

CARTOGRAPHIE TOPOGRAPHIQUE PAR LIDAR SUR DRONE COUVRANT UNE EMPRISE D'ARM EN FORÊT GUYANAISE

Thomas Dewez (BRGM/DRP-RIG)

Avec Matthieu Chevillard (BRGM/DGR-MIN)
Bruno Roux & John Plaetevoet (L'Avion Jaune)

03 octobre 2022 Café de la Géomatique Guyanais

Projet financé par le Ministère de la transition écologique et solidaire
avec la contribution logisitique d'Amazon Gold



Topographie sous forêt en Guyane

Questions examinées

1. Est-ce qu'un lidar monté sur drone **est plus flexible** que les solutions existantes montées sur aéronefs habités (avion ou hélicoptère)?
2. Est-ce que les flats aurifères et leur morphologie sont détectables dans les nuages de points drone?
3. Quelles contraintes de mise en œuvre?

Protocole de test: mission d'essai sur le terrain

7 journées en forêt

5 journées d'acquisition photogrammétrique et lidar sur les criques Georgeon et Valentin (Montagnes Tortue)

4 agents: 2 BRGM + 2 L'Avion Jaune

Equipements testés

- Drone Quantum Systems Trinity F90+ (convertible VTOL)
 - Lidar Qube240 et Appareil photo Sony RX1M2
- Drone DJI Mavic 2 Pro (quadricoptère photogrammétrique)



Quantum Systems Trinity F90+

Une aile fixe à décollage vertical pour des vols longue portée

Caractéristiques du drone

5 kg de masse au décollage

2.40 m d'envergure

700 g de charge utile (lidar OU photo)

90 minutes d'autonomie théorique

Vitesse de vol 17-22 m/s (~70km/h)

40 minutes
de vol pour couvrir 1km²

Avantages

- Couverture de 100 ha (1 km²) en un seul vol
- Capacité de transit entre la zone de décollage et la zone d'intérêt (pour la Crique Valentin : 2 x 4.8 km de transit)
 - Simplifie le choix des zones de décollage

Inconvénients

- Zone de décollage de 120 m de diamètre à 40 m du sol
- Charge utile limitée
- Capacité de suivi de terrain limitée

Contexte géographique

Site dans les Montagnes Tortue (NE Guyane)

Crique Georgeon (amont)

- Vallée orientée SW-NE (N035°E)
- Secteur rectangulaire de 2 km x 500 m
- 300 m de dénivelée entre l'amont et l'aval
- 130 m d'encaissement de la rivière
- Les arbres les plus hauts culminent à 70m du sol

