'effectuer des layons pour dégager des couloirs de visée le long d'une trajectoire polygonale. Cette solution est consommatrice en temps et coûteuse à mettre en œuvre pour obtenir des mesures de position relatives entre elles.

Pour une localisation absolue, plusieurs solutions de positionnement existent. La solution la plus répandue de nos jours consiste à positionner précisément une antenne GNSS mobile par rapport à des balises GNSS permanentes. Ceci ne fonctionne que si le territoire est maillé avec des balises GNSS permanentes autour de la zone d'étude et qu'elle-même soit couverte par le réseau téléphonique. Dans le contexte forestier guyanais, il n'y a ni stations permanentes ni réseau.

Pour palier ceci, il est possible de déployer une base GNSS (pivot) qui émet sa position par radio vers une antenne GNSS mobile. La base GNSS, doit impérativement être située dans une clairière largement dégagée. Elle enregistre sa position pendant tout le temps du levé et diffuse une correction de position en temps réel par radio. L'antenne GNSS mobile calcule sa position précise en temps réel tant que la correction lui parvient par radio. La portée pratique de la radio est limitée à environ 1 kilomètre, pour autant que le relief ou la végétation ne réduise le signal. La difficulté ultime des systèmes GNSS est qu'il faut un ciel sans obstacle au-dessus de l'antenne pour obtenir une mesure. La dégradation du signal GNSS à travers la canopée empêche par exemple un positionnement précis temps réel.

Le système mis en œuvre pendant la mission de terrain est un système Trimble R8 pivot+mobile. Un équipement datant du début des années 2010. Le matériel, loué au bureau SIAGE à Cayenne, n'était capable d'observer que les constellations GPS et GLONASS ce qui limitait la réception à une douzaine ou une quinzaine de satellites simultanément. Un équipement GNSS plus récent aurait permis d'observer les constellations Galileo et Beidou, augmentant le nombre de satellites observables à une trentaine.

À noter que la position du levé GNSS, sans rattachement au réseau géodésique permanent de l'IGN (RGP), est flottante. Il est possible de rattacher les enregistrements de position de la base GNSS au réseau RGP grâce au service de calcul en ligne de l'IGN ([http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul\\_online.php](http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul_online.php)).

Devant les difficultés d'observation GNSS sous la forêt, qui avaient été identifiées avant la mission, nous avons opté pour une technique de validation permettant au moins de vérifier l'altitude relative des points lidar. Cette technique a permis de contrôler que les lignes de vol étaient correctement repositionnées entre elles et que l'altitude des points classés « sol » était bien à une altitude donnée sous le niveau repère. Pour cela, six parasols de 90 cm de rayon ont été déployés, soit une surface de référence de 2,54 m<sup>2</sup>. Plantés à exactement 1,50 m du sol, ils ont été placés dans des zones dégagées de végétation basse (Figure 11).



Figure 11 : Technique de validation ayant été testée au cours de la mission. Elle a consisté à placer des parasols dans des zones dégagées, afin de servir à la validation de l'altitude relative des points lidar (photo : T. Dewez). Le sommet du parasol se trouve exactement à 1,50 m du sol.

#### b) Solution de validation de la position planimétrique

Le positionnement planimétrique exact des levés par drone n'est pas une contrainte forte pour un levé unique. Un positionnement métrique peut amplement suffire. Le positionnement centimétrique n'est utile que pour comparer des données acquises à des époques différents ou pour croiser des informations spatiales acquises par des moyens différents (p.ex. données photogrammétriques et lidar). Dans ce cas, il faut recourir à l'utilisation d'objets mesurés sur le terrain et visible à la fois dans les photos aériennes et dans le signal du lidar.

Pour cela, nous avons eu recours à des cibles à damier (cibles de de 20 x 20 cm à 4 quadrants contrastés, Figure 12). Celles-ci n'ont été visibles que dans les photos de la plaine alluviale dégagée. Sous forêt, bien que nous en ayons positionné plusieurs dans des trouées de végétation, elles n'ont pas été vue depuis le drone.

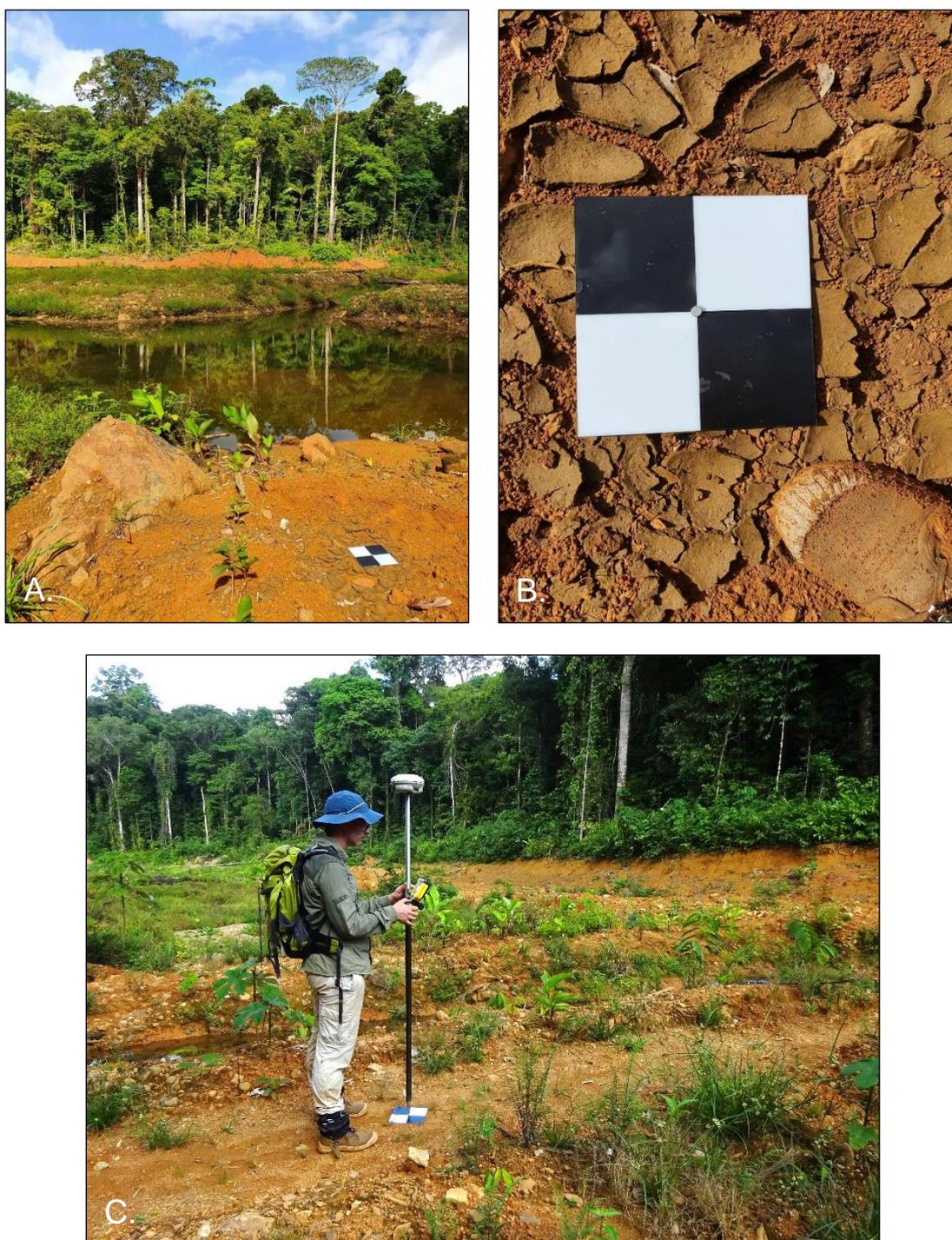


Figure 12 : Cibles de géoréférencement photogrammétrique de 20 x 20 cm (photos : T. Dewez, M. Chevillard). A. Cible en contexte. B. Vue de détail. Le centre de la cible est percé pour planter un clou qui immobilise la cible en position. Ce clou matérialise précisément le point stationné avec la canne de l'antenne GNSS mobile (C).

## 2.5. TRAITEMENT DES DONNÉES

Les survols drone ont généré deux principaux lots de données : des **nuages de points lidar en 3D** relatifs à la position instantanée du drone et des **photos aériennes nadirales** (*i.e.* pointant vers le bas, le nadir est l'opposé du zénith), chaque lot de photos étant accompagné de l'enregistrement de la trajectoire du drone.

Cette section décrit succinctement les méthodes de traitement mises en œuvre pour générer l'orthomosaïque à partir des photos et le nuage de points 3D final, qui a été ensuite dérivé en grille afin d'obtenir un modèle numérique de surface (MNS) et un modèle numérique de terrain (MNT). Ces opérations ont été réalisées par L'Avion Jaune au retour de la mission en métropole.

### 2.5.1. Trajectoire du drone

Le drone Trinity F90+ dispose d'un système d'enregistrement GNSS précis de sa trajectoire. Celle-ci sert au géoréférencement des prises de vue par rapport à une base GNSS (iBase) propre au système Quantum.

La base iBase a été positionnée sur une cible à quadrants bien visible sur les photos. Sa position absolue a été déterminée par l'outil de calcul GNSS en ligne de l'IGN ([http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul\\_online.php](http://rgp.ign.fr/SERVICES/calcul_online.php)) et par le service géodésique en ligne du Canada à partir de trois sessions d'enregistrement de 2h, 4h30 et 1h30, et comparée pour validation avec le levé GNSS Trimble de la cible sur laquelle l'iBase était installée.

L'enregistrement de la position de l'iBase doit être actif durant les sessions de vol pour permettre une correction des positions en mode de calcul PPK (*precise point kinematic*). Les positions précises sont ensuite inscrites dans les en-têtes des photos grâce au logiciel Quantum QBase.

### 2.5.2. Traitement des données photogrammétriques

Deux vols photogrammétriques ont été réalisés sur la crique Georgeon, le 7 et le 8 octobre. Les photos étaient prises en format JPEG à faible compression pour éviter d'engorger la mémoire de l'appareil photo lors des lignes de vol. De ce fait, aucune conversion RAW vers JPEG des photos n'a été nécessaire.

Les traitements photogrammétriques ont été réalisés avec la suite logicielle *Correlator3D* de Simactive. Ils ont consisté d'abord à calculer la position relative des clichés entre eux. Cette étape peut exploiter la position géographique des photos si elle est connue. C'est l'étape d'aérotriangulation. Ensuite, le calcul du relief à haute résolution a été effectué. Enfin, un calcul d'orthorectification a été réalisé.

L'orthorectification est l'étape de correction des effets de projection par symétrie centrale, créés par l'appareil photo. Ces effets de projection provoquent un déversement des objets en relief par rapport au centre de chaque photo. Il est d'autant plus marqué que le relief de la scène est prononcé. Ce déversement a été corrigé pour chaque photo. Celles-ci ont ensuite été assemblés en une mosaïque continue aux couleurs équilibrées.

Lors du premier vol du 7 octobre 2021, les photos ont été parfaitement exposées, mais l'iBase n'était pas encore installée. Aucune position précise n'a donc pu être inscrite dans les en-tête de photos pour dérouler le traitement habituel. En revanche, lors du vol du 8 octobre, l'iBase était installée et fonctionnelle, mais les conditions d'illumination étant moins bonnes que la veille. Le lot de photos comprenait des clichés flous avec du filé, mais disposant d'une position précise.

Le traitement a donc consisté à réaliser une aérotriangulation compilant les deux dates de vol. La position absolue des clichés a été calculée pour le vol du 8 octobre avec ses photos floues. L'orthophoto du 8 octobre a ensuite servi pour générer des points d'ancrage pour géoréférencer l'orthophoto du 7 octobre.

La validation du géoréférencement a été réalisée à partir du système de validation topographique ayant été mis en place (cf. section 2.4.3.). Elle a consisté à utiliser les points de contrôle relevés sur le terrain avec l'antenne GNSS Trimble – à la fois les cibles et les quelques points remarquables mesurés dans la plaine alluviale déboisée – et à les superposer à l'orthomosaïque ainsi définie (Figure 13). On y observe une parfaite superposition validant la position de l'orthophoto finale.



Figure 13 : Position GNSS Trimble (points rouges) validant la position planimétrique de l'orthomosaïque. Les détails employés : rebord abrupt de berge, extrémités et points axiaux d'un tronc d'arbre, bordure d'un réservoir métallique montre la parfaite adéquation de la position entre l'orthophoto et les points de contrôle.

### 2.5.3. Traitement des données lidar

Le traitement de données lidar consiste à transformer les données brutes relatives à la position instantanée du capteur, en des points 3D géoréférencés dans l'espace, en exploitant les informations de trajectoire du drone, ensuite en ajustant les lignes de vol entre elles, puis enfin, en distinguant et classant la nature des réflecteurs sur lesquels les rayons laser se sont réfléchis. Le nuage de point est ensuite transformé en grille de modèle numérique de surface (MNS) ou modèle numérique de terrain (MNT).

#### a) Alignement des lignes de vols

Techniquement, les données sont stockées sous forme de fichiers bruts. Les nuages de points ont été extraits pour chaque ligne de vol avec le logiciel *CloudStation* de YellowScan, et triés pour éliminer les zones de moindre qualité telles que les virages.

Le post-traitement de la trajectoire a été réalisé dans la suite logicielle *PosPAC* d'Applanix. Le traitement a consisté à importer la trajectoire enregistrée par la centrale inertielle du lidar et les corrections enregistrées par la station GNSS Quantum iBase. Des algorithmes de correction ont permis de générer une trajectoire corrigée, qui a ensuite été utilisée pour produire le nuage de points sur lequel le traitement a été réalisé. Cette étape a permis de repositionner chaque ligne de vol du lidar à ~ 3 cm en X,Y,Z.

La suite du traitement a été opérée dans *CloudStation* et a consisté à aligner les lignes de vol entre elles (Figure 14). Cette étape a permis d'obtenir une précision de l'ordre de 5 cm en absolu sur l'ensemble du nuage de points, et de générer des transitions plus homogènes d'une ligne à l'autre.

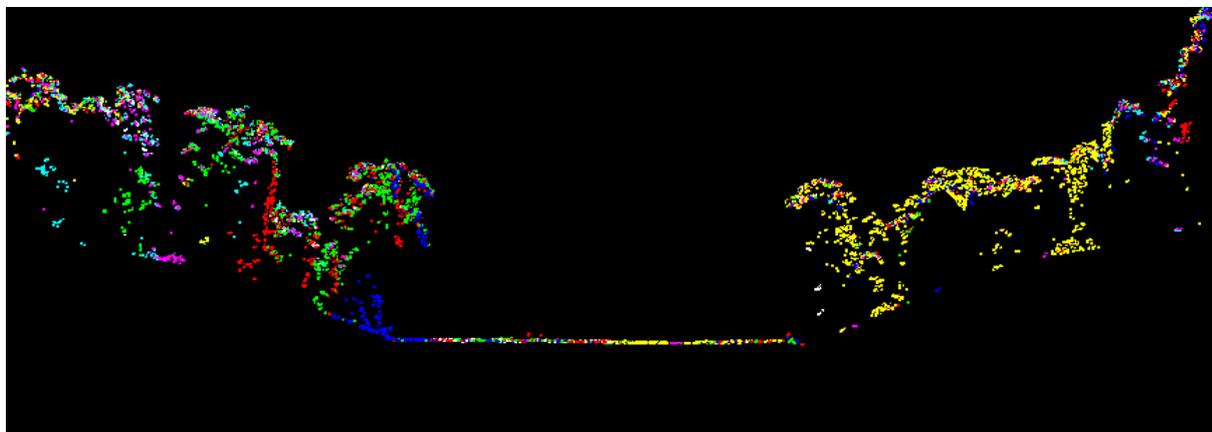


Figure 14 : Visualisation du nuage de points après ajustement des lignes de vol (1 couleur par ligne de vol). Source : L'Avion Jaune.

#### b) Classification du nuage de points

La classification du nuage de points a été produite dans le module *TerraScan* de la suite *TerraSolid*, en appliquant des algorithmes de traitement paramétrable selon la nature du terrain. Après alignement et superposition de toutes les lignes de vol, le nuage de points a été classé en trois classes suivant la nomenclature du standard international LAS 1.4 (Figure 15) :

- la valeur 2 a été attribuée au points « sol »,
- la valeur 3, à la « végétation basse » (< 3 m de hauteur)
- et la valeur 5, à la « végétation haute » ( $\geq 3$  m de hauteur).

Quelques reprises manuelles ont été effectuées ponctuellement afin d'améliorer la classification des « points sol ».

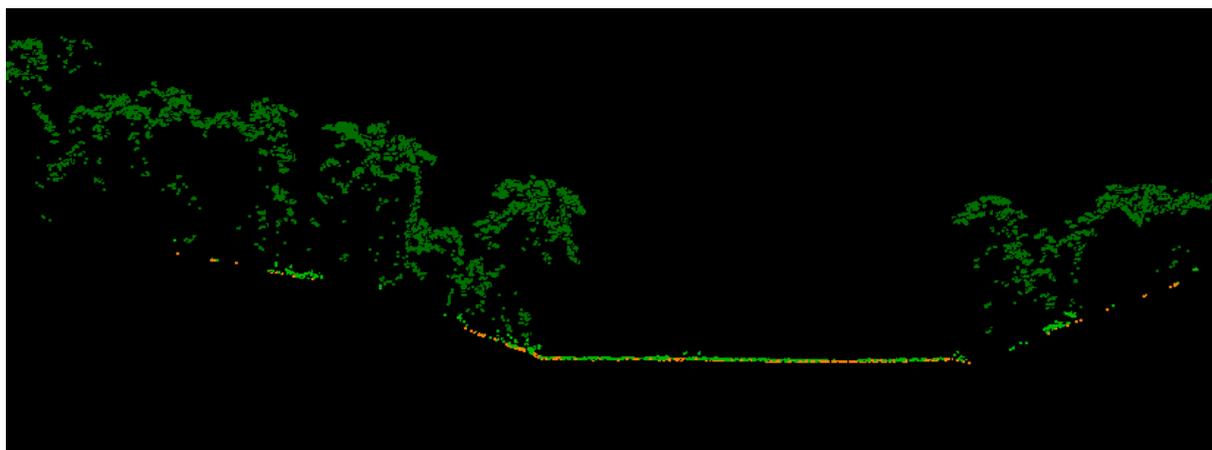


Figure 15 : Vue en coupe du nuage de points classé sur Georgeon. En orange, les points classés « sol » ; en vert, les points « végétation basse » ; en vert foncé, les points « végétation haute ». Source : L'Avion Jaune.

## 2.6. RÉSULTATS

Seuls les résultats du secteur Georgeon pour lequel plusieurs vols ont été cumulés et pour lequel la topographie est particulièrement favorable, sont détaillés dans cette partie. Des livrables analogues à ceux de Georgeon ont été obtenus sur Valentin, mais ne sont pas présentés ici. La topographie étant plus plane, ils sont moins propices à une démarche méthodologique d'analyse des données.

### 2.6.1. Cartographie de la crique Georgeon

Les différentes acquisitions ont débouché sur la production d'un nuage de points 3D lidar (Figure 16). Celui-ci contient plus de 191,5 millions de points et cumule les points acquis lors des quatre vols sélectionnés suite aux traitements des données (cf. Tableau 3).