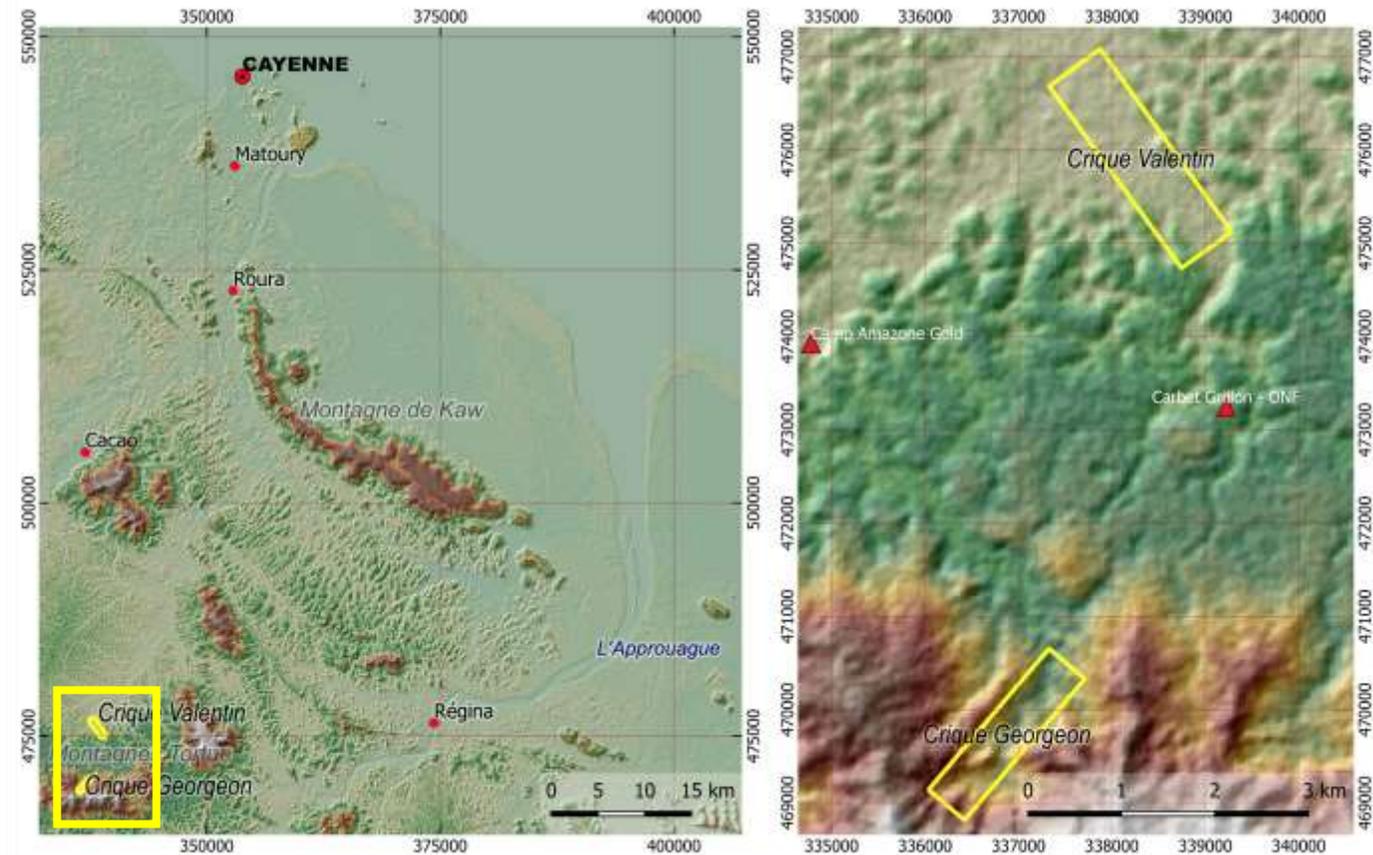


figure © Thomas Dewez - BRGM



Crique Georgeon

Stratégie d'acquisition

4 jours d'acquisitions (6-9 octobre 2021)

4 vols photo
4 vols lidar

Etape 1: Reconnaissance du relief de la zone

Vols photogrammétriques avec les drones

- Mavic 2 Pro
- Trinity F90+

La photogrammétrie a une portée illimitée

La résolution du MNS diminue avec la distance mais reste suffisante

Etape 2: Vols lidar

Vol lidar avec Trinity F90+ et lidar Quantum Qube240

Portée nominale du lidar : 140 m

La portée limitée du lidar impose un vol drapant

Donc planification des vols grâce au MNS photogrammétrique



Fort couvert végétal



Qube240

Crique Georgeon: Etape 2 Réalisation des vols

Objectif : Délimiter la plaine alluviale sous forêt grâce à un MNT à 1m de résolution

4 difficultés

1. Fort couvert végétal (forêt amazonienne)
2. Topographie encaissée (mine alluvionnaire)
 - Amplitude totale de relief 200 m amont/aval
3. Hauteur des arbres
 - Localement ~70 m/sol
4. Portée limitée du lidar

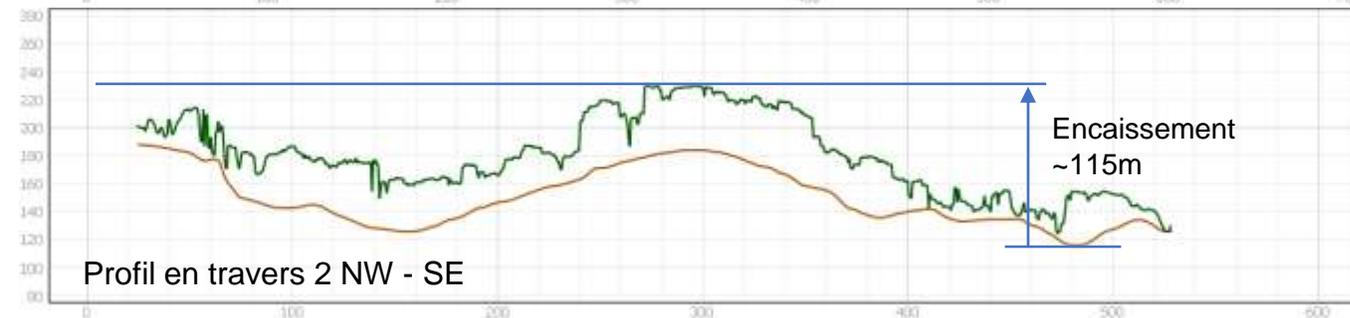
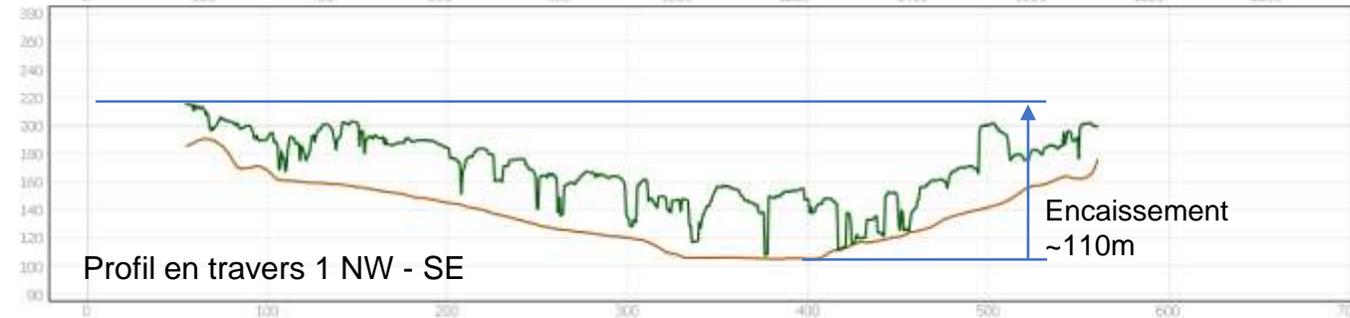
Portée théorique
Qube240