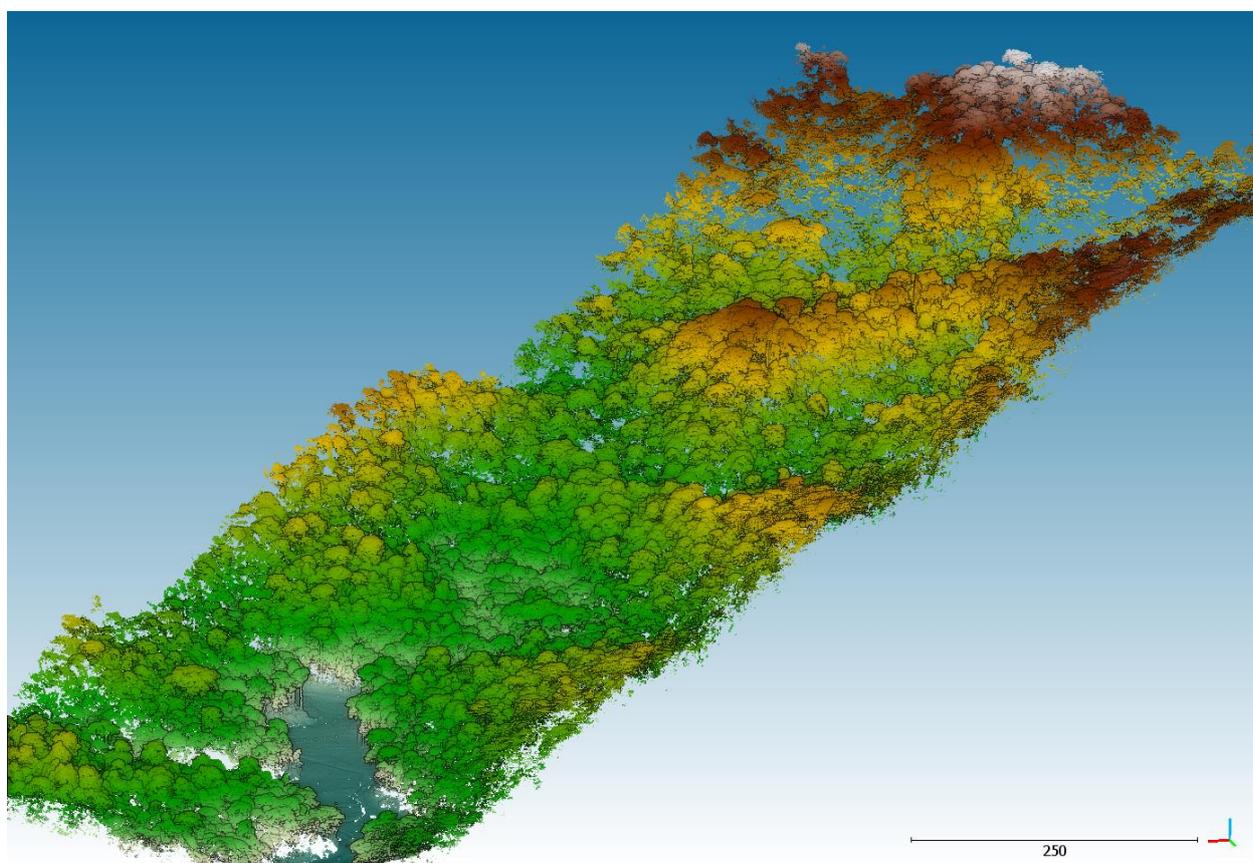


Figure 16 : Nuage 3D des 191,5 millions de points lidar de la crique Georgeon colorisé par altitude. Dans le bas de la figure, la plaine alluviale dégagée apparaît comme une zone plane entre les versants boisés. A mi-distance et en fond de vallée, la topographie s'élève, ayant obligé le drone à garder une altitude suffisante pour voler sans risque.

À partir de ce nuage de points 3D et de la campagne de photos aériennes, les produits cartographiques suivants ont été générés sur la zone d'étude (Figure 17) :

- Une **orthophoto** à 5 cm/pixel ;
- Un **modèle numérique de surface (MNS)**, utilisant les points les plus élevés du nuage de points 3D, interpolé à 20 cm/pixel. Il représente les éléments bruts du terrain comprenant le sol et la végétation ;

- Un **modèle numérique de terrain** (MNT) compilant seulement les points 3D classés « sol », puis interpolé à 1 m/pixel. Il représente le modelé du terrain qui sera par la suite valorisé pour déterminer les formes géomorphologiques au sein de la vallée alluviale.

Ces produits cartographiques constituent les livrables de base que l'on peut obtenir à partir de ce type d'acquisition. Bien entendu, en fonction des équipements et des capteurs utilisés, les résolutions et les paramètres d'interpolation varieront d'un levé à l'autre.

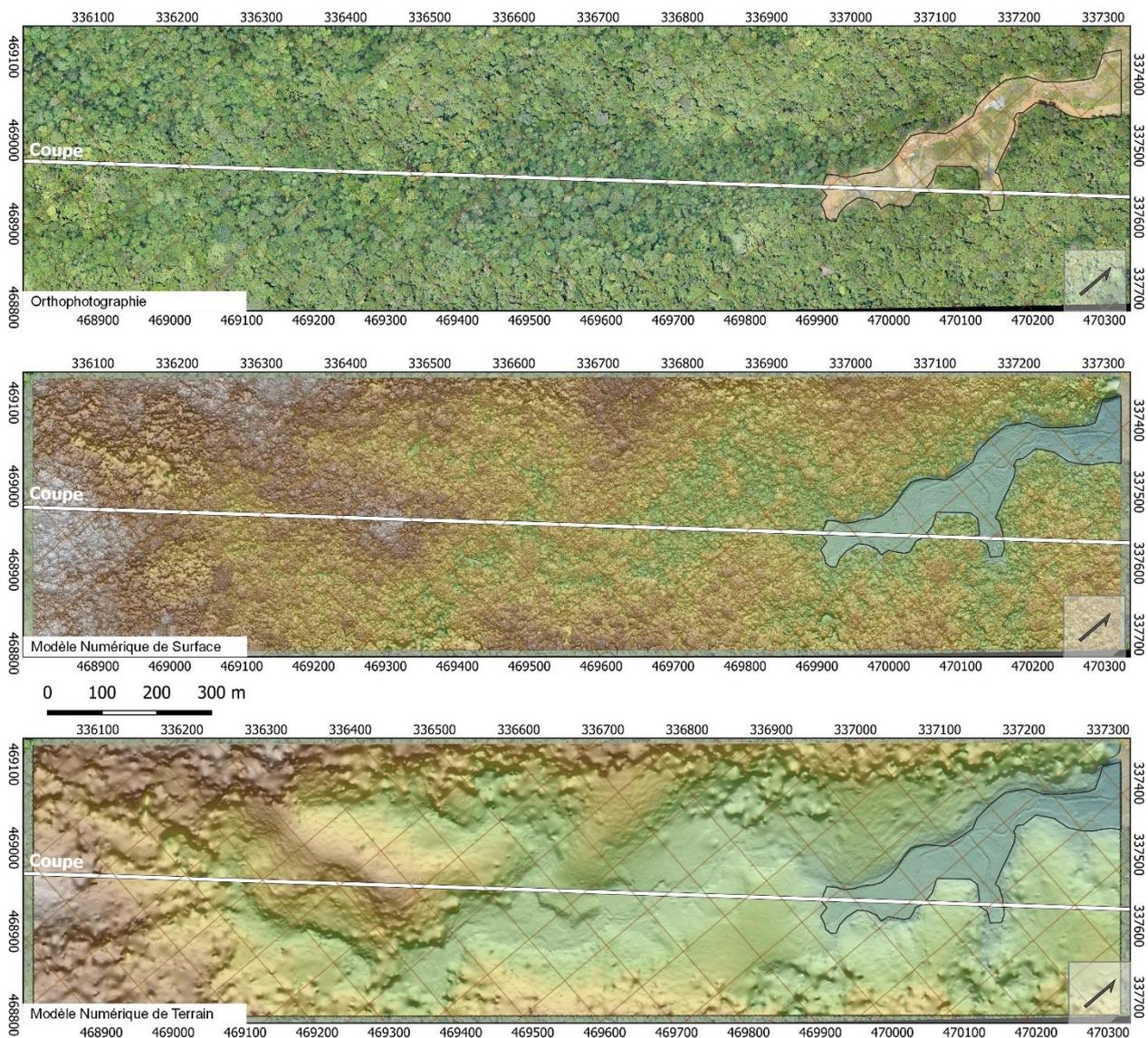


Figure 17 : Orthophotographie, Modèle Numérique de Surface (MNS) et Modèle Numérique de terrain (MNT) lidar de la crique Georgeon acquis par drone en octobre 2021. Le carroyage est désorienté pour faciliter la représentation (flèche du nord indiquée dans le coin inférieur droit des cartes). La coupe longitudinale du nuage de points est figurée en trait blanc (cf. Figure 18).

## 2.6.2. Cartographie du couvert forestier avec le lidar Qube240

L'emprise de la zone d'étude est couverte de forêt à 95% (Figure 17). Se pose donc la question de connaître la performance du système lidar sur drone pour imager le relief sous une canopée de forêt équatoriale, dans un bassin versant dont le relief total (topographie + végétation) dépasse la portée nominale du lidar.

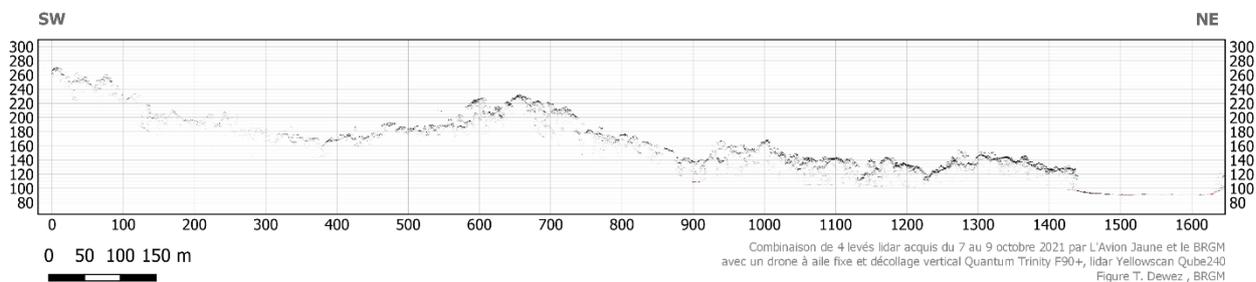


Figure 18 : Coupe longitudinale à travers le nuage de points lidar brut (voir position sur Figure 17). La surface la plus visible est évidemment la canopée de la forêt où le maximum de points lidar s'est arrêté. Néanmoins, localement, les rayons laser ont pu pénétrer jusqu'au sol.

Qualitativement, une coupe verticale, de l'amont à l'aval du bassin versant, permet de visualiser le relief total (Figure 18). Sur cette coupe, ce dernier atteint environ 200 m d'amplitude entre le sommet des arbres en tête de bassin versant et le fond de la plaine alluviale dégagée à l'aval. Le milieu végétal se confirme être « semi-transparent » aux rayons lumineux du lidar (Figure 18). Des interstices dans la végétation permettent en effet à la lumière d'atteindre localement le sol. Lorsqu'un tir lidar passe par un de ces interstices, l'altitude du sol peut être mesurée. Si les tirs sont suffisamment denses, un certain nombre d'entre eux atteindront le sol, permettant par la suite de calculer le MNT.

La Figure 19 décrit la densité de points ayant atteint la canopée et le sol. La canopée est évidemment la surface la plus facile à atteindre puisqu'il n'y a que l'obstacle de la hauteur de vol pour limiter la densité de points. C'est notamment ce facteur qui réduit la densité de points à l'amont et dans la plaine déboisée. La partie boisée centrale de la crique voit une densité dépassant 100 pts/m<sup>2</sup> (en vert clair sur la figure) avec une plus forte concentration de points sur les sommets (en jaune).

Comme on pouvait s'y attendre, la densité de points au sol (Figure 19) est nettement plus faible. La zone déboisée et quelques pixels sur la crête centrale, à l'amont du bassin versant, comprennent de 4 à 100 pts/m<sup>2</sup>. Le restant est surtout couvert à moins de 1 pt/m<sup>2</sup> en moyenne (en bleu et noir). Dans ces circonstances, il est évidemment possible d'interpoler un MNT à 1 m<sup>2</sup>/pixel, mais la plupart des pixels ne contiendront pas 1 point lidar.

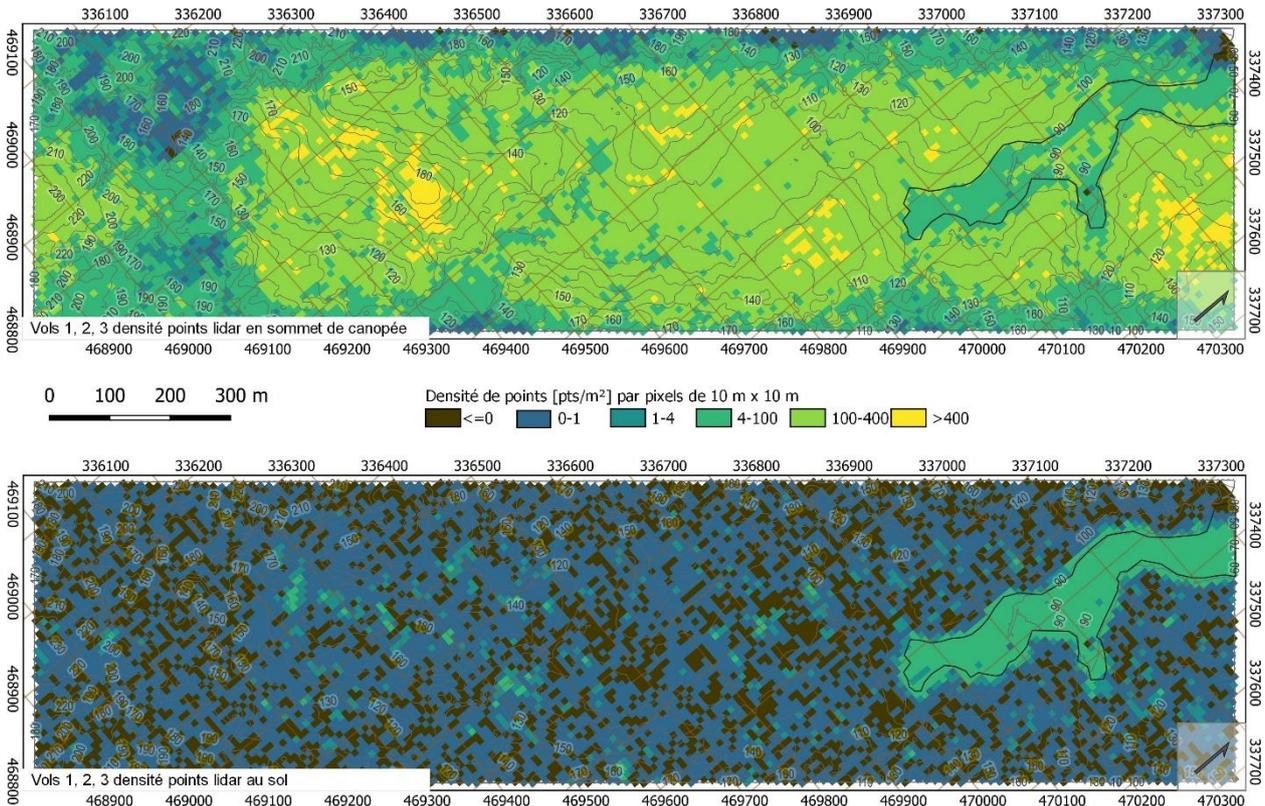


Figure 19 : Carte de densité de points (en pts/m<sup>2</sup>) intégrée par pixel de 10 x 10 m (100 m<sup>2</sup>) pour les vols lidar 1, 2 et 3. Haut : densité de points au sommet de canopée. Les variations de densité sont causées par les variations de distance au drone. Les zones les plus denses sont les plus hautes. Les zones moins denses se trouvent dans les zones particulièrement encaissées combinant relief à proximité et hauteur des arbres. Bas : densité de points classés « sol » (catégorie 2). La plaine alluviale déboisée ressort nettement avec 4-100 pts/m<sup>2</sup> (en vert). Le reste de la zone, essentiellement forestière a quant à elle majoritairement une densité de 0 à 1 pt/m<sup>2</sup> (voir détails dans le Tableau 4).

Le Tableau 4 résume la densité de points combinant les trois premiers vols lidar. L'objectif minimal demandé dans le cahier des charges était de mailler un MNT à 10 m/pix avec une information d'altitude en chaque pixel (ce qui induit une densité de points au sol dépassant en tous points 1pt/100m<sup>2</sup>). Pour atteindre cet objectif minimal malgré la végétation, la densité de points préconisée demandait 400 pts/m<sup>2</sup> en sommet de canopée. Avec une telle densité en sommet de canopée, il était plausible d'espérer un MNT au pas de 1m/pixel. Dans la réalité, une telle densité de points s'avère être difficile à obtenir.

En sommet de canopée, l'objectif de 400 pts/m<sup>2</sup> n'a été atteint que sur 3,7% de la superficie, principalement au niveau des reliefs hauts (Figure 19). Le terrain couvert de 100 à 400 pts/m<sup>2</sup> en sommet de canopée (Tableau 4) correspond à plus de la moitié du territoire (53 %). Un tiers de la superficie en sommet de canopée (34 %) comporte 4 à 100 pts/m<sup>2</sup>. Ceci laisse encore 4 % du territoire avec trop peu d'information pour espérer y mesurer l'altitude du sol.

Concernant la densité de points classés « sol » issus des trois premiers vols, 68% de la superficie du sol permet la réalisation d'un MNT à 1 pt par pixel de 10 m. Le corollaire est qu'environ un tiers de la superficie n'est pas couvert par 1 pt sol par 100 m<sup>2</sup>.

Classe de densité	Canopée		Sol	
	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Pourcentage	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Pourcentage
aucun point	2900	0.29%	314700	31.52%
de 1pt/100m <sup>2</sup> à 1 pt/m <sup>2</sup>	40500	4.06%	577300	57.82%
de 1 à 4 pts/m <sup>2</sup>	51000	5.11%	44800	4.49%
de 4 à 100 pts/m <sup>2</sup>	336900	33.74%	61600	6.17%
de 100 à 400 pts/m <sup>2</sup>	530000	53.08%	-	-
> 400 pts/m <sup>2</sup>	37100	3.72%	-	-

Tableau 4 : Densité de points lidar issus des vols 1, 2, et 3 (voir répartition spatiale Figure 19) et caractéristiques des vols (Tableau 3).

Dans la partie « Discussion » (section 2.7.) seront abordés plus en détail différents éléments concernant la performance du système lidar pour produire des MNT.

### 2.6.3. Interprétation géomorphologique : plaine alluviale et glissements de terrain

Outre les critères chiffrés de densité de points atteignant le sol et les conditions limites des équipements testés, la véritable question est de savoir si la cartographie obtenue est satisfaisante pour permettre de mieux caractériser la zone, en particulier la géométrie de la zone de flat.

Pour cela, une interprétation géomorphologique de la zone d'étude a été réalisée. Elle s'est appuyée sur l'analyse du MNT interpolé à 1 m, couplé à un ombrage transparent (Figure 21). Bien que nous ayons calculé que cette densité d'interpolation soit clairement surestimée dans certains secteurs (cf. section 2.7.3), c'est à cette résolution que la plaine alluviale est représentée avec le plus de finesse, en particulier grâce au vol 4.

L'interprétation géomorphologique effectuée a permis de mettre en évidence les éléments suivants :

- La **zone de plaine alluviale** (*i.e.* le flat) dont la géométrie a pu être cartographiée avec une précision satisfaisante. Elle se présente selon une zone dont la largeur varie de 20 m pour le tronçon le plus resserré, à 60 m de large pour les portions les plus étendues, pour une surface totale de 49 400 m<sup>2</sup>. En termes de largeur, la zone de flat mise en évidence est relativement réduite compte tenu de la position amont de la zone investiguée ;
- Le **tracé des cours d'eau**, à la fois du lit principal et des affluents périphériques ;
- Des zones de **terrasse alluvionnaires**, dont celle située rive gauche de la crique Georgeon a pu être vérifiée sur le terrain ;
- Des **traces d'orpillage historique « créole »**, qui se matérialisent dans le jeu de données lidar, par des formes morphologiques linéaires de quelques dizaines de mètres de long (max. 40 m) pour des largeurs de 2 à 5 m (Figure 20). Elles sont situées dans les alluvions au plus proche du cours d'eau principal. Certaines ont pu être vérifiées sur le terrain et d'autres interprétées comme tel par analogie morphologique. Ces indications d'orpillage historique sont particulièrement précieuses dans le cadre de travaux d'exploration et permet de confirmer le caractère prospectif d'une zone quand elles peuvent être repérées ;
- Plusieurs **paléo-glissements de terrain** dont les cicatrices d'arrachement et les matériaux mis en mouvement sont nettement visibles dans le jeu de données. Ils sont représentés par

des loupes de glissement dirigées vers le centre de la vallée, dont les matériaux viennent recouvrir les sédiments de la zone alluviale. Sur le terrain, ces aplats peuvent être interprétés à tort comme des terrasses alluvionnaires, ce qui pourrait expliquer l'absence de teneurs positives localement : matériaux de glissement / colluvions a priori non minéralisés, terrasses alluvionnaires pouvant être potentiellement minéralisées.

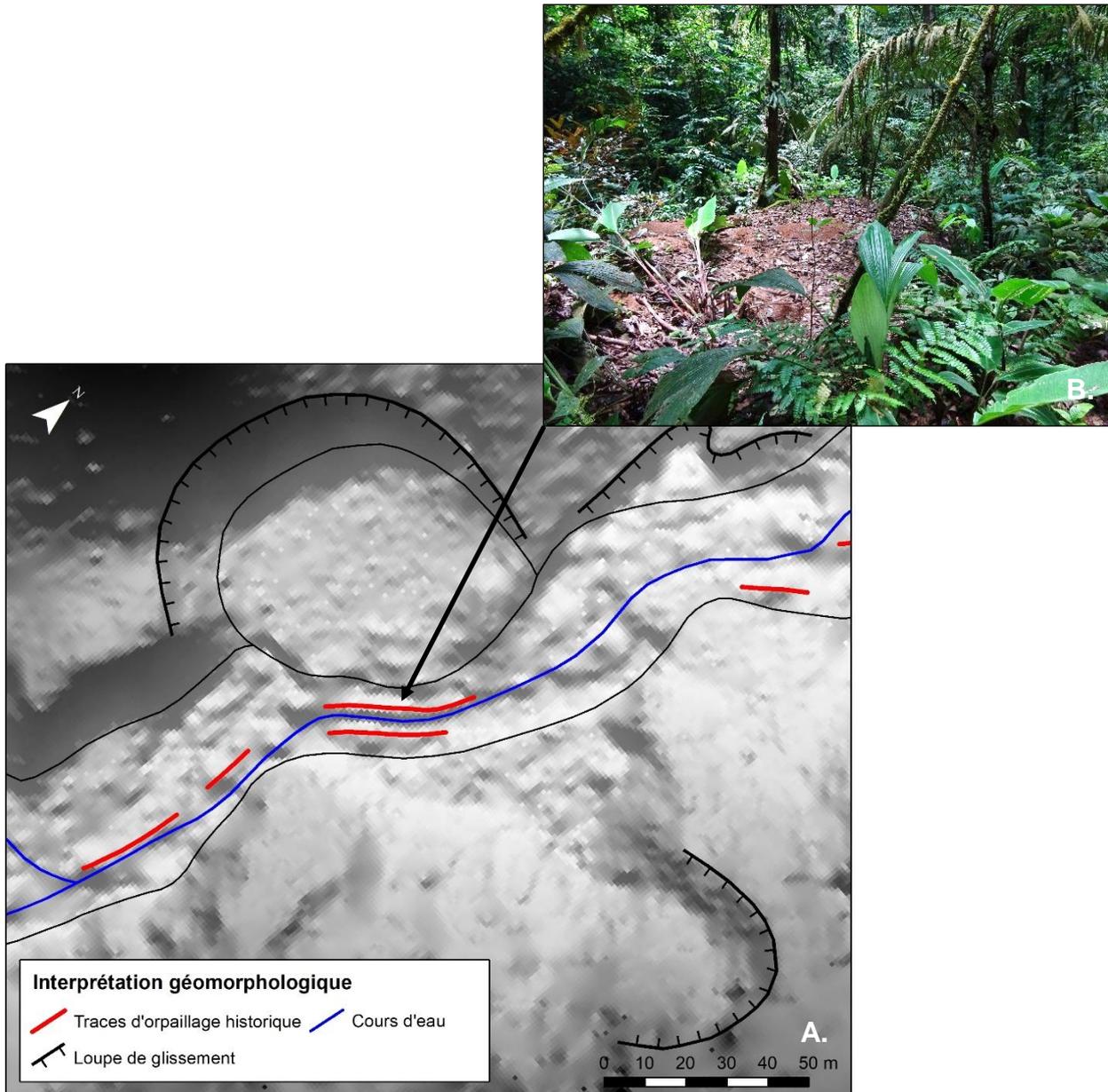


Figure 20 : A. Zoom permettant d'apprécier la résolution des données lidar. On distingue en particulier des formes linéaires proches du lit mineur, correspondant à des buttes de matériaux remaniés résultant d'orpaillage historique « créole », dont la nature a pu être vérifiée sur le terrain (B). Photo : M. Chevillard.

De manière générale, les éléments mis en évidence ont pu être cartographiés avec précision dans la zone du vol 4, dont la résolution apparaît être clairement de meilleure qualité et permet de distinguer des objets remarquables. Dans la partie amont de la vallée, au-delà de la confluence avec le principal affluent rive gauche, la résolution est de qualité inférieure et les contours plus incertains (Figure 21). On y distingue encore le fond de vallée et la zone de flat supposée, mais les contours y sont nettement moins précis.

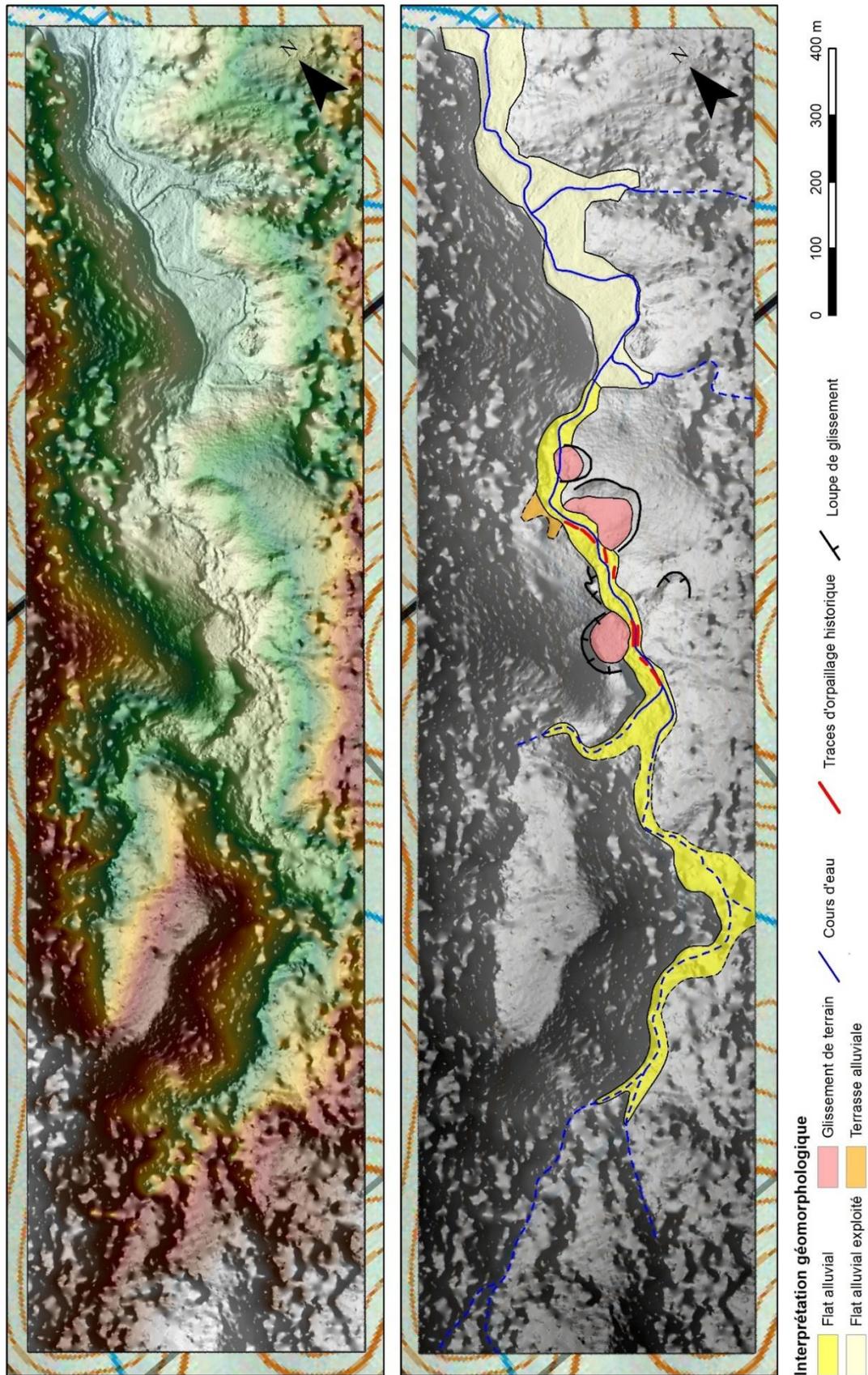


Figure 21 : Interprétation géomorphologique de la vallée alluviale à partir de la couverture lidar ayant été obtenue par acquisition drone. En haut : MNT et ombrage interpolé à 1 m de résolution. En bas : interprétation des principaux éléments géomorphologiques. Les contours qualifiés de « certains » sont indiqués en traits pleins, les contours « incertains » en traits pointillés.

#### 2.6.4. Applications des données dans le contexte de l'exploration alluvionnaire

La Figure 22 illustre par comparaison, le saut d'échelle qu'apporte une cartographie lidar par comparaison aux documents conventionnels à disposition de la profession dans le cadre de leurs travaux d'exploration, à savoir le fond IGN 1/50 000 et le SRTM 30 m. En effet, ces documents ne rapportent que l'altitude de la canopée et non l'altitude du sol, et ne présentent pas une résolution suffisante pour caractériser précisément une zone de flat.

Non pas que la cartographie lidar soit indispensable pour effectuer la mise en valeur d'un flat alluvionnaire ; néanmoins, ce type de données peut permettre d'apporter une plus-value significative dans le cadre de travaux de prospection et semble être déjà régulièrement utilisé par une partie de la profession. Dans le détail, les données lidar, peuvent être valorisées tout le long du cycle minier, depuis les premières phases d'exploration jusqu'à la réhabilitation :

- Durant les **phases d'exploration**, la cartographie lidar va permettre d'évaluer le dimensionnement et la morphologie des zones alluvionnaires. Dans le détail, elle va permettre de délimiter précisément les zones de flat (surface, périmètre), éventuellement définir des objets géomorphologiques remarquables (terrasses alluviales et/ou glissements de terrain), et peut également permettre de détecter des travaux d'orpaillage (orpaillage illégal, ou comme dans l'exemple ci-contre, des traces d'orpaillage historique datant du début du XX<sup>e</sup> siècle). Acquérir ce type de données au plus tôt durant les phases d'exploration peut également permettre d'adapter les travaux de prospection à réaliser, par exemple en réduisant le nombre de puits ou de layons à effectuer ;
- Durant la **phase d'exploitation**, les données lidar, couplées aux résultats d'exploration conventionnelle par « planchette », vont permettre de préciser l'extension des zones potentiellement exploitables et d'optimiser la planification et le suivi des travaux miniers. À noter que durant cette phase, l'acquisition photogrammétrique au moyen de drones multicoptères grand public, apparaît être un outil particulièrement adapté pour le suivi des travaux d'exploitation, dont l'utilisation semble se démocratiser au sein de la profession, et ne peut être que recommandée ;
- Enfin, durant la **phase de réhabilitation**, les données lidar peuvent être valorisées comme la définition à t<sub>0</sub>, d'une « topographie initiale avant exploitation », pouvant servir de base à la planification des travaux de restauration et au remodelage des vallées alluviales au plus proche du milieu naturel initial.

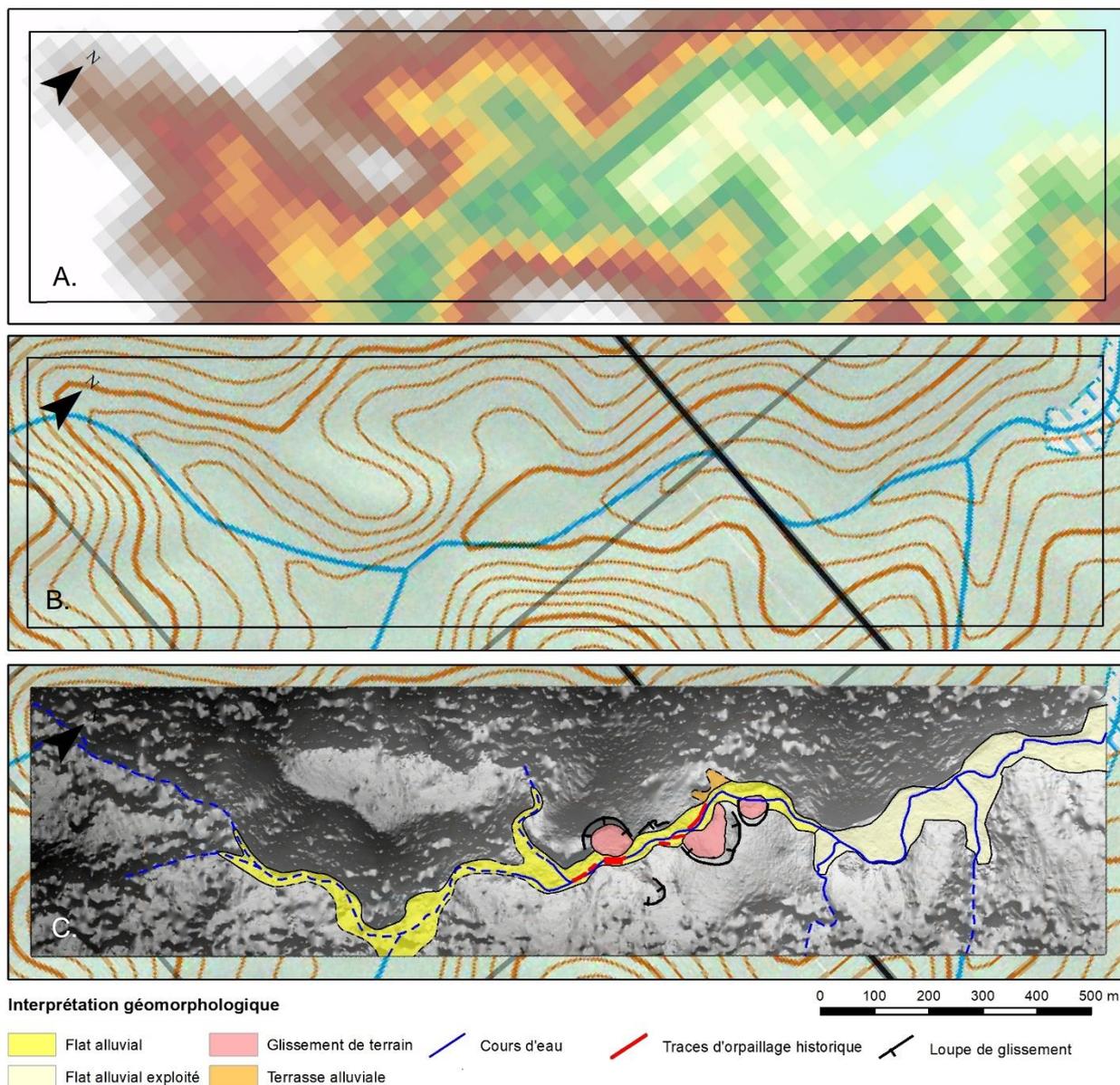


Figure 22 : Illustration de l'apport de données lidar, par comparaison aux données conventionnelles à disposition de la profession dans le cadre de travaux d'exploration alluvionnaire sur une ARM.  
 A. Données SRTM 30 m. B. Fond IGN au 1/50 000, où sont représentées les courbes de niveau et la position approximative des cours d'eau. C. Cartographie lidar haute-résolution permettant d'apprécier en détail la morphologie de la vallée alluviale et de pouvoir recontextualiser les données d'exploration.

## 2.7. DISCUSSION

Dans cette partie, une série de paramètres méritant un examen de détail seront discutés afin d'établir les conditions limites de l'acquisition ayant été réalisée et du matériel testé. Il s'agira en particulier de définir la densité de « points sol » en fonction de l'altitude de vol.

De la même manière que pour la partie « Résultats » (section 2.6.), seules les données sur Georgeon seront analysées en détail.

### 2.7.1. Pénétration du lidar jusqu'au sol

Au regard de la répartition des points lidar, le milieu forestier n'est pas aussi opaque qu'on pourrait le croire (Figure 23), sans pour autant être aussi transparent qu'on aurait pu l'espérer. Une quantification de la déperdition de points dans la colonne végétale est utile pour dimensionner de futures campagnes.

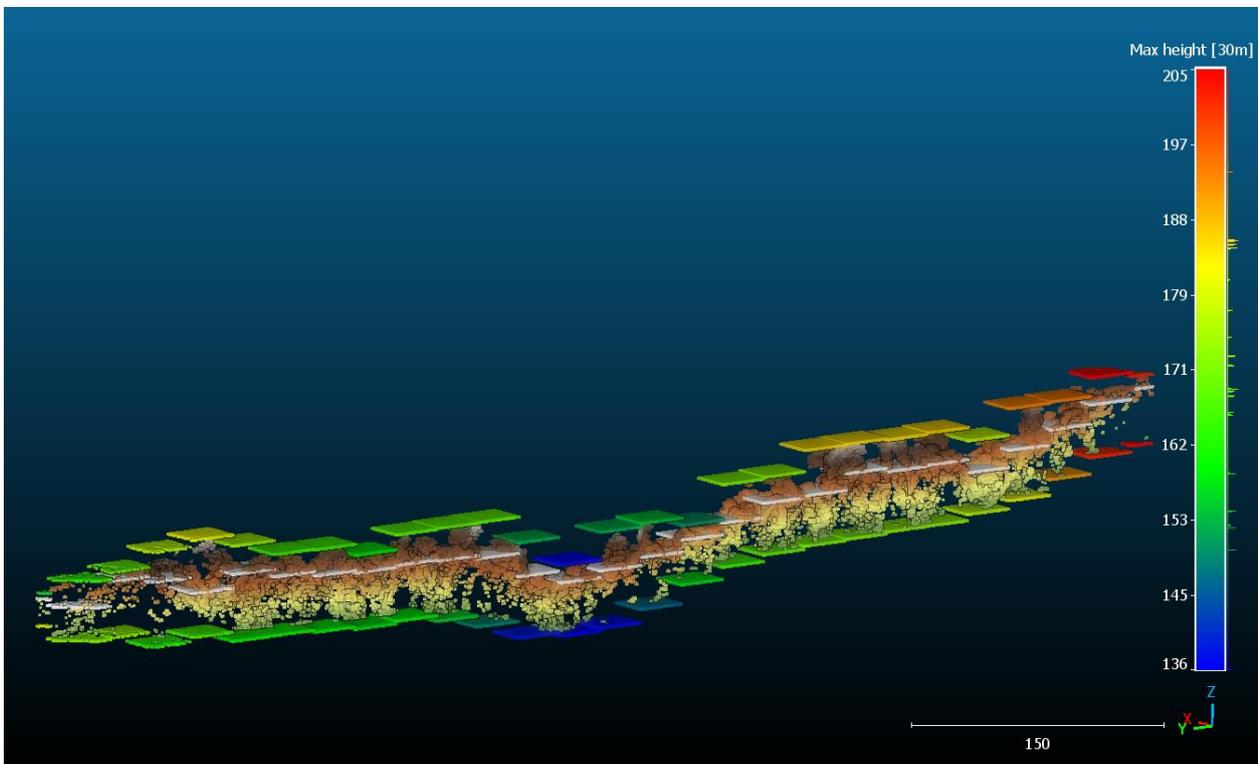


Figure 23 : Coupe transversale à travers la crique Georgeon. Le nuage de point original est figuré en même temps que les valeurs d'altitude minimale, médiane et maximale pour des mailles de 30 m de côté. La médiane (barres grise à mi-hauteur) est généralement déportée vers le haut de la colonne de points. Ceci indique que plus de la moitié des points lidar sont situés à proximité de la canopée.