140 m

Solution

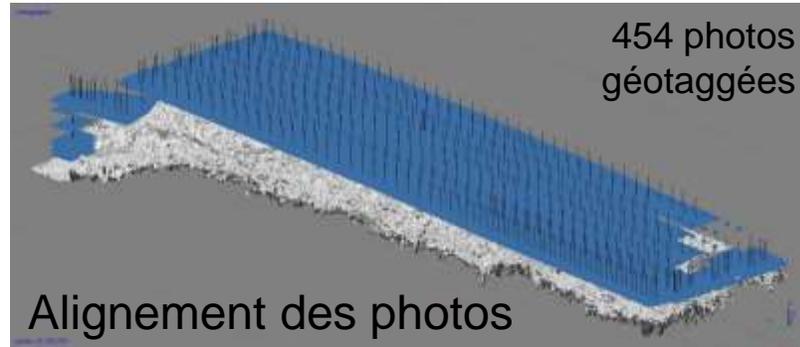
Produire sur site un MNS à jour et résolu pour contraindre la topographie dans le planificateur de vol Quantum

Réaliser les vols lidar s'approchant progressivement du relief



Crique Georgeon: Etape 1

Reconnaissance du relief par photogrammétrie



Objectif

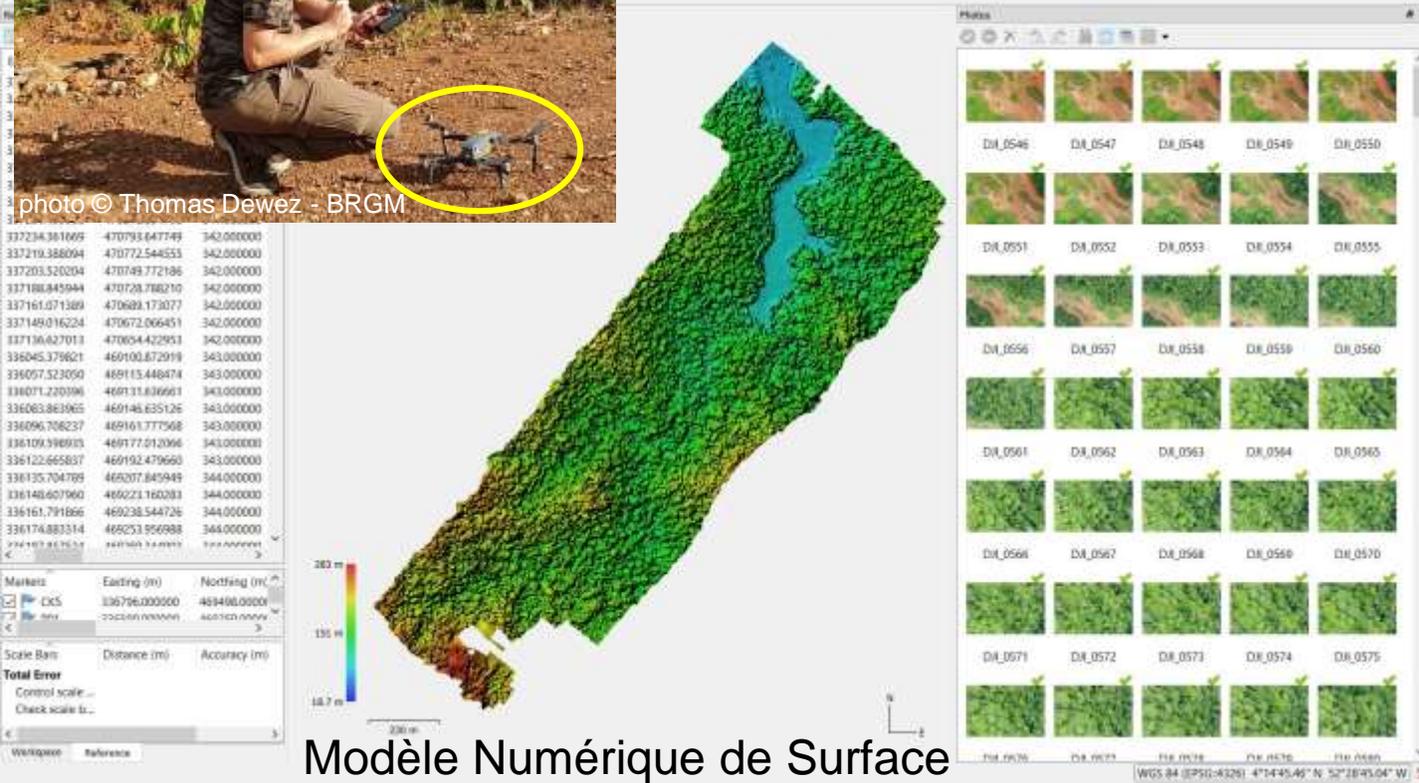
Mesurer la topographie réelle pour planifier des vols lidar au plus près du sol