Le Tableau 5 caractérise plus en détail la pénétration du couvert végétal par le lidar. Sur un total de 191,5 millions de points tirés sur l'emprise de 1 km<sup>2</sup>, 1,933 millions de points ont atteint le sol, soit environ 1 % des points (1 point sur 99 exactement). Mais comme la zone de l'ARM comporte environ 5 % de surface déboisée (voir Figure 17), le taux d'atteinte des points sols est biaisé par ce secteur sans forêt. C'est pourquoi la quantification a également été évaluée en excluant la zone déboisée (« sur forêt »). En zone forestière, il a fallu tirer de l'ordre de **255 points lidar pour atteindre une fois le sol** (Tableau 5).

Vol	Nombre de points lidar à tirer pour atteindre une seule fois le sol		Hauteur de vol au-dessus du sol [m] (min/mode/max)	Hauteur de vol au-dessus de la canopée [m] (min/mode/max)
	Emprise totale	Sur forêt		
<b>Tous les vols assemblés</b> (191,5 Mpts)	1/99	1/255		
<b>Vol 1</b> (5,5 Mpts)	1/390	1/1020	111/ <b>205</b> /294	70/ <b>180</b> /264
<b>Vol 2</b> (8,0 Mpts)	1/800	1/1412	89/ <b>185</b> /247	58/ <b>150</b> /218
<b>Vol 3</b> (132,8 Mpts)	1/130	1/395	35/ <b>136</b> /176	7/ <b>91</b> /127
<b>Vol 4</b> (45 Mpts)	1/50	1/136	34/ <b>74</b> /119	0/ <b>24</b> /74

Tableau 5 : Évaluation du nombre de points lidar ayant atteint le sol sur l'ensemble de la zone et spécifiquement en milieu forestier, en fonction des vols réalisés. L'altitude du drone au-dessus de la végétation et au-dessus du sol sont renseignés par un triplet de valeurs : hauteur de vol minimale, modale (càd. valeur la plus fréquemment observée pendant le vol) et hauteur maximale.

La performance d'atteinte du sol par les rayons lidar est modulée par la densité des interstices de la végétation laissant la lumière filtrer jusqu'au sol mais aussi par l'altitude de vol du drone au-dessus du sol. Ces altitudes sont résumées dans le Tableau 5 par le mode (hauteur de vol la plus fréquente) ainsi que par la hauteur de vol minimale et maximale. Les vols successifs se sont progressivement rapproché du sol et de la canopée. Avec une altitude de l'ordre de 180 à 200 m, les vols 1 et 2 mettent le lidar à la peine pour atteindre la canopée et le sol. Les constructeurs notent cependant que la portée maximale théorique du lidar Qub240 est de 140 m (<https://www.quantum-systems.com/project/qube-240-lidar/> dernière visite le 2 février 2022).

Le vol 3, réalisé majoritairement à 136 m du sol et jamais plus haut que 176 m du sol, réalise la meilleure performance globale sur l'ARM, avec 1 point sol tous les 395 tirs (Tableau 5). Sur ce vol, la pénétration des points dans les interstices de la végétation est d'environ 2,5 points pour mille. Ceci démontre empiriquement que la portée maximale réalisée par le lidar Qube240 est bien supérieure à la limite annoncée par le constructeur.

Malgré l'aléa lié aux conditions météorologiques, le vol 4 a conduit à des résultats encore meilleurs en termes de densité et de pénétration (Tableau 5). Avec un vol majoritairement à 74 m du sol, le taux de pénétration des points au sol est de 1/136, soit 7,4 points pour mille. C'est une pénétration 3 fois plus élevée que pour le vol 3 grâce à une altitude qui n'est que deux fois plus faible.

Pour compléter cette présentation des résultats, la Figure 24 reprend la densité de points lidar en sommet de canopée, vol par vol, estimée sur des pixels de 1 m<sup>2</sup> pour percevoir l'hétérogénéité spatiale de répartition des points. Lors des vols 1 et 2 (Figure 24), la hauteur de vol étaient correctement calibrée pour cartographier le versant amont de l'ARM et les crêtes saillantes recoupant l'axe de la vallée. À cette hauteur de vol cependant, les fonds de vallée étaient trop éloignés du drone pour être mesurés.

Les vols 3 et 4 ont clairement été les plus efficaces pour cartographier le fond de la vallée, avec des couvertures de points en sommet de canopée couvrant de manière homogène la zone d'étude.

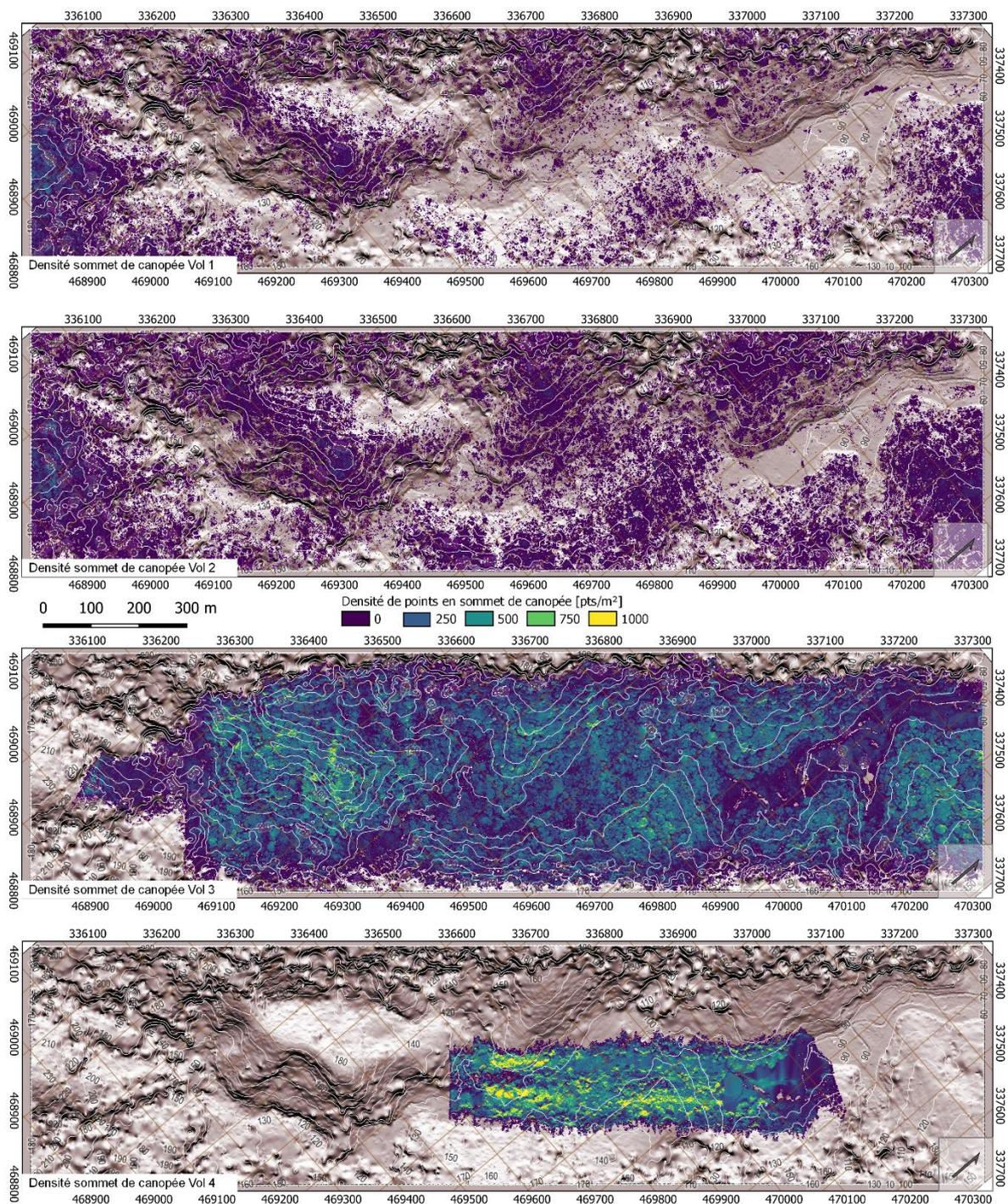


Figure 24 : Cartes de densité des points 3D lidar en sommet de canopée pour chaque vol individuel exprimées en pts/m<sup>2</sup> agrégés par mailles de 1 m<sup>2</sup>. Les liserés blancs figurent les courbes de niveaux tous les 10 m. Les altitudes de vol au-dessus du sol ont été progressivement abaissées pour couvrir la totalité du relief. Les vols 1 et 2 étaient beaucoup trop haut au-dessus du relief pour atteindre ne fuisse que la canopée en fond de vallée. Le vol 3 est le plus complet spatialement à une hauteur de vol comprise entre 35 et 176 m du sol (le plus souvent à 136 m/sol). Le vol 4 est celui qui présente nettement la plus forte densité de points.

### 2.7.2. Altitude de vol et portée effective du lidar

La Figure 24 et le Tableau 5 montrent le gain de performance du lidar lié la diminution de la hauteur de vol du drone au-dessus du sol. On comprend aisément que la densité de points augmente en diminuant la hauteur de vol puisque l'espace latéral des points est défini par un angle de balayage. Plus la surface réfléchissante intercepte cet angle à proximité du centre d'émission, plus l'espacement entre deux impulsions est petit.

La distance joue également sur la réduction du nombre de photons par unité de surface (décroissance en  $1/r^2$ , où  $r$  est la distance entre le lidar et le réflecteur). Le signal reçu est donc de plus en plus faible lorsque la distance s'accroît.

Pour évaluer empiriquement la portée maximale du lidar dans ce contexte de forêt équatoriale, plusieurs informations sont utiles : (i) le nuage de points total compilant les 3 vols, (ii) les nuages de points acquis lors du vol 1 et du vol 2 et (iii) les trajectoires du drone lors de ces deux vols. Avec les trajectoires de vol individuelles, la distance entre le drone et la topographie est connue partout. Les points les plus lointains issus d'un vol unique représentent la portée maximale du lidar, si et seulement si la scène possède bien des endroits plus éloignés du drone que la portée limite du lidar. Sinon, l'absence de point serait due à d'autres raisons que la portée limite du lidar.

Les vols 1 et 2 sont intéressants car tous les deux n'ont mesuré ni le relief des fonds de vallée, ni la surface du sol dégagé de la zone déboisée (Figure 24). C'est donc qu'il existe bien des endroits où la distance entre le drone et la topographie excède la portée du lidar.

La distance maximale des points du vol 1 à la trajectoire du drone est de 258,70 m, alors qu'il existe des points à mesurer jusqu'à 267 m de la trajectoire quand on considère le nuage complet. De même, la distance maximale des points du vol 2 est de 250,40 m, alors que la distance maximale rencontrée sur le nuage total est de 250,50 m. Donc lors du vol 2, l'absence de points est plutôt causée par d'autres difficultés que la portée limite du lidar.

Il peut s'agir de conditions de réflexion défavorables (surface humide et/ou sombre), de conditions d'absorption du signal (p.ex. humidité atmosphérique atténuant le signal lumineux) ou de conditions d'interception du signal par les strates multiples de végétation limitant la pénétration dans la canopée.

Donc a priori, à valeurs absolues égales, les vols 1 et 2 étaient dans la gamme de portée limite mais atteignable pour le lidar. Vu les distances mesurées avec succès, la portée maximale excède largement les 140 m de portée annoncée par Quantum pour le Qube240. Néanmoins à ces distances, les retours sont occasionnels et ne relèvent pas d'un levé dense comme escompté.

### 2.7.3. Densité de points au sol et maillage de MNT

La pénétration des tirs lidar dans les interstices de la végétation existe et le Tableau 5 en donne une première quantification. Cependant la distribution des points n'est pas homogène. Les points parvenant au sol sont regroupés dans des petites clairières éparses (Figure 25). À l'échelle du mètre carré, de grandes zones sans information d'altitude existent entre les taches de données (Figure 25). Cette distribution spatiale hétérogène est inévitable vu la répartition très inégale de la végétation dans ce type d'environnement (voir photos en Figure 3A et B et Figure 11).

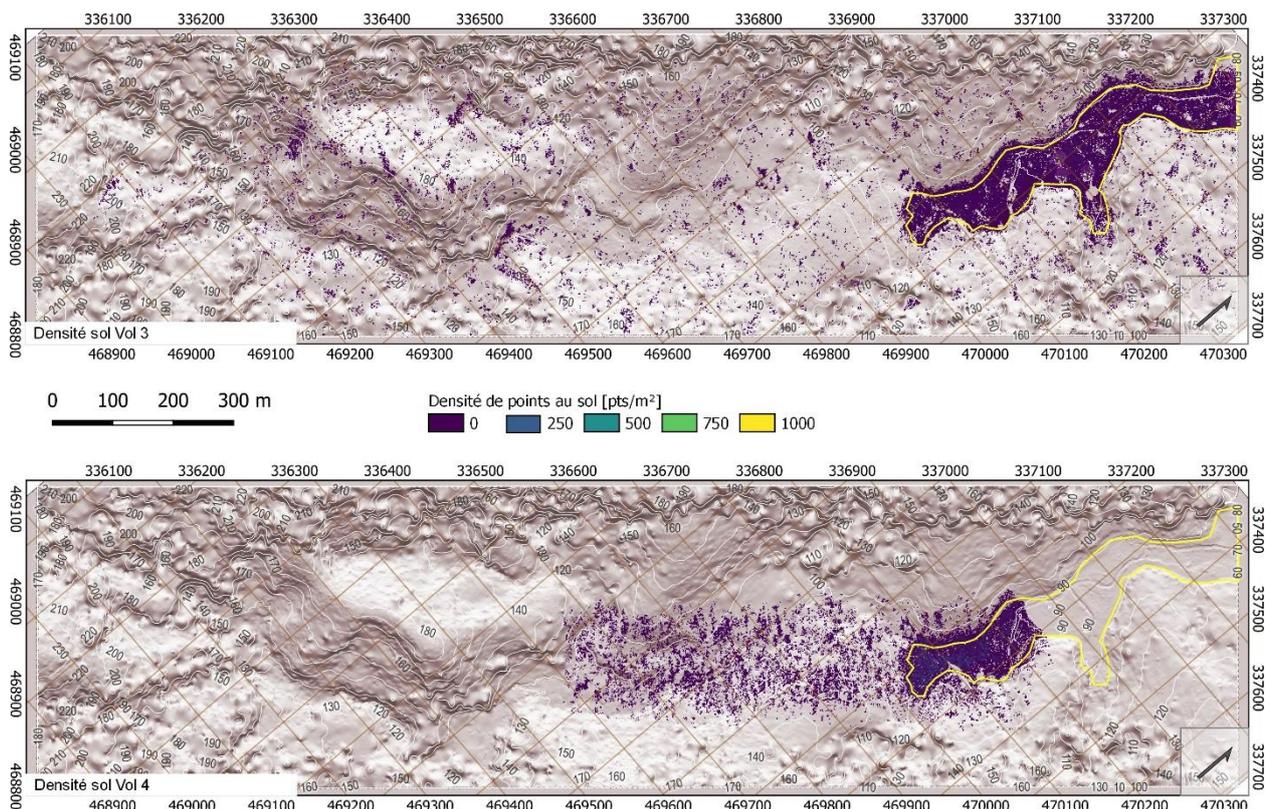
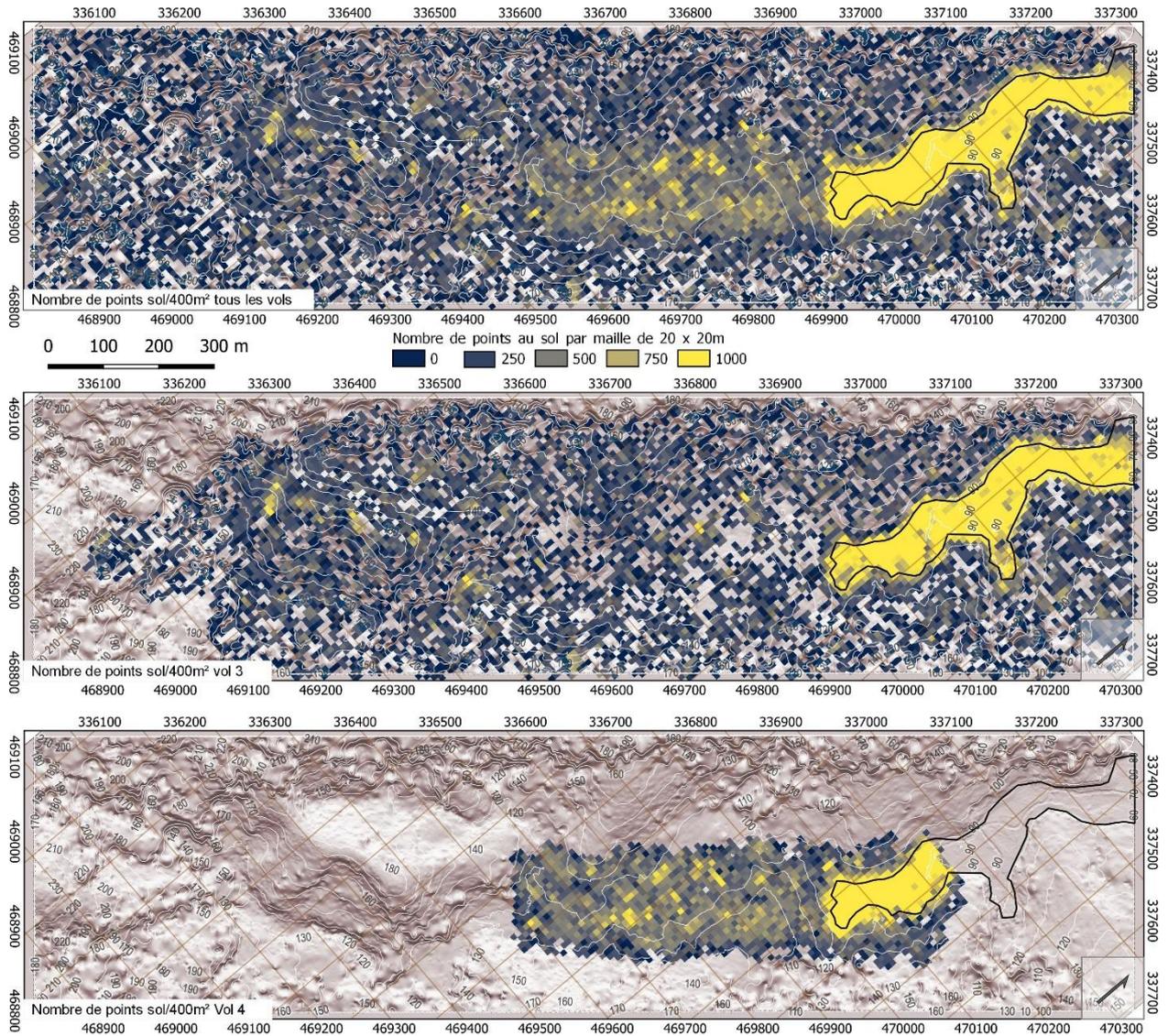
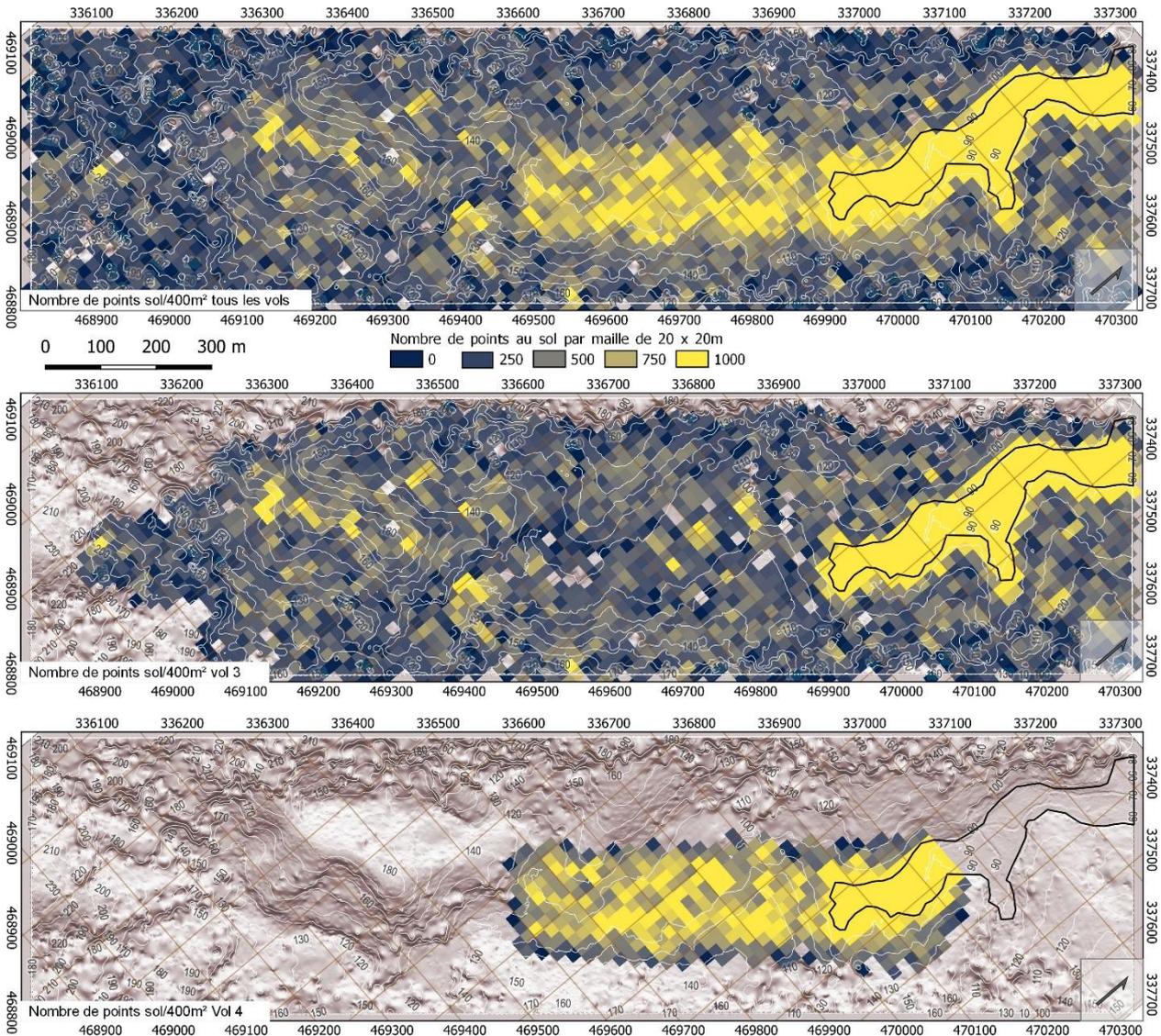


Figure 25 : Densité des points ayant atteint le sol lors des vol 3 (majoritairement 136 m/sol) et 4 (majoritairement 74 m/sol). Le trait jaune délimite la plaine alluviale déboisée, où la densité de points est évidemment la plus forte. Au vol 3, le sol est identifié par des groupements de points denses mais spatialement dispersés. Au vol 4, la densité est clairement meilleure, mais la manoeuvrabilité limitée du drone n'a pas permis de voler en sécurité au-dessus de la canopée.

La Figure 25, dont la grille de densité est estimée avec des pixels de 1 x 1 m, donne l'impression qu'il existe très peu de points ayant atteint le sol au sein de l'emprise boisée de l'ARM. En comptant les points « sol » agrégés par une maille de 10 x 10 m (Figure 26), on s'aperçoit qu'il existe bien des données partout sur l'emprise de la zone d'étude, même s'il reste des pixels de 100 m<sup>2</sup> encore vierges d'information.

Si on se contente de mailler le nuage de points à 20 m de résolution, le maillage devient alors quasiment complet (Figure 27).





On s'aperçoit avec ces différentes cartes que l'interpolation d'un MNT à 1 m de résolution (Figure 25) nécessite d'interpoler un très grand nombre de pixels. L'écrantage de la canopée est très fort, malgré la densité substantielle de points envoyés au sommet de la canopée. Un MNT à 1m de résolution n'est donc pas très pertinent pour figurer le relief sur la totalité de la zone de l'ARM. Seul le vol 4 a parfaitement bien couvert la plaine alluviale, cible d'intérêt, mais au prix d'un vol extrêmement bas, qu'on ne peut pas recommander en routine avec ce type de drone à aile fixe peu manoeuvrant pour épouser le terrain.

Pour une grille à 10 m de résolution (Figure 26), la couverture de points sol reste encore partiellement incomplète (de l'ordre de 30 %). Mais on constate que le vol 3, sans être aussi résolu que le vol 4 sur la plaine alluviale d'intérêt, offre une couverture raisonnablement complète. Ce vol a été réalisé à une hauteur de vol majoritairement à 136 m (entre 35 m et 176 m), et une hauteur de vol au-dessus de la canopée le plus souvent à 91 m (entre 7 m et 127 m).

La grille de densité de points sol maillée à 20 m (Figure 27) montre que c'est à cette résolution qu'on dispose de l'information d'altitude la plus complète pour reconstruire un MNT où l'altitude est connue en chaque pixel.

#### 2.7.4. Largeur des zones sans points sol

L'analyse de la densité de points ayant atteint le sol (section 2.7.3.) peut utilement être complétée par l'évaluation inverse : évaluer la largeur des zones dépourvues d'information au sol. Ceci permet d'objectiver le choix d'une maille du MNT visant à réduire la superficie sans information au strict minimum.

Cette évaluation a été réalisée par une analyse de distance au point de donnée au sol le plus proche, dans une grille de 1m/pixel (Figure 28).

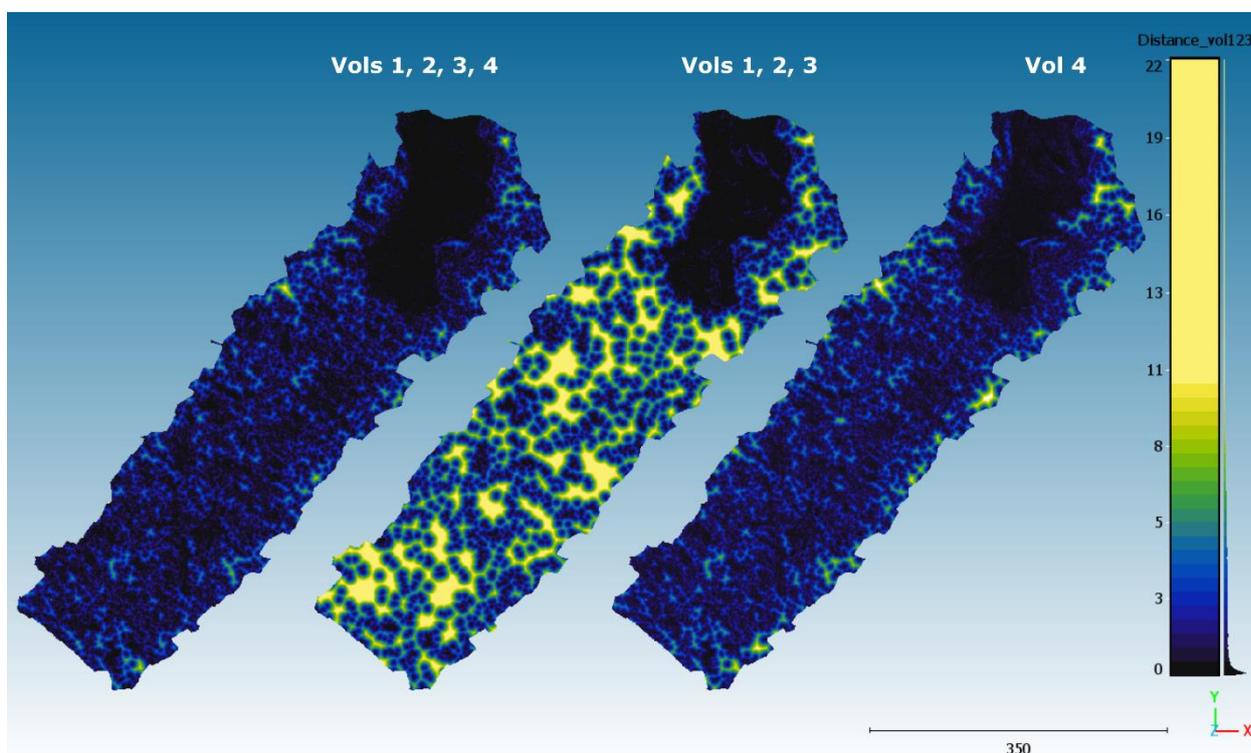


Figure 28 : Carte des distances au point lidar sol le plus proche. Plus la teinte est jaune plus les distances sont grandes. L'emprise figurée correspond au domaine des points ayant atteint le sol lors du vol 4. Ceci pour uniformiser les résultats.

La Figure 28 montre que la densité de points au sol est bien entendu la plus élevée lorsque les quatre vols sont réunis. Les zones sans information ne sont jamais très éloignées d'un point sol (gamme bleue de 0 à 3m). En revanche, pour les vol 1, 2, et 3, les zones les plus vastes sans données sont éloignées de plus de 10 m d'un point sol (plages jaunes). Le vol 4 contient, lui, très peu de plages de grande dimension sans données.

Sous l'emprise géographique du vol 4, les quatre vols cumulent une densité médiane de 432pts/m<sup>2</sup> en sommet de canopée. Avec cette densité en sommet de canopée, 95 % des pixels de la grille se situent à moins de 3,90 m d'un point lidar au sol. Ceci indique qu'un maillage de MNT à 7,80 m (le double de la distance minimale car cette distance est un rayon) contiendrait des informations d'altitude lidar au sol dans 95 % des cas.

Lorsque la densité médiane de points tombe à 255 pts/m<sup>2</sup> en sommet de canopée (cas du vol 4), 95% des pixels de la grille se situent à moins de 4,80 m. Une maille de MNT à 9,60 m serait donc optimal.

Enfin, lorsque la densité médiane de point chute à 118 pts/m<sup>2</sup> en sommet de canopée (cas des vol 1, 2 et 3 cumulés), 95 % des pixels de la grille se situent à moins de 10,90 m d'un point lidar. Dans ce cas, un MNT à 21,80 m de résolution serait optimal.

Cette analyse confirme, sous un autre angle, que la résolution optimale du MNT sur la crique Georgeon est d'environ 10 m si on veut maximiser l'information disponible et minimiser les interpolations.

## 2.7.5. Choix de la technologie : Aile fixe vs Multicoptère

Avec le recul de l'étude ayant été réalisée et en guise de synthèse, les différents paramètres qui apparaissent être primordiaux pour faire une acquisition topographique de ce type – couvrir une zone de 1 km<sup>2</sup> en contexte forestier équatorial – ont été listés (Tableau 6). Afin d'avoir une approche comparative, l'exercice a été réalisé en prenant comme exemple deux types de drone :

- Un **drone à aile fixe**, représenté par le Trinity dont l'appréciation des capacités a été définie suite au retour d'expérience de la présente étude ;
- Un **drone à voilure tournante**, représenté par le multicoptère DJI M300, dont les capacités techniques dans ce type d'environnement ont été évaluées suite à des discussions complémentaires avec des professionnels du secteur.

Au total, 9 critères ont été listés et documentés (Tableau 6). Pour chacun d'entre eux, un score a été établi pour les deux types de drone ayant été évalués. Il en ressort les éléments suivants :

- Un **drone à aile fixe** présente l'énorme avantage d'avoir une grande autonomie (40 minutes de vol réalisé) et de pouvoir couvrir des superficies importantes. Il peut décoller d'une DZ éloignée du secteur à cartographier et faire des vols de transit de plusieurs kilomètres pour un vol final atteignant 40 km linéaires. En termes de pénétration, l'association du capteur lidar et du Trinity, est en capacité d'obtenir des « points sol » avec une résolution convenable, à condition de voler suffisamment bas, en dessous de la portée efficace du lidar. Celle-ci a été évaluée à 180 m, mais pour une proportion de « points sol » satisfaisante, la présente étude montre qu'il est désirable de voler à une altitude inférieure à 100 m.

Le principal inconvénient de ce type d'équipement est le suivi de la topographie et l'aptitude du drone à devoir épouser des variations d'altitude sur de courtes distances, qui le limite pour voler au plus proche de la canopée.

- Contrairement à un drone à aile fixe, un **drone multicoptère** présente l'avantage de pouvoir suivre au mieux la topographie, en effectuant des variations dans l'espace plus facilement, ce qui doit lui permettre de voler au plus proche de la canopée. Il peut également décoller au plus proche de la zone d'étude, par exemple dans des trouées (à condition qu'elles soient suffisamment larges) et ainsi accéder à des zones particulièrement isolées. Sa consommation électrique pour porter constamment la charge utile et ses batteries, plutôt que de planer comme un drone à aile fixe, réduit drastiquement sa capacité à effectuer des vols de transit vers une zone d'intérêt distincte.

Son principal inconvénient reste l'autonomie, qui le limite à couvrir de petites surfaces. Par exemple pour une surface de 100 ha, équivalente à celle d'une ARM, l'acquisition aurait

nécessité de réaliser plusieurs vols pour couvrir la totalité de la zone d'étude et donc d'avoir un nombre de batteries conséquent à disposition. Ceci aurait limité les possibilités de couvrir plusieurs fois la zone d'étude à des altitudes différentes comme cela a été fait avec le Trinity (jusqu'à 4 vols par jour).

La capacité du multicoptère à obtenir des « points sols » n'a pas été évaluée. Pour une vision objective, une étude du même type aurait été nécessaire. Néanmoins, on peut envisager que son aptitude à traverser la végétation doit être du même ordre de grandeur que celle du Trinity, compte tenu de sa capacité à voler au plus proche de la canopée.

Critères de flexibilité	Trinity F90+	Multirotor type DJI M300+ YellowScan Surveyor
<b>Décoller</b>	(-1) Nécessité d'une zone de décollage suffisamment large (≈ 120 m de diamètre), dans les 5km autour de la zone d'intérêt. Conditions difficiles à réunir en contexte forestier isolé mais courante sur des secteurs de crête déjà partiellement exploités.	(+1) Possibilité de décoller dans des trouées de taille plus réduite (15-20 m de large), avec éventuellement ouverture/agrandissement de DZ en milieu isolé. Le drone doit permettre un décollage manuel même sans signal GNSS au sol.
<b>Rejoindre la zone d'acquisition</b>	(+2) Pas de difficulté. Validé sur Valentin avec 9 km de transit aller/retour. Ne peut décoller que si les conditions atmosphériques entre le point de décollage et la zone de mesure sont stables (pas de pluie/vent violent/orage).	(-2) Pas de transit possible car trop gourmand en énergie. Décollage au plus proche de la zone d'étude pour maximiser la consommation électrique dédiée à l'acquisition.
<b>Couvrir la superficie de 1 km<sup>2</sup> en un seul vol</b>	(+2) Equipement adapté pour couvrir de grandes surfaces. 1 vol de 40 minutes pour lever 1 km <sup>2</sup> .	(-2) Couverture de surfaces de taille réduite. Condition limite pour des surfaces de 1 km <sup>2</sup> . Vitesse de vol en mesure = 5 m/s, 1 vol de 14 minutes (cf. autonomie) = 4200 m/vol, soit 6-7 vols pour couvrir les 28 000 à 32 000 m de lignes de vol nécessaires pour 1 km <sup>2</sup> .
<b>Volier à hauteur constante du relief (suivi de topographie)</b>	(-1) Possible dans certaines limites, suppose de reconnaître la topographie au préalable par un ou plusieurs vols de reconnaissance. La longueur d'onde du relief doit être compatible avec les capacités de suivi de terrain du drone. Le suivi du relief en trajectoire descendante est problématique du fait de l'absence de volets de freinage sur le drone, vol très rapide en descente.	(+2) Solution drone présentant le maximum de flexibilité pour épouser au mieux la topographie, débordement de la trajectoire par inertie. Suppose de reconnaître la topographie au préalable. Pilotage manuel avec retour vidéo au sol très difficile à cause de la végétation faisant obstacle aux ondes radio – solution Mavic photogramétrique possible en vol de reconnaissance.
<b>Obtenir une densité de points suffisante en sommet de canopée</b>	(+1) Les performances sont liées à la puissance limitée du scanner et à la hauteur de vol, selon le relief.	(ND) Non déterminé. A tester en conditions réelles.
<b>Obtenir des points « sols »</b>	(+1) Fonction de la hauteur de vol au-dessus du sol et de la portée du lidar. Portée efficace du lidar Qubez40 jusqu'à 180 m	(ND) Non déterminé. A tester en conditions réelles.
<b>Fournir l'énergie de bord / Autonomie</b>	(+2) Autonomie longue durée. Une seule batterie est suffisante pour un vol de 30-40 km avec lidar. Nécessité de refroidir les batteries avant de les recharger. Le nombre de vols quotidien équivaut au nombre de batteries disponibles.	(-2) Paramètre réhibitoire, nécessite l'utilisation de nombreuses batteries (4 à 6 batteries par vol) pour couvrir des surfaces importantes. Consommation de 6 batteries par vol de 14 minutes, soit 36 à 42 batteries (6-7 vols) pour couvrir une zone de 1 km <sup>2</sup> .
<b>Refroidir les moteurs et l'électronique dans les phases de vol stationnaire</b>	(-1) Echauffement lié à la translation verticale pour les phases de décollage/atterrissage. Nécessité de refroidir l'équipement avant le décollage et après l'atterrissage (avec véhicule climatisé ou avec du gaz sous-pression).	(+2) Pas de nécessité de refroidir l'électronique. Matériel prévu pour faire des vols stationnaires.
<b>Garder la ligne de vol</b>	(-1) Le drone doit toujours être en mouvement pour rester en l'air. Il est très sensibles aux courants ascendants et descendants, la compensation des ascendances par l'auto-pilote peut induire un vol sous la côte d'altitude nominale	(+2) Très bonne stabilité gyroscopique. Equipement résistant bien au courants ascendants/descendants et aux rafales de vent (35km/h en rafale).
<b>Scores</b>	<b>+ 8 / - 4</b>	<b>+ 7 / - 6 / 2 ND</b>

*Tableau 6 : Tableau de comparaison des capacités techniques d'un drone à aile fixe (le Trinity F90+) et d'un multicoptère (exemple du DJI M300) pour couvrir une zone de 1 km<sup>2</sup> en contexte forestier équatorial. L'évaluation des différents paramètres est issue du retour d'expérience de l'étude ayant été réalisée et de discussions complémentaires sur le sujet. Pour une vision objective, cette analyse demanderait à être complétée par une étude équivalente avec un drone multicoptère. Les scores en gras indiquent s'il s'agit d'un point fort (+2), d'un avantage (+1), d'un inconvénient (-1) ou d'un aspect très défavorable (-2) de l'outil employé.*

## 2.8. CONCLUSION

Dans un contexte de forêt équatoriale en piedmont encaissé d'environ 200 m, le levé topographique par drone à aile fixe et décollage vertical équipé d'un lidar léger, testé dans le cadre de cette étude, a rempli ses objectifs. Le secteur de 100 ha, équivalent à une ARM, a pu être cartographié par photogrammétrie et par lidar de manière efficace, avec des vols individuels, permettant de couvrir la zone d'étude en un seul vol chacun.

### Approche méthodologique

L'ensemble des résultats (bruts et traités) a été discuté dans une démarche méthodologique d'analyse des données. Pour cela, différents paramètres ont été analysés en détail, permettant d'établir les conditions limites de ce type d'acquisition et des équipements testés. Ont été analysés en particulier i) la capacité du lidar à traverser la canopée ; ii) la densité de points à arriver au sol ; iii) la portée effective du lidar suivant l'altitude de vol ; iv) ainsi que le maillage d'interpolation à utiliser compte tenu de la résolution des données. Il apparaît que :

- Pour une densité médiane de points de 160 pts/m<sup>2</sup> au sommet de la canopée forestière, la densité médiane de points au sol est 2 pts/m<sup>2</sup> ;
- La pénétration des points au sol, étant donné le relief, la hauteur des arbres et la densité de couvert végétal est de l'ordre de 4 points pour 1000 ;
- Un vol deux fois plus bas fait gagner trois fois plus de points au sol ;
- La densité de points au sol résultant de ce type d'acquisition dans ces conditions, est davantage susceptible de produire des MNT à 10 m de résolution plutôt qu'à 1 m de résolution. Ceci provient du regroupement spatial des points sol dans les clairières qui sont distantes les unes des autres.