Equipement

- Drone Mavic 2 Pro avec camera Hasselblad
- Ordinateur portable
- Agisoft Metashape (logiciel de photogrammétrie)

Etapes

1. Couverture photos nadirale sur toute la zone
 - 454 photos de 20Mpix (3 vols, 34 minutes)
2. Calcul photogrammétrique rapide
 - Pré-alignement avec tag GPS des photos
 - Alignement (17 minutes)
 - Nuage dense low density=21Mpts (10 minutes)
 - MNS à 33 cm/pix (30 secondes)
3. Export du MNS en Lat/Long WGS84 (EPSG:4326)



Reconnaissance bouclée en ~1h

14:22:45

Trappe du lidar



14:25:38



14:26:43

Crique Georgeon: Etape 2

Montage du drone Quantum Trinity F90+

Drone en pièces détachées : 5 éléments à assembler

Fuselage

Corps: électronique (GNSS, Pitot, autopilot) + lidar/photo

Queue: gouverne et moteur de propulsion

Nez : batterie de 64.8Wh

Voilure

2 ailes fixes avec volets de profondeur

2 moteurs rotatifs 90°

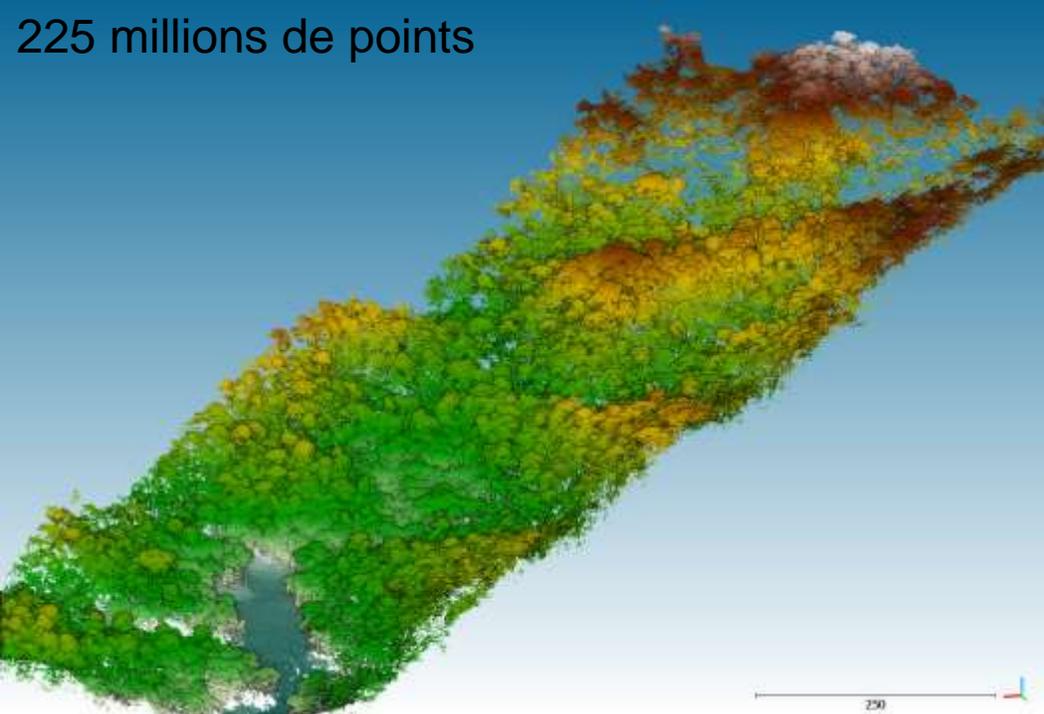
Décollage en 6 minutes



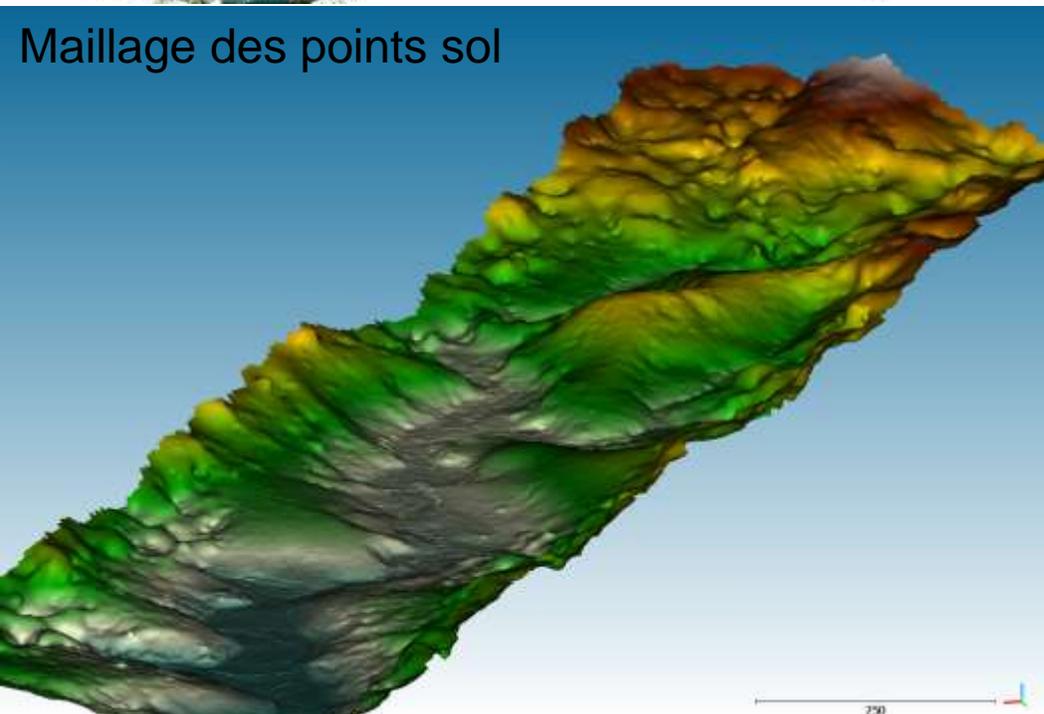
14:28:16

photos © T. Dewez - BRGM

225 millions de points



Maillage des points sol



Crique Georgeon: Etape 2 Résultats

Objectif : Délimiter la plaine alluviale sous forêt grâce à un MNT à 1m de résolution

A chaque vol, le Trinity F90+ a couvert 1km² de surface

Résultat des vols cumulés: nuage de points complet

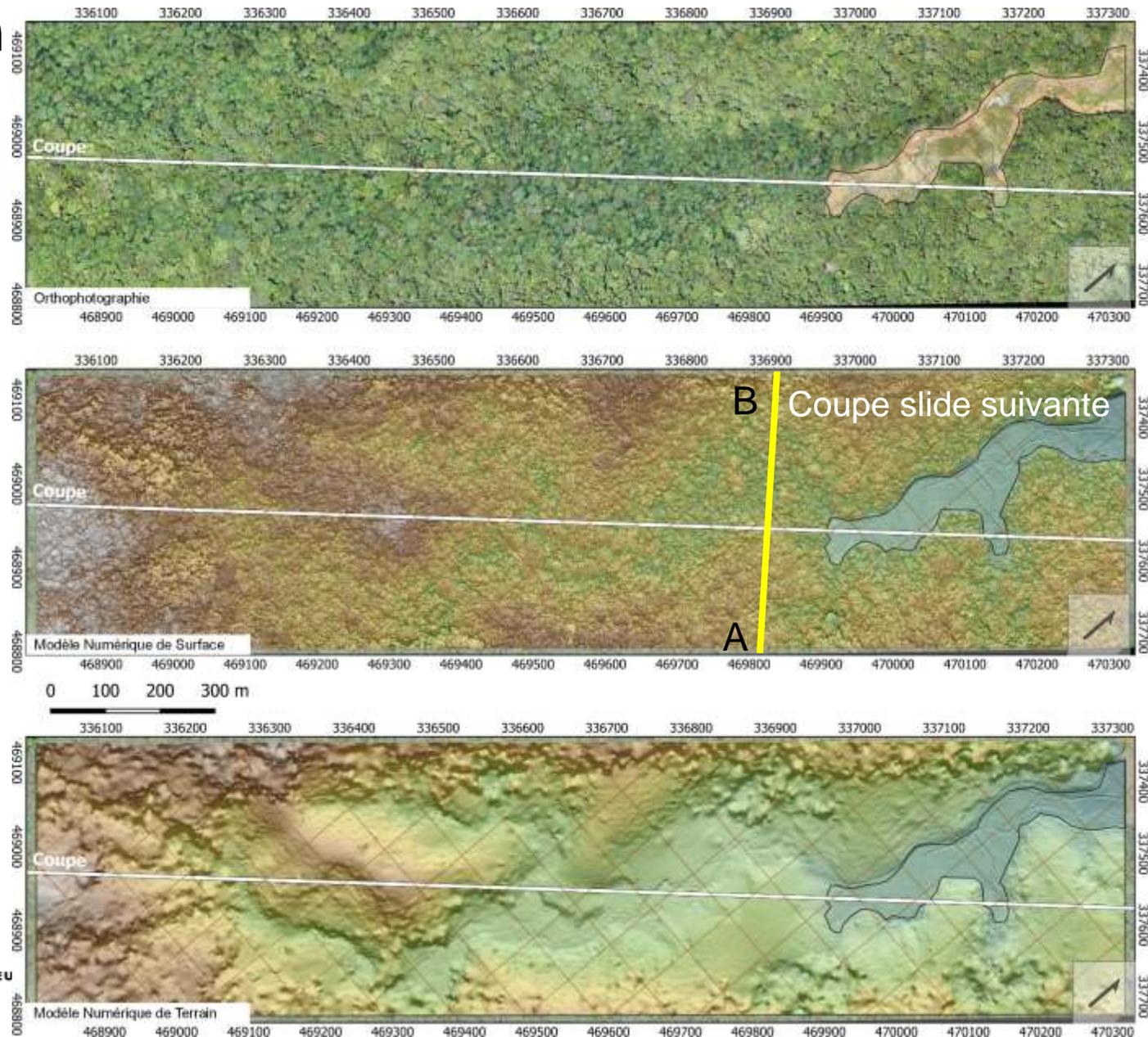
Le sol est bien visible dans la zone utile à la mine

Nuage 3D
225 Mpts

Résultats après traitement des lignes de vol et classification des points

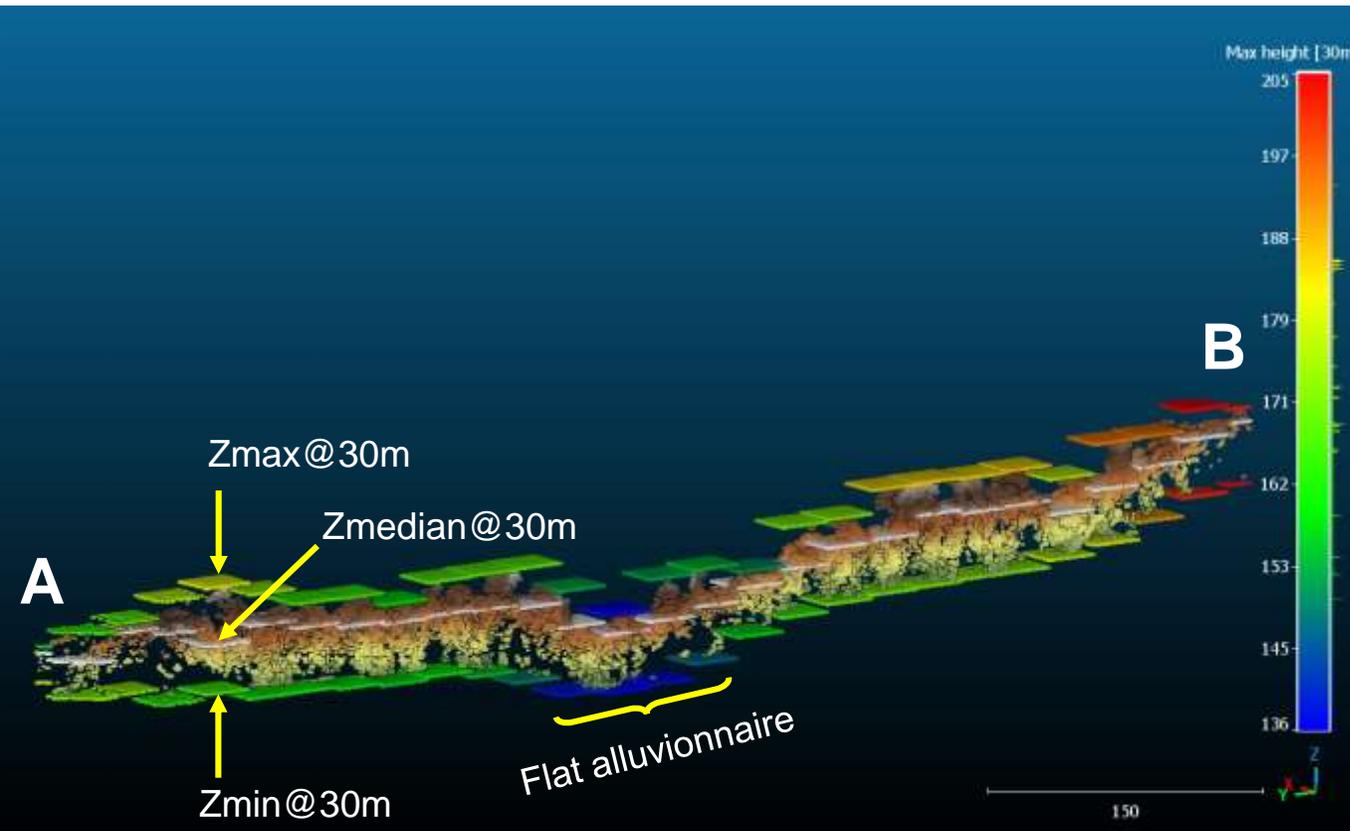
Crique Georgeon

✓ Orthophoto, MNS et MNT



Résultats après traitement des lignes de vol et classification des points

Crique Georgeon



Coupe à travers la vallée

Distribution des points 3D sur toute la colonne de végétation

Altitude médiane déportée vers le sommet de la canopée (plus de la moitié des points 3D est piégée dans les hautes branches/feuilles), c'est attendu

Topographie du sol obtenue partout sur une grille à 30 m de résolution. Il n'y a pas de pixel anormalement « perché ».

Comment en est-on arrivé là?