### Application à la prospection alluvionnaire

Au-delà de la démarche méthodologique, les données ont été recontextualisées dans une logique d'application à la prospection alluvionnaire. Une interprétation géomorphologique de la zone d'étude a été effectuée, ayant permis de cartographier précisément la géométrie de la zone de flat et caractériser les morphologies alluviales d'intérêt. De manière générale, les données produites sont suffisamment fines pour venir en appui à des travaux de prospection, démontrant l'applicabilité de la méthode proposée. Bien qu'en partie déjà utilisée par la profession, cet exemple illustre une nouvelle fois la plus-value que peut apporter une cartographie lidar pour des applications minières (qu'elle soit acquise par drone ou aéronef habité), ceci sur l'ensemble du cycle minier, depuis les premières phases d'exploration jusqu'à la réhabilitation.

### Drone à aile fixe, multicoptère ou aéronef habité

Une comparaison détaillée de l'utilisation d'un drone à aile fixe et d'un multicoptère dans ce contexte, a été réalisée. Il en ressort que les principales différences entre les deux types d'équipement se jouent sur l'autonomie vs leur capacité à suivre le relief au plus près :

- Le **drone à aile fixe** va pouvoir couvrir de grandes surfaces grâce à son autonomie de batterie. Les ailes apportent une portance naturelle au drone et à sa charge utile nécessitant très peu d'apport énergétique pour le maintenir en l'air. La vitesse d'acquisition est également un avantage, mais ses capacités à voler au plus près de la topographie sont limitées ;

- À l'inverse, un **drone multicoptère**, va présenter plus de flexibilité pour pouvoir suivre le relief. Par contre, il requiert constamment de l'énergie pour le maintenir en l'air. A l'heure actuelle couvrir une superficie de 100 ha de manière exhaustive reste rédhibitoire, sans de multiples trouées en son sein pour décoller. Dans le cas de prospection alluvionnaire sur une ARM avec ce type d'équipement, il est recommandé de se focaliser sur la partie centrale de la vallée alluviale et de limiter la couverture des versants, pour réduire la surface à investiguer.

À l'heure actuelle, **les levés aéroportés conventionnels (avion, hélicoptère)** semblent toujours être les outils les plus adaptés pour effectuer de la cartographie topographique en contexte forestier, principalement de par leur fiabilité, leur capacité de déploiement et des coûts maîtrisés, pouvant être mutualisés sur plusieurs zones. Dans le détail, avec le retour d'expérience de la présente étude, les survols lidar par hélicoptère ou autogyre, dont le pilote serait capable d'adapter constamment la hauteur de vol au-dessus du relief boisé, semblent être la configuration la plus adaptée, permettant d'avoir le maximum de résolution, modulo évidemment la portée du lidar embarquée.

### **Perspectives de développement**

Néanmoins, les perspectives de développement pour les drones à aile fixe sont encourageantes. Pour bénéficier de l'efficacité énergétique d'un drone tel que le Trinity F90+ et de sa spectaculaire vitesse de couverture, il faudrait augmenter la portée efficace du lidar. Avec une portée nominale allongée à 200 m, plutôt que les 140 m actuels, la solution d'un drone à aile fixe et à décollage vertical, pourrait devenir un outil particulièrement efficace pour effectuer des levés topographiques en contexte forestier de quelques hectares à quelques centaines d'hectares. Dans le cadre de la prospection alluvionnaire et plus généralement de l'exploration minière, ce type d'outil pourrait permettre par exemple d'effectuer des acquisitions cartographiques jusqu'à plusieurs kilomètres autour d'un camp de base et ainsi adapter les travaux d'exploration en conséquence.

## 3. Synthèse des méthodes géophysiques

Ce chapitre a pour objectif de faire la synthèse des méthodes géophysiques pouvant être adaptées à la prospection alluvionnaire, afin de mettre en perspective les méthodes qui pourraient être développées sur des solutions drone.

Dans un premier temps, seront présentées les **différentes méthodes de géophysique au sol**, dont les profondeurs d'investigation sont de l'ordre de quelques mètres et qui pourraient permettre de caractériser la structure en profondeur de dépôts alluvionnaires (épaisseur des alluvions, éventuellement stratification des différents types de dépôts). Pour chacune des méthodes, sera détaillé le principe de la méthode, ses avantages et ses limites au regard de la problématique de l'exploration alluvionnaire ainsi que quelques exemples de mise en œuvre.

Dans un second temps, sera présenté un aperçu des travaux de recherche en cours concernant **l'adaptation de capteurs géophysiques sur drone**. Le degré de maturité pour les différentes techniques sera analysé, puis trois d'entre-elles seront développées plus en détail.

De manière générale, ce chapitre n'a pas vocation à être exhaustif sur le sujet, dont les acteurs sont nombreux et les innovations techniques régulières, portés par des sociétés de service et des projets de R&D particulièrement dynamiques sur le sujet. Il s'agit là simplement de mettre en perspective l'utilisation de ce type d'outils dans le contexte de la prospection alluvionnaire et plus généralement dans le cadre de l'exploration minière, et de donner un bref aperçu des méthodes pouvant éventuellement être adaptées au contexte guyanais, à la lumière des éléments disponibles en 2022.

### 3.1. GÉOPHYSIQUE AU SOL

Selon le contexte et les résultats attendus, différentes méthodes géophysiques au sol peuvent être envisagées pour la caractérisation de dépôts alluvionnaires : tomographie de résistivité électrique, méthodes sismiques (réfraction, onde de surface), géo-radar.

Quelque-soit la méthode employée, la condition commune pour qu'elle s'avère efficace est que l'objet à imager présente un contraste suffisant du paramètre physique mesuré (résistivité, vitesse de propagation des ondes acoustiques, permittivité diélectrique...) par rapport au milieu encaissant.

#### 3.1.1. Méthodes sismiques

##### a) Principe de la méthode

Le principe des méthodes sismiques consiste à générer un ébranlement à la surface du sol et à analyser la propagation des différents types d'ondes émises, dont la vitesse est caractéristique des différentes formations géologiques traversées (Tableau 7).

Dans le détail, on distingue plusieurs méthodes sismiques dont la nature va différer en fonction du type d'ondes auquel on va s'intéresser.

➤ *Sismique réfraction*

La méthode dite de « sismique réfraction » permet de caractériser les variations de la vitesse de propagation des ondes de compression (P), lorsqu'elles sont réfractées au toit d'une couche plus compétente (le substratum par exemple).

➤ *La sismique MASW (ondes de surface)*

La méthode MASW (*Multiple Analysis of Surface Waves*) repose sur le fait que les ondes de surface sont dispersives : la vitesse de propagation dans un milieu donné varie avec la fréquence, et chaque composante fréquentielle se propage dans une épaisseur de terrain différente. L'analyse des diagrammes de dispersion des ondes de surface permet de caractériser les variations de la vitesse des ondes de cisaillement avec la profondeur.

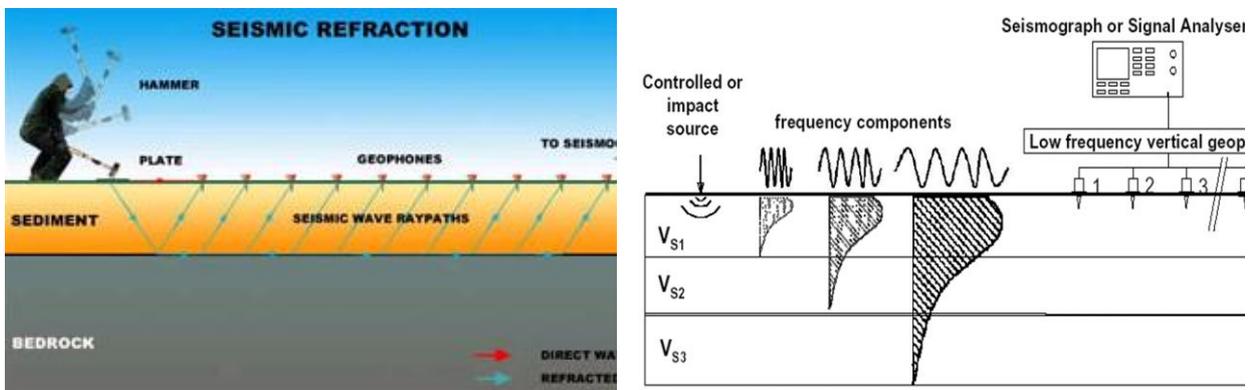


Figure 29 : Schéma de principe d'une acquisition de sismique réfraction (à gauche) et par ondes de surface (à droite). Le dispositif d'acquisition est similaire, seul le traitement de l'information diffère.

Nature des terrain	Vitesse des ondes de compression $V_p$ (m/s)	Vitesse des ondes de cisaillement $V_s$ (m/s)
Terre végétale	300 - 700	100 - 300
Sable sec	400 - 1200	100 - 500
Sable humide	1500 - 4000	400 - 1200
Argile	1100 - 2500	200 - 800
Grès	3000 - 4500	1200 - 2800
Calcaire	3500 - 6000	2000 - 3300
Craie	2300 - 2600	1100 - 1300
Granite	4500 - 6000	2500 - 3300
Basalte	5000 - 6000	2800 - 3400

Tableau 7 : Ordres de grandeur des vitesses de propagation des ondes  $V_p$  et  $V_s$  dans les formations géologiques les plus courantes.

### *b) Apports et limites de la méthode*

La caractérisation des vitesses sismiques est grandement liée aux paramètres géo-mécaniques du sous-sol. Dans le contexte de dépôts alluvionnaires, l'existence d'un contraste de propriétés mécaniques entre les alluvions et la formation sous-jacente est plutôt probable (Tableau 7).

Il s'agit en outre d'une méthode relativement légère, qui peut être mise en œuvre par 3-4 opérateurs, même si le site d'étude ne permet pas un accès directement en véhicule.

Il y a cependant certaines limites à la mise en œuvre de ces méthodes :

- La méthode réfraction n'est valable que lorsque les vitesses sont croissantes avec la profondeur. Dans le cas d'une inversion de vitesse (e.g. : couche « lente » encadrée par deux couches plus rapides), cette couche lente ne sera pas détectée par les investigations ;
- Les méthodes sismiques sont sensibles aux vibrations environnantes (machines, circulation routière, etc) qui peuvent polluer l'enregistrement du signal. Celui-ci en sera moins (voire pas du tout) exploitable ;
- La profondeur d'investigation maximale atteignable est de l'ordre de 1/4 à 1/5 de la longueur totale du dispositif. Cela nécessite donc suffisamment d'espace autour de la zone ciblée pour mettre en place le dispositif de mesure de manière rectiligne, et réaliser les tirs « en offset », aux extrémités de la ligne de mesure. La profondeur d'investigation effective dépendra également de la puissance de la source, et du niveau de bruit environnant ;
- Un horizon sismique ne correspond pas nécessairement à un horizon géologique. Dans ce cas, un étalonnage par sondage géotechnique peut être nécessaire ;
- Différentes formations géologiques peuvent présenter des vitesses de propagation similaires (Tableau 7), et ne pourront pas toujours être discriminées dans un tel cas.

C'est pourquoi une étude préalable du contexte, complétée d'éventuelles mesures tests, doivent précéder les acquisitions.

### *c) Mise en œuvre et volume de production envisageable*

L'acquisition des données pour les méthodes de « sismique réfraction » et « ondes de surface » s'appuie sur le même dispositif et peut être réalisée simultanément. Seul le procédé de traitement des données diffère ensuite, selon la méthode sélectionnée.

Le dispositif de mesure se compose :

- D'un ou plusieurs enregistreur(s) sismique(s) (selon les dimensions de la zone à couvrir) ;
- De capteurs (géophones) plantés dans le sol, capable de retranscrire les vibrations de la surface du sol en signal électrique ;
- De câble multivoies permettant de relier tous les capteurs à l'enregistreur ;
- D'une source sismique, qui va générer l'ébranlement et ainsi émettre le signal qui va se propager dans le sous-sol puis être enregistré par les capteurs en surface. Il en existe plusieurs sortes (masse, chute de poids, vibreur, explosif...). Pour des faibles profondeurs comme dans le cas de la caractérisation de dépôts alluvionnaires, l'utilisation d'une masse est

en général suffisante. Il s'agit d'une masse de 5 à 10 kg avec laquelle un opérateur frappe sur une plaque posée au sol.

Selon les dimensions du dispositif (distances entre géophones, longueur totale du profil) et les conditions d'accès au site, on peut généralement envisager la réalisation d'1 à 3 profil(s) par jour.

d) Exemple de mise en œuvre

Les illustrations suivantes montrent le type de résultats que peut apporter une acquisition sismique. Sur la Figure 30, le traitement en « ondes de surface » (MASW) a permis de décrire la structure de dépôts sédimentaires sur une profondeur de 30 m environ.

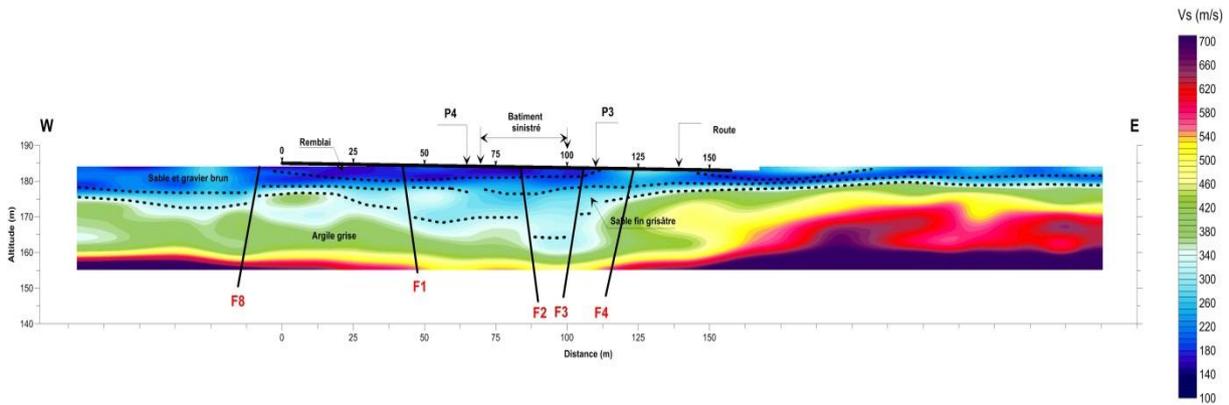


Figure 30 : Exemple de coupe de vitesse sismique (ondes S) obtenue par traitement MASW en contexte alluvial.

La Figure 31, quant à elle, compare les résultats obtenus par le traitement MASW à ceux obtenus en réfraction et aux mesures réalisées avec un pénétromètre, au droit d'un effondrement associé à une cavité.

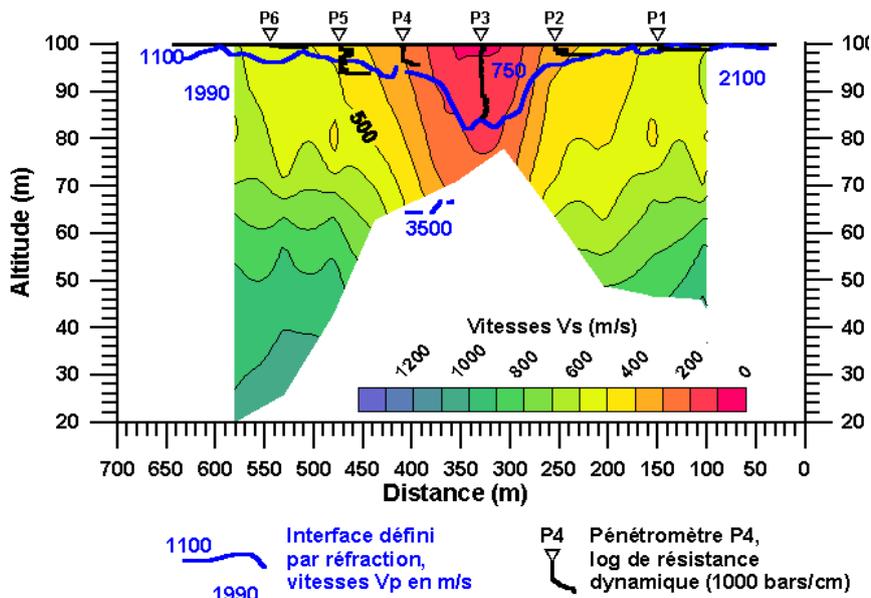


Figure 31 : Exemple de coupe de vitesse sismique (ondes S) obtenue par traitement MASW, où est superposée l'interface définie par réfraction.

### 3.1.2. Radar géologique

#### a) Principe de la méthode

La méthode radar repose sur l'utilisation d'un champ électromagnétique dont la fréquence est suffisamment élevée (typiquement entre 20 MHz et 2 GHz) pour que celui-ci ait un comportement propagatif plutôt que diffusif. La vitesse de propagation de l'onde émise à partir de la surface (antenne émettrice) est fonction notamment de la permittivité diélectrique. Lorsqu'elle est réfléchi sur un interface en profondeur, elle remonte et est enregistrée par l'antenne réceptrice.

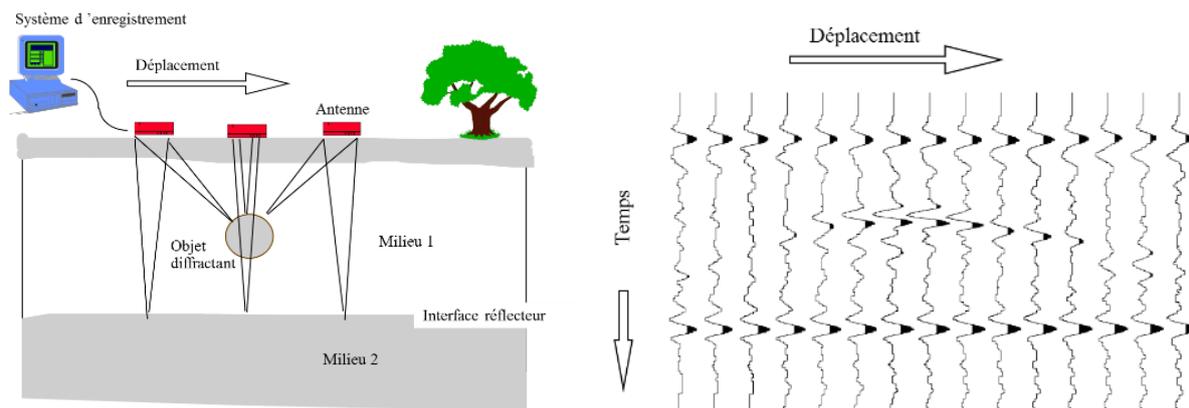


Figure 32 : Description schématique du principe de mesure (à gauche) et de l'enregistrement correspondant (à droite).

#### b) Apports et limites de la méthode

L'intérêt majeur du géoradar est sa bonne résolution spatiale. A ce titre, il est régulièrement utilisé pour l'inspection des chaussées (description des différentes couches) et la détection de réseaux par exemple. Dans leurs travaux, Goutaland *et al.* (2008) ont montré que sa mise en œuvre pouvait également permettre de décrire les différentes unités de dépôts glacio-fluvatiles, tandis que l'entreprise canadienne *Sensors & Software* présente des résultats intéressants quant à la caractérisation d'une paléo-vallée au Guyana (*Sensors & Software*, s.d.).

La principale limite de la méthode est, comme l'illustre la Figure 33, la conductivité du milieu qui engendre une forte atténuation du signal et en conséquence réduit rapidement la profondeur d'investigation. Il sera de fait difficile, voire impossible, de réaliser une caractérisation par géoradar sur un sol argileux, ou saturé d'une eau trop conductrice, ce qui peut être le cas, par exemple en contexte alluvionnaire équatorial.