Crique Georgeon

- ✓ Densité croissante pour chaque vol
- ✓ Densité de points fonction de la hauteur du drone à la canopée
 - ✓ Vol 1 : 178m [90-224m/sol]
 - ✓ Vol 2 : 165m [85-224m/sol]
 - ✓ Vol 3 : 104m [11-133m/sol]
 - ✓ Vol 4 : 31.5m [0-65m/sol]

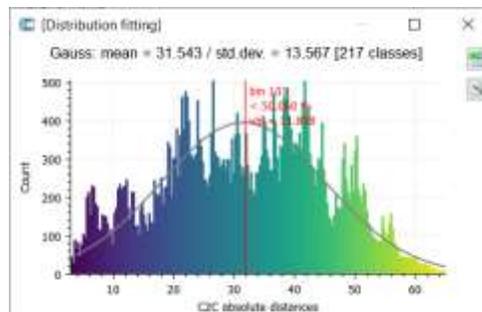
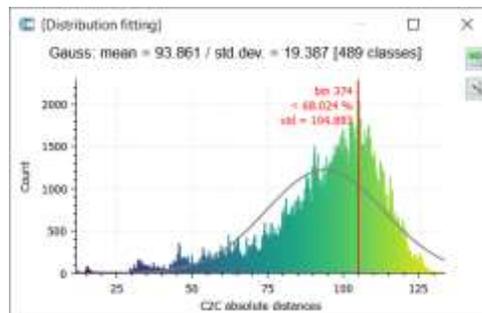
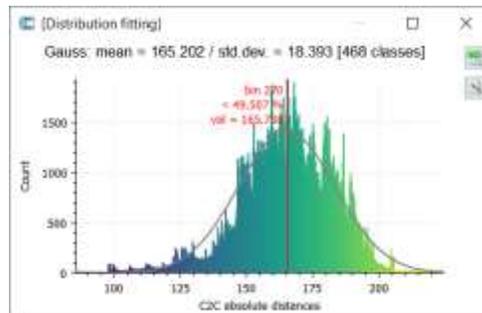
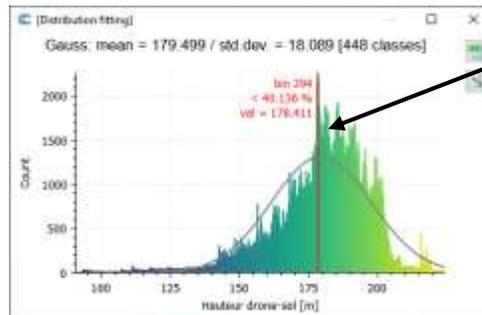
↑
Hauteur médiane du drone
au dessus du relief

Vol 3 : Cartographie la plus complète
132 Mpts

Dans la limite de la portée lidar

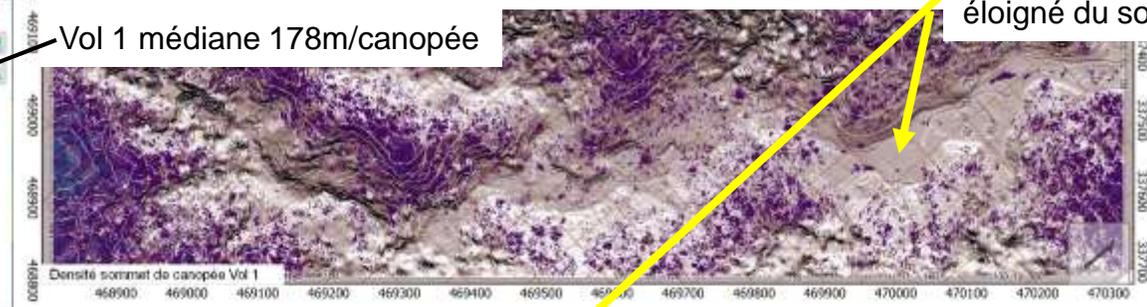
Vol 4 : Densité optimal, mais impact

Hauteur du drone

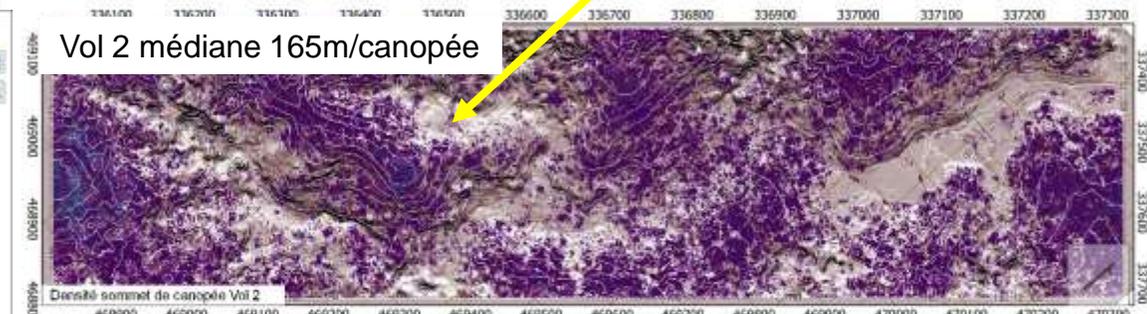


Densité de points en sommet de canopée (par 1m²)

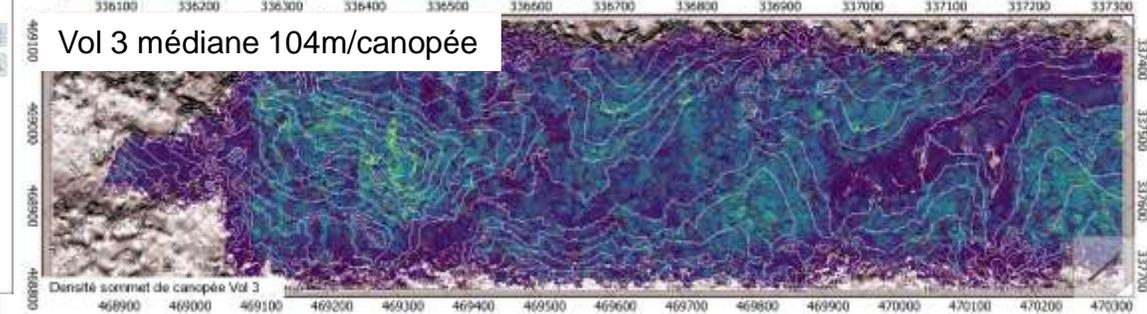
Vol 1 médiane 178m/canopée



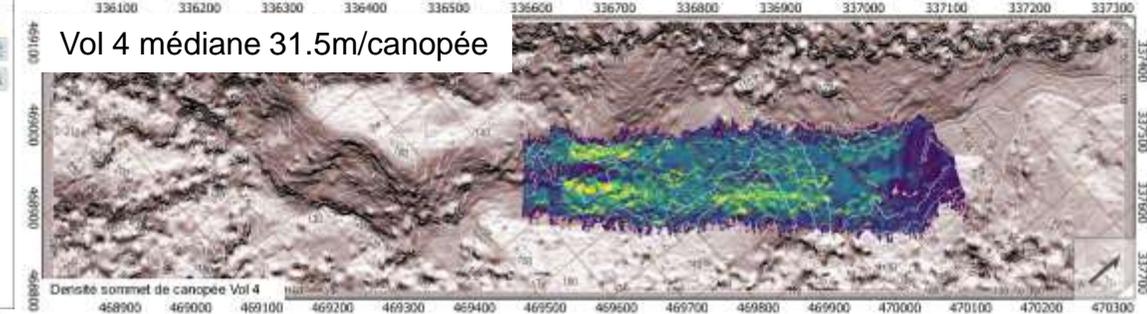
Vol 2 médiane 165m/canopée



Vol 3 médiane 104m/canopée



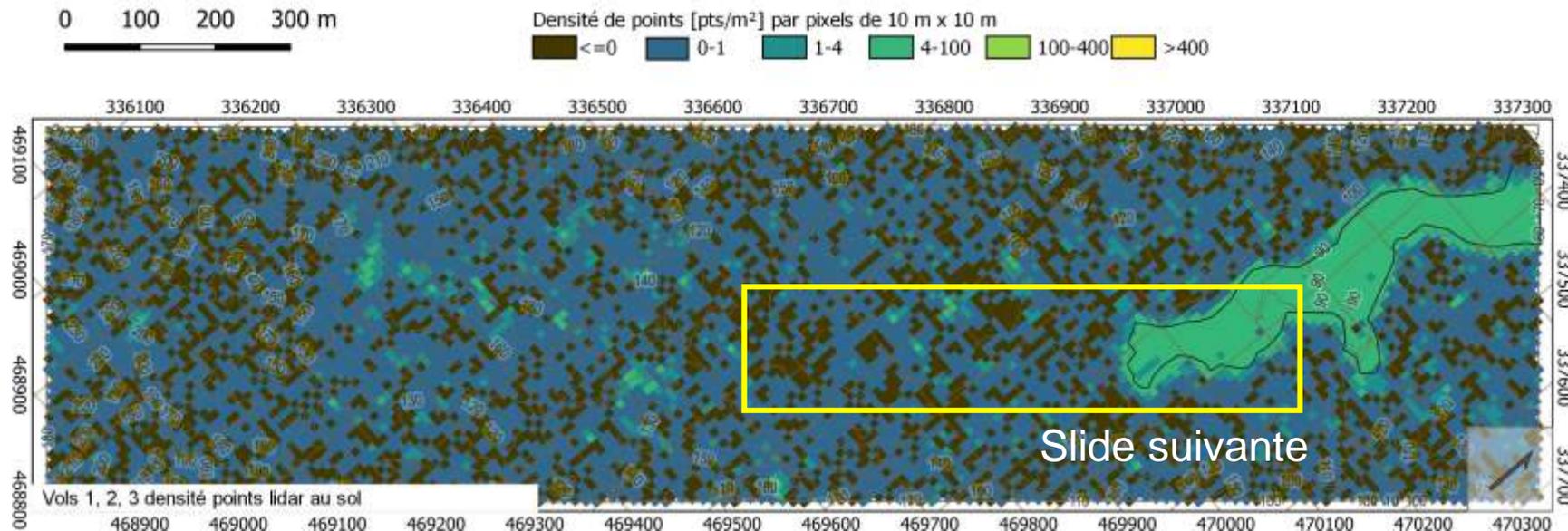