#### c) Mise en œuvre et volume de production envisageable

Les investigations radar sont réalisées en traînant au sol une antenne, généralement le long d'un ou plusieurs profil(s) rectiligne(s). L'acquisition est donc relativement rapide et ne nécessite qu'1 à 2 opérateur(s). Selon l'accessibilité et le type de terrain de surface, il est généralement possible de couvrir plusieurs centaines de mètres par jour.

d) Exemple de mise en œuvre

Lors d'une étude hydrostratigraphique visant à prédire le transport de polluant au sein de dépôts glacio-fluviatiles, Goutaland *et al.* (2008) ont utilisé un radar géologique pour caractériser les différents faciès de dépôt et décrire la structure en profondeur des alluvions (Figure 33).

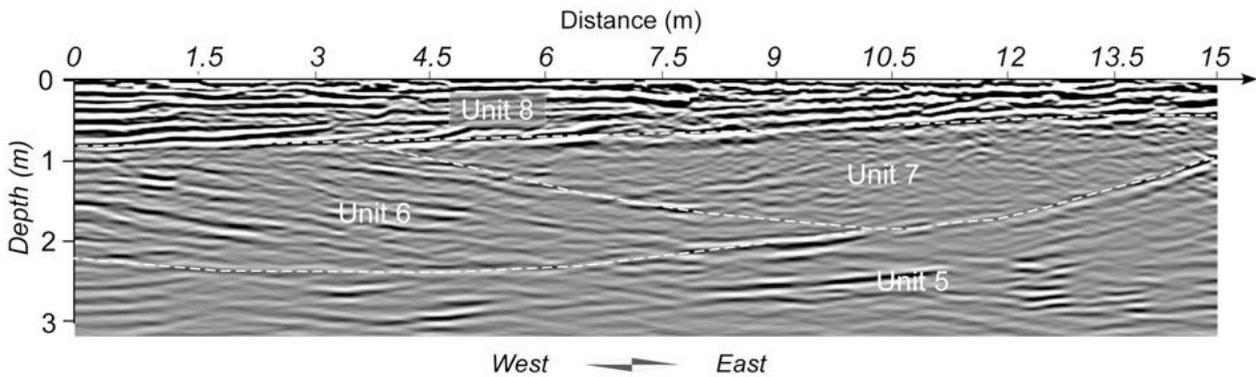


Figure 33 : Profil radar extrait de Goutaland *et al.* (2008), décrivant les principales unités de dépôt en contexte glacio-fluviatile.

### 3.1.3. Tomographie de résistivité électrique

a) Principe de la méthode

La tomographie de résistivité électrique consiste à faire circuler un courant dans le sous-sol entre 2 électrodes métalliques, et à mesurer la réponse en différents points le long d'une ligne (profil) pour déterminer la distribution des résistivités en profondeur, à l'aplomb de ce profil.

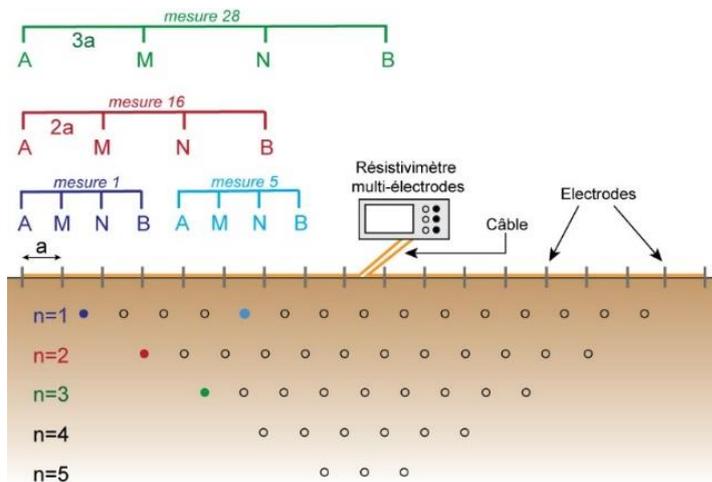


Figure 34 : Principe de la tomographie de résistivité électrique.

La résistivité électrique d'un milieu est sa capacité à s'opposer au courant électrique. Elle est sensible, entre autre, aux types de matériaux qui composent le milieu, à leur texture (e.g. porosité), à leur teneur en eau, à leur conductivité électrique, à leur teneur en argile. Cette méthode est ainsi à même de mettre en évidence les contacts entre les différentes formations géologiques lorsque celles-ci présentent un contraste de résistivité suffisant.

### b) Apports et limites de la méthode

La tomographie de résistivité électrique est une méthode à géométrie variable, que l'on peut adapter au contexte et aux objectifs en terme de profondeur d'investigation et de résolution. La résistivité offre une large gamme de variation et permet souvent de discriminer les différentes formations entre elles. Ce paramètre est également sensible à certaines caractéristiques de l'état du sous-sol, notamment son niveau d'altération ou sa saturation.

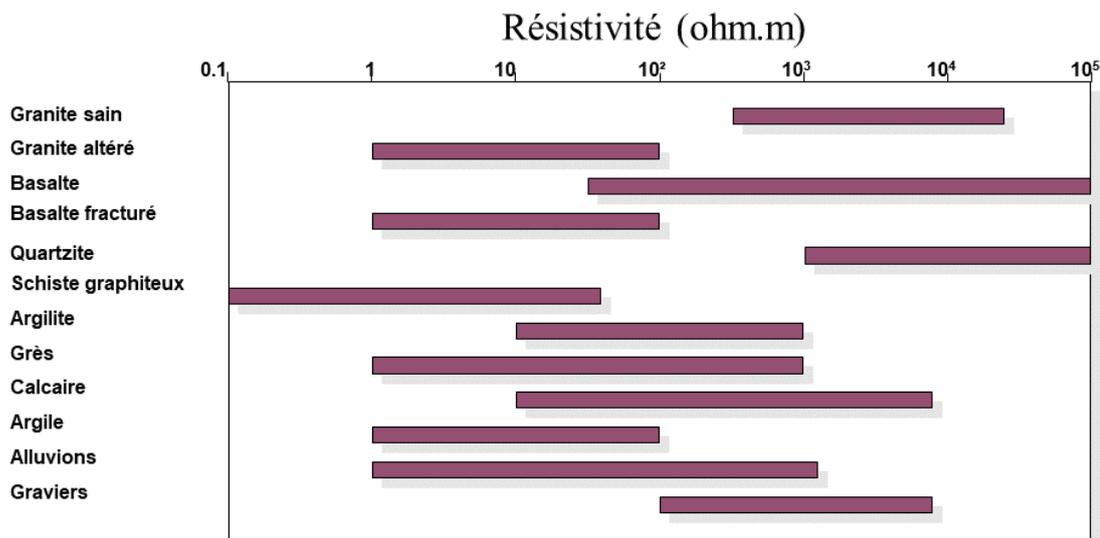


Figure 35 : Ordres de grandeur des résistivités de certaines formations géologiques courantes.

Au même titre que d'autres paramètres physiques du sous-sol (les vitesses sismiques par exemple), et comme l'illustre la Figure 35, on peut aussi être confronté à des situations où :

- deux formations distinctes présentent des gammes de résistivité similaires ;
- une même formation, selon son état (altération, saturation) présente des résistivités différentes.

C'est pourquoi une étude préalable du contexte, complétée d'éventuelles mesures tests, doivent précéder les acquisitions.

Les mesures de résistivités peuvent également être perturbées par des sources anthropiques (lignes électriques, objets métalliques enfouis, etc), engendrant du bruit dans le signal. La mise en œuvre de cette méthode nécessite, en outre, que le terrain soit dégagé et accessible tout le long du/des profil(s) de mesure.

### c) Mise en œuvre et volume de production envisageable

L'utilisation d'un système multi-électrode est tout à fait envisageable dans ce type de contexte. Il s'agit d'un dispositif impliquant :

- un résistivimètre multi-canaux ;
- des câbles multi-électrodes spécifiques ;
- des électrodes métalliques (typiquement 96 électrodes) réparties régulièrement le long du câble et reliées à celui-ci, assurant le contact électrique avec le sous-sol.

Une fois l'ensemble du dispositif installé, le résistivimètre procède automatiquement à une séquence de mesure complète (durant 1 à 2h). L'utilisation d'un tel système permet d'obtenir une acquisition à une résolution conséquente en un temps relativement restreint.

Selon les dimensions du dispositif de mesure (distances entre électrodes, longueur totale du profil) et les conditions d'accès au site, on peut généralement envisager la réalisation d'1 à 3 profil(s) par jour.

#### d) Exemple de mise en œuvre

La Figure 36 présente les résultats interprétés d'une tomographie de résistivité électrique réalisée sur la commune de Maripasoula, en Guyane. Ceux-ci permettent de décrire le profil d'altération du socle, et de caractériser l'épaisseur et la géométrie des alluvions argileux déposés au fond d'une vallée, dans la partie est du profil.

À noter cependant, dans ce cas précis, le faible contraste de résistivité entre les alluvions argileux et l'horizon fissuré, qui illustre l'intérêt d'un étalonnage sur des sondages, et/ou la mise en œuvre de plusieurs méthodes géophysiques complémentaires.

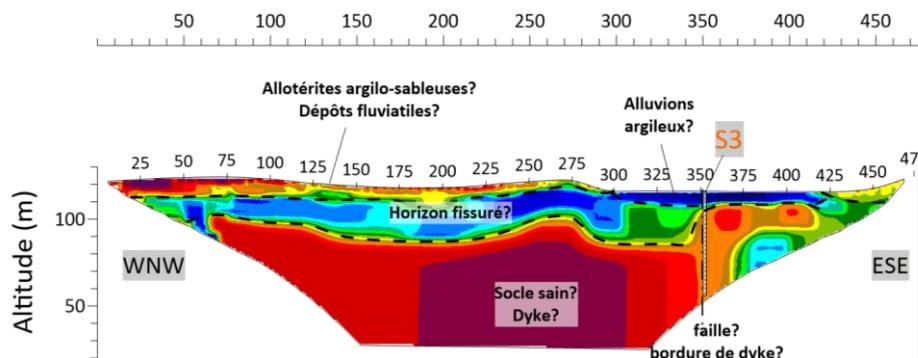


Figure 36 : Exemple de résultat d'une tomographie de résistivité électrique réalisée aux abords du bourg de Maripasoula, Guyane.

### 3.1.4. Conclusion

Les 3 méthodes géophysiques présentées ici peuvent s'avérer efficace pour la caractérisation de la géométrie de dépôts alluvionnaires. Dans la mesure où elles présentent chacune des limites de mise en œuvre propres, la sélection de la/des méthodes à utiliser devra s'appuyer sur une pré-analyse des conditions de site.

De plus, ces différentes méthodes apportant des informations complémentaires, une approche multi-méthodes peut éventuellement être envisagée lorsque cela est possible.

Enfin, pour optimiser l'interprétation géologique des paramètres géophysiques mesurés, l'utilisation d'étalonnages (affleurements, sondages, puits) devra être utilisée autant que possible.

## 3.2. GÉOPHYSIQUE PAR DRONE

### 3.2.1. Les drones

Depuis une dizaine d'année, les drones civils (ou *Unmanned Aerial Vehicules* (UAVs), en anglais) sont en fort développement. Ceci a permis l'émergence de drones grands publics, ayant de plus grandes facilités pour le pilotage, ainsi qu'un coût moins important à l'achat. De manière générale, les types de drone peuvent être divisés en trois familles (Figure 37) :

- 1) Les **drones à ailes tournantes** ou *rotary-wings* (en anglais) ;
- 2) Les **drones à ailes fixes** ou *fixed-wing* ;
- 3) Les **ADAV** (Avion à Décollage et Atterrissage Vertical) ou **VTOL** (*Vertical Take-Off and Landing*).

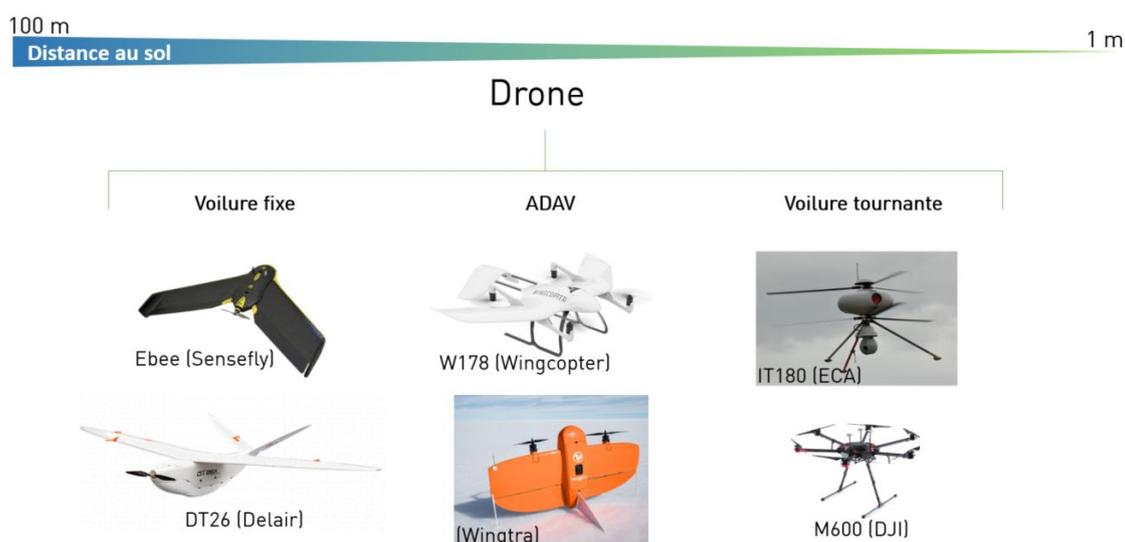


Figure 37 : Exemples de photographies des différents types de drone.

Le choix du type de drone va être dépendant des objectifs de l'acquisition. En effet, pour l'étude d'une zone étendue avec une faible topographie, l'utilisation de drone à aile fixe ou ADAV permettra de gagner en efficacité. Le grand avantage des drones ADAV est la capacité de décollage et d'atterrissage, par exemple dans des zones fortement boisées.

### 3.2.2. La géophysique en drone

Depuis quelques années, l'utilisation de drones en géophysique s'est fortement développée, en particulier pour la prospection minière (Malehmir *et al.*, 2017 ; Parvar *et al.*, 2017 ; Cunningham *et al.*, 2018). Ce nouveau vecteur peut permettre l'acquisition de données dans des zones difficiles d'accès (forte topographie, végétation, étendue d'eau ; Figure 38), et où les solutions aéroportées conventionnelles sont inadaptées et de trop faible résolution par rapport à l'objet que l'on souhaite cartographier ; c'est le cas par exemple avec la valorisation d'un flat alluvionnaire dans la présente étude.

De plus, l'utilisation de drones présente l'avantage de s'inscrire dans une démarche multi-échelle entre les vols aéroportés et les acquisitions au sol (Figure 38). Ils peuvent permettre de localiser des secteurs d'intérêt lors de phases d'exploration préliminaires, qui pourront par la suite être suivis d'études complémentaires au sol (Charles *et al.*, 2017).

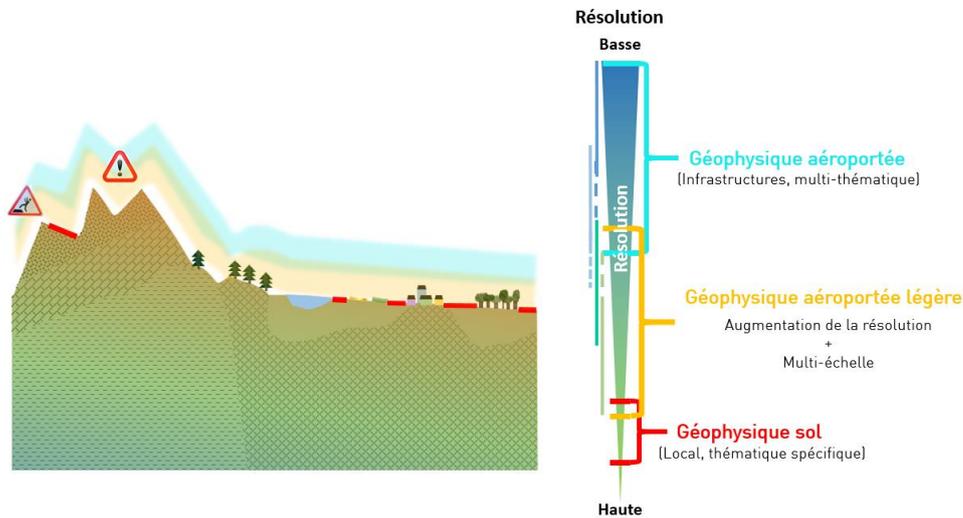


Figure 38 : Schéma présentant les différentes échelles d'acquisition géophysique possibles : aéroportée, aéroportée légère et sol.

La démocratisation des drones a permis l'émergence de nombreux projets de R&D concernant l'adaptation de nouveaux capteurs géophysiques aux contraintes d'emport sur drone, permettant des acquisitions de plus en plus variées. À l'heure actuelle, la maturité de ces développements n'est pas la même pour toutes les méthodes géophysiques. La figure ci-dessous présente le degré de maturité des différents types d'acquisitions (Figure 39) :

- La **méthode magnétique** est celle qui a le plus haut degré de maturité. Des sociétés de service (au Canada, en Allemagne, Suède, France...) proposent depuis quelques années des systèmes clé en main, à installer sur des drones pour l'acquisition de données ;
- Le **géoradar**, l'**électromagnétisme**, l'**hyperspectrale** et la **radiométrie** présentent des degrés de maturité intermédiaire ;
- La **sismique** et la **gravimétrie** sont encore aux premiers stades de développement. Ils présentent des degrés de maturité moindre.

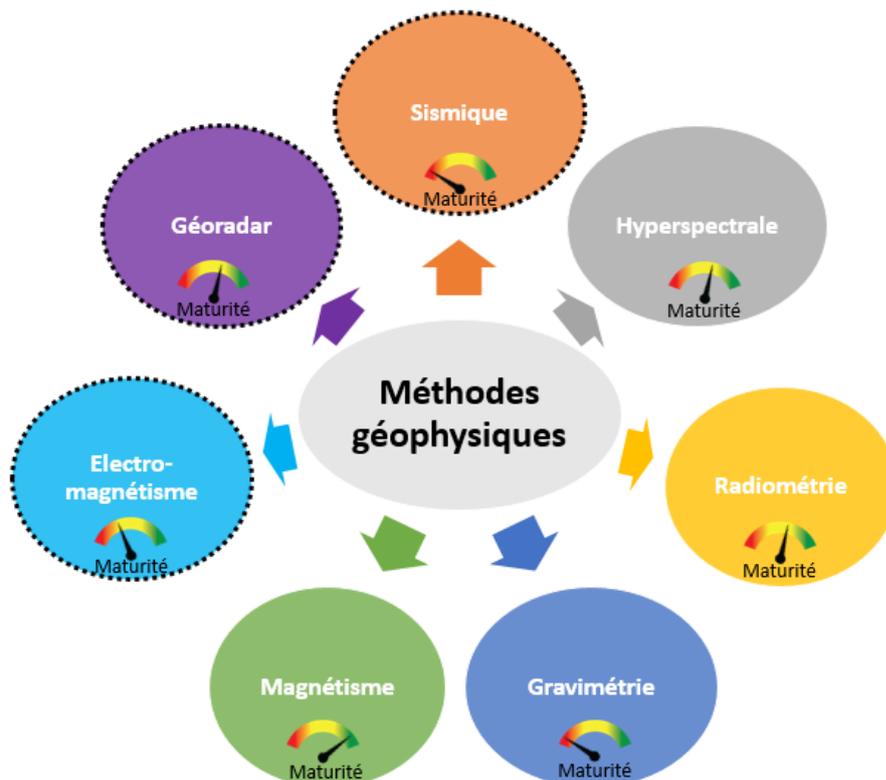


Figure 39 : Schéma présentant les différentes méthodes géophysiques et leurs degrés de maturité pour des acquisitions en drones. Les méthodes avec un contour en pointillés noirs sont les méthodes adaptées à la prospection alluvionnaire, qui seront détaillées par la suite.

Dans le cadre de la prospection alluvionnaire, seules trois méthodes semblent être pertinentes pour imager les contrastes physiques souhaités : la méthode sismique, la méthode électromagnétique et le géoradar. Afin de limiter les redondances, la description et le principe de ces méthodes pourra être retrouvée dans la section « Géophysique au sol » (§ 3.1.).

#### a) La sismique

La **méthode sismique** est une méthode permettant l'imagerie des variations des propriétés élastiques du sous-sol. La société Total Energie a un projet de R&D nommé METIS (*Multiphysics Exploration Technology Integrated System*), qui intègre le déploiement de géophones DARTs (*Downfall Air Receiver Technology*, développement commun avec l'entreprise Wireless Seismic) grâce à l'utilisation de drone. Afin d'être en capacité de réaliser des mesures sismiques sur des terrains hostiles et difficiles pour des équipes au sol (topographie, végétation, etc), des tests ont été réalisés en Papouasie Nouvelle Guinée et dans le désert des Emirats Arabes Unis.

#### b) L'électromagnétisme

La **méthode électromagnétique** est une méthode de prospection géophysique permettant d'imager la résistivité du milieu. Contrairement aux méthodes sismiques, des solutions aéroportées existent depuis plusieurs années sur des vecteurs aériens « lourds » (Geotech VTEM, SkyTEM, CGG HeliTEM, Nuvia NuTEM, New Resolution Geophysics Xcite ; Jürgens *et al.*, 2020). La figure ci-dessous (Figure 40) présente le système développé sur hélicoptère par la

société SkyTEM, ainsi qu'un exemple de coupe de résistivité interprétée. Dans cette configuration, lors des acquisitions, la boucle de mesure est à environ 40-50 m de hauteur par rapport au sol.

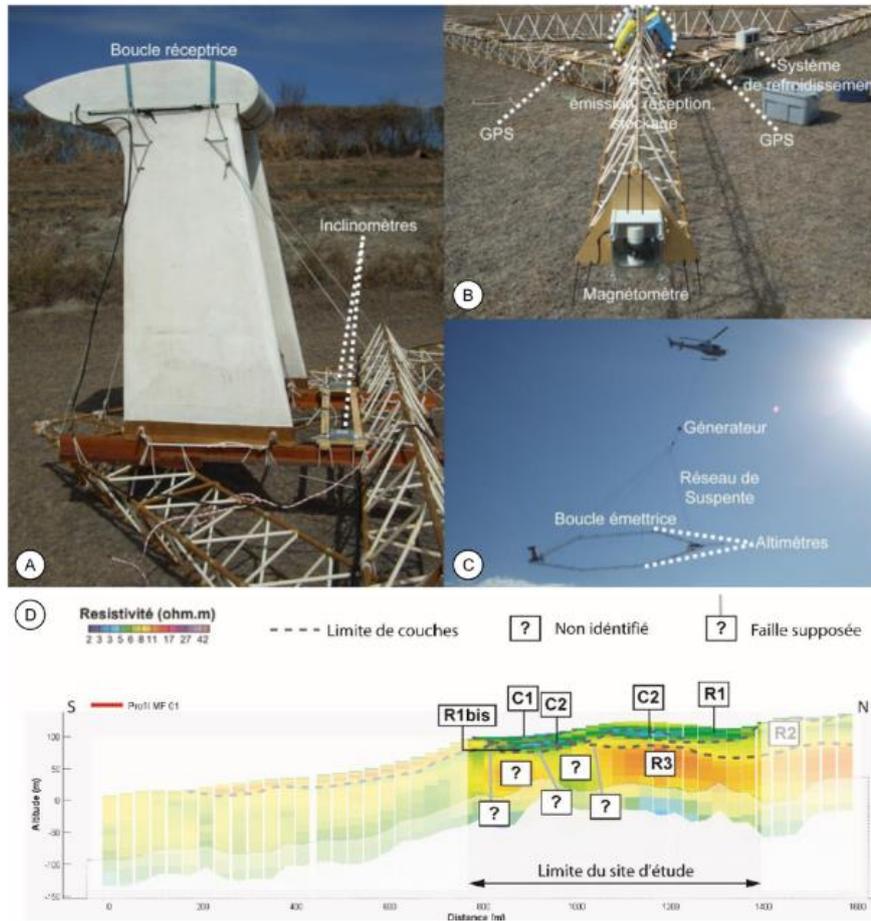


Figure 40 : Dispositif TDEM hélicopté (SkyTEM®) utilisé par le BRGM pour les DROM (Reninger, 2012). A. Vue arrière du dispositif. B. Vue avant du dispositif et de la boucle émettrice. C. Dispositif en plein vol. D. Exemple de coupe de résistivité et interprétations (adapté de Thiery et al., 2018).

À l'heure actuelle, bien qu'elles soient en développement, plusieurs approches pour l'acquisition de données électromagnétique par drone existent :

- La première consiste à remplacer le vecteur lourd (avion ou hélicoptère) par un drone. Pour cela, il est nécessaire de miniaturiser le système d'acquisition. Par exemple, dans le cadre du projet MERLE<sup>4</sup> (PIA PSCC Région) dans lequel le BRGM est partenaire, l'objectif est de développer un système pour vecteur léger et d'améliorer la résolution verticale en surface de 1 à 3 m pour une profondeur d'investigation de 50 m, contre une résolution de 3 à 5 m et une profondeur d'investigation de 300 m pour le système SkyTEM hélicopté.
- Une seconde approche pourrait être le développement de solutions hybrides sol/drone ; comme par exemple dans l'étude de Parshin et al. (2021), où la source a été placée au sol et le récepteur sur un drone.

<sup>4</sup> Projet MERLE : système électroMagnétique aéroporté LEger

c) Le géoradar ou GPR (*Ground Penetrating Radar*)

La **méthode géoradar** est une méthode de prospection géophysique électromagnétique permettant d'imager les contrastes de permittivité diélectrique du sous-sol. Depuis plusieurs dizaines d'années, des antennes basses fréquences ont été placées sur des hélicoptères afin de mesurer l'épaisseur de neige ou de glace et sa température (e.g., Blindow, 2009 ; Gundelach *et al.*, 2010 ; Rutishauser *et al.*, 2016). Dans cette configuration, ce type de milieu n'est pas fortement affecté par la nature aéroportée de l'acquisition, dont la perte d'énergie reste limitée. Cependant, pour les autres applications, le principal point négatif du GPR en drone, est la perte d'énergie du signal au niveau de l'interface air/sol (40 à 60 % de perte d'énergie ; Figure 41). Par exemple, pour une interface air/eau, plus de 80 % de l'énergie est perdu, seul 20 % de l'énergie est susceptible de pénétrer dans le milieu, rendant ce type d'acquisition particulièrement dépendante du milieu à imager.

Ground	Energy loss [%]
Snow	7
Ice	28
Sand	42
Average soils	50
Wet soils	63
Water	80

Figure 41 : Énergie perdue pour différent type d'interface air/sol (AMIRA project, 2020).

Actuellement, deux fabricants proposent des solutions à intégrer sur drone : *Radarteam AB* et *Mala Geoscience*. Le consortium AMIRA travaille également sur la miniaturisation d'une antenne très basse fréquence (300 kHz – 30 MHz) pour permettre l'investigation en profondeur, en particulier pour des applications minières (AMIRA project ; 2020).

Les cinq dernières années, des publications ont été réalisées afin de quantifier les mesures GPR en drone pour la caractérisation proche surface (premier mètre), pour par exemple la détection de réseaux ou d'infrastructures minières. Dans leurs travaux, Cabrera & Bekic (2018) ont par exemple quantifié l'utilisation d'antennes hautes fréquences sur drone pour différentes hauteurs de vol (Figure 42). Plus récemment, Noviello *et al.* (2022) ont fait un état de l'art spécifiquement sur l'acquisition géoradar par drone, dont il est conseillé de se reporter pour plus d'informations sur le sujet.

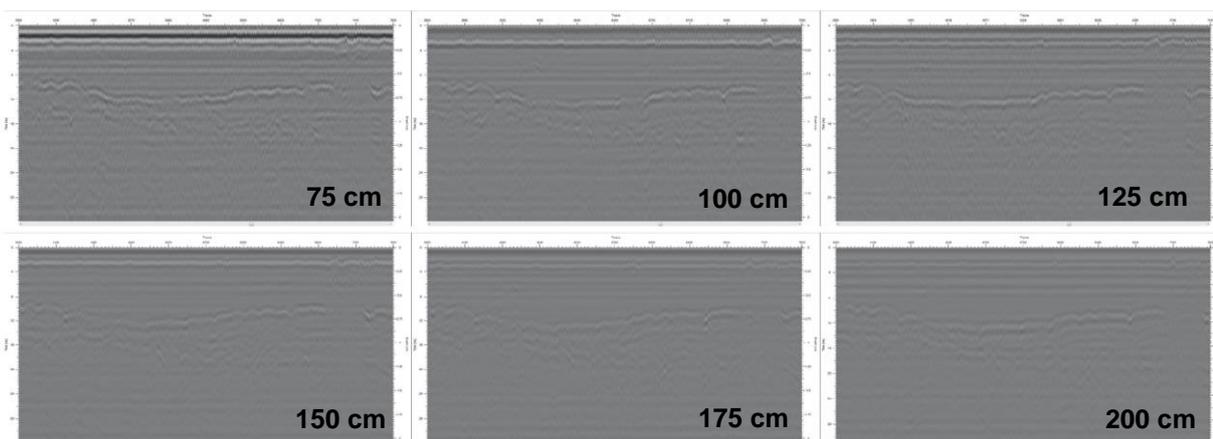


Figure 42 : Radargrammes obtenus pour différentes hauteurs d'antenne, les hauteurs vont de 75 cm à 200 cm avec un pas de 25 cm (Cabrera & Bekic; 2018).

### 3.2.3. Les verrous techniques

Bien que la technologie drone soit un domaine où les innovations sont régulières et les projets de R&D nombreux, il reste néanmoins de nombreux verrous pour une utilisation plus massive des drones en géophysique. Les principaux sont :

- **L'autonomie.** Les drones les plus utilisés en géophysique sont des multicoptères fonctionnant avec des batteries de type lithium-ion. Les temps de vols sont de l'ordre d'une vingtaine de minutes par exemple pour le M600 de chez DJI. Ces difficultés d'autonomie pour les multicoptères sont un frein à la productivité et un facteur limitant pour la couverture de grandes zones d'étude, nécessitant de multiplier les décollages/atterrissages et des stocks de batteries conséquents. Il existe des solutions à moteur thermique permettant d'augmenter l'autonomie à 1h30 comme l'IT180 de chez ECA. Les drones à aile fixe tel que le Trinity, testé dans le cadre de cette étude, pourraient également être une solution. De nouvelles études sont en cours pour le développement d'autres types d'alimentation : pile à hydrogène, propulsion hybride, etc. À noter également la possibilité d'effectuer des campagnes d'acquisition avec des essaims de drones ;
- **La fiabilité.** Au-delà des aspects sécuritaires, il s'agit d'un paramètre important, principalement pour des raisons financières. Pour certaines méthodes, les capteurs peuvent être fragiles et coûteux ; par exemple une caméra hyperspectrale peut demander un investissement d'environ 150 000 €, d'où la nécessité d'une fiabilité importante pour déployer ce type de capteur ;
- **Vols automatiques.** On entend par là, la capacité du drone à détecter des obstacles et à recalculer de façon autonome une nouvelle trajectoire plus sûre. De nombreux concepteurs de drone travaillent sur le *Deep-Learning* afin de développer des IAs dédiées aux vols automatiques par drone ;
- **La réglementation.** La législation sur le domaine est différente suivant les pays. Une législation européenne est en cours d'application afin d'unifier les règles dans les pays membres. Cependant, ces règles ne sont souvent pas adaptées pour des campagnes d'acquisition géophysique à large échelle. Par exemple, en France, la distance maximale

autorisé entre le drone et le télépilote est de 1 km en scénario S2<sup>5</sup>. Il existe également un scénario S4 pouvant être adapté à ce type d'acquisition, mais celui-ci est plus lourd à mettre en œuvre.

### 3.2.4. Conclusion

Pour l'acquisition de données géophysiques, les drones pourraient être des outils très utiles pour venir compléter le vide existant entre les données acquises au sol (haute-résolution, surface réduite) et les données acquises en géophysiques aéroporté (moyenne à basse résolution, grande surface). En effet, les drones pourraient permettre de faciliter la cartographie dans des environnements isolés, de diminuer dans certains cas le coût financier des mesures et venir compléter des jeux de données multi-échelle.

Depuis une dizaine d'année, la géophysique sur drone se développe. Par exemple, la figure ci-dessous présente l'évolution du nombre de publications et de brevets concernant les acquisitions électromagnétiques. Néanmoins, il existe encore de nombreux verrous pour une réelle démocratisation de l'imagerie géophysique par drone. Les principaux sont : la miniaturisation des capteurs, l'autonomie des porteurs, et l'évolution de la réglementation devant accompagner le développement de ce type de technologie. Pour des informations complémentaires sur le sujet, concernant par exemple l'évolution de la filière en France, les différents acteurs et les perspectives de développement, il est possible de se reporter à l'étude PIPAME (2017).

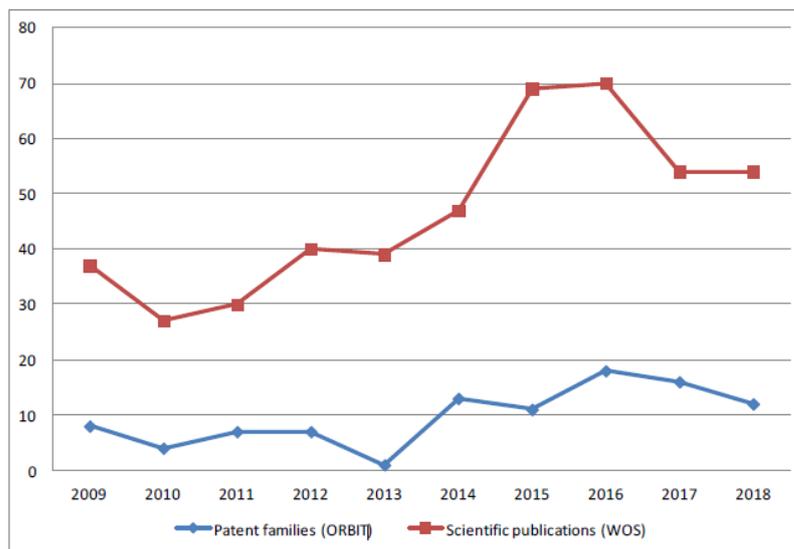


Figure 43 : Évolution du nombre de publications scientifiques et de brevets pour l'électromagnétisme aéroporté (Jürgens et al., 2020).

De manière générale, c'est un domaine qui devrait faire l'objet d'innovations dans les années à venir et dont le potentiel de croissance est important. Concernant l'adaptation de ces outils à la prospection alluvionnaire, il est difficile de se prononcer en l'état, sans avoir réalisé d'expérimentation sur le sujet et sans avoir testé les solutions disponibles sur le marché. Le « géoradar » sur drone semble être la méthode la plus adaptée aux dimensions des objets à

<sup>5</sup> Réglementation encadrant les vols de drones en France (scenarios S1 à S4). A termes, ces scénarios sont amenés à disparaître avec la mise en place de la nouvelle réglementation européenne.

imager – à savoir à des profondeurs d'investigations de quelques mètres pour des surfaces à couvrir de quelques dizaines d'hectares – et être en capacité de caractériser les contrastes géologiques inhérent à ce type de contexte (graviers s/ argiles). Bien que des développements soient encore nécessaires, ce type de technologie présente un degré de maturité qui devrait permettre de pouvoir aboutir à des systèmes opérationnels prochainement, et dont l'adaptation à l'exploration alluvionnaire mériterait d'être étudiée précisément.

## 4. Bibliographie

**AMIRA project** (2020) – P1204 Developing UAV Mounted Geophysical Sensor Arrays.

**Blindow N.** (2009) – The University of Münster Airborne Ice Radar (UMAIR) and first results of temperate and polythermal glaciers, in *Proceedings of the 5th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar*. IEEE, 28-30.

**Cabrera R.A. & Bekic G.** (2018) – Drone-borne ground-penetrating radar suitability for specific surveys: a comparative study of feature sizes versus antenna frequency and elevation over the ground. *First Break*, 36 (8) : 83-89. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.n0117>

**Charles N., Bailly L., Urien P., Labbé J.-F.** (2017) – Exploration minière. Collection « La mine en France ». Tome 4, 35 p., 10 fig., 2 tabl., 1 ann.

**Cunningham M., Samson C., Wood A., Cook I.** (2018) – Aeromagnetic Surveying with a Rotary-Wing Unmanned Aircraft System: A Case Study from a Zinc Deposit in Nash Creek, New Brunswick, Canada. *Pure Appl. Geophys.* 175, 3145-3158. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1736-2>

**Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D.** (2007) – The Shuttle Radar Topography Mission, *Reviews of Geophysics*, 45 : 1944-9208. <http://dx.doi.org/10.1029/2005RG000183>

**Goutaland D., Winiarski T., Dube J.-S., Bievre G., Buoncristiani J.-F., Chouteau M., Giroux B.** (2008) – Hydrostratigraphic characterization of the vadose zone of a glaciofluvial deposit underlying an infiltration basin using Ground Penetrating Radar. *Vadose Zone Journal*, 7 : 194-207.

**Gundelach V., Blindow N., Buschmann U., Salat C., Krellmann Y.** (2010) – Exploration of geological structures with GPR from helicopter and on the ground in the Letzlinger Heide (Germany) in *Proceedings of the XIII International Conference on Ground Penetrating Radar*. IEEE 2010.

**Malehmir A., Dynesius L., Paulusson K., Paulusson A., Johansson H., Bastani M., Wedmark M., Marsden P.** (2017) – The potential of rotary-wing UAV-based magnetic surveys for mineral exploration: A case study from central Sweden. *The Leading Edge* 36, 552-557. <https://doi.org/10.1190/tle36070552.1>

**Noviello C., Gennarelli G., Esposito G., Ludeno G., Fasano G., Capozzoli L., Soldovieri F., Catapano I.** (2022) – An Overview on Down-Looking UAV-Based GPR Systems. *Remote Sensing* 14, 3245. <https://doi.org/10.3390/rs14143245>

**Jürgens B., Ruiz Coupeau S., Herrero-Solana V., Kirsch M., IAO F.** (2020) – INFACCT technology watch report. Innovative Non-Invasive & Fully Acceptable Exploration Technologies <https://doi.org/10.5281/zenodo.4302430>

**Parshin A, Bashkeev A, Davidenko Y, Persova M, Iakovlev S, Bukhalov S, Grebenkin N, Tokareva M.** (2021) – Lightweight Unmanned Aerial System for Time-Domain Electromagnetic

Prospecting - The Next Stage in Applied UAV-Geophysics. *Applied Sciences*. 11(5):2060. <https://doi.org/10.3390/app11052060>

**Parvar K., Braun A., Layton-Matthews D., Burns M.** (2017) – UAV magnetometry for chromite exploration in the Samail ophiolite sequence, Oman. *J. Unmanned Veh. Syst.* juvs-2017-0015. <https://doi.org/10.1139/juvs-2017-0015>

**PIPAME** (2017) – Perspectives de développement de la filière des drones civils à l'export.

**Rutishauser A., Maurer H., Bauder A.** (2016) – Helicopter-borne ground-penetrating radar investigations on temperate alpine glaciers: A comparison of different systems and their abilities for bedrock mapping. *Geophysics*, 81(1) : WA119–WA129. <https://doi.org/10.1190/geo2015-0144.1>

**Thiery Y. & Terrier M.** (2018) – Évaluation de l'aléa glissements de terrain : état de l'art et perspectives pour la cartographie réglementaire en France. *Rev. Fr. Geotech.*



**RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

**Centre scientifique et technique**

3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

[www.brgm.fr](http://www.brgm.fr)



Géosciences pour une Terre durable

**brgm**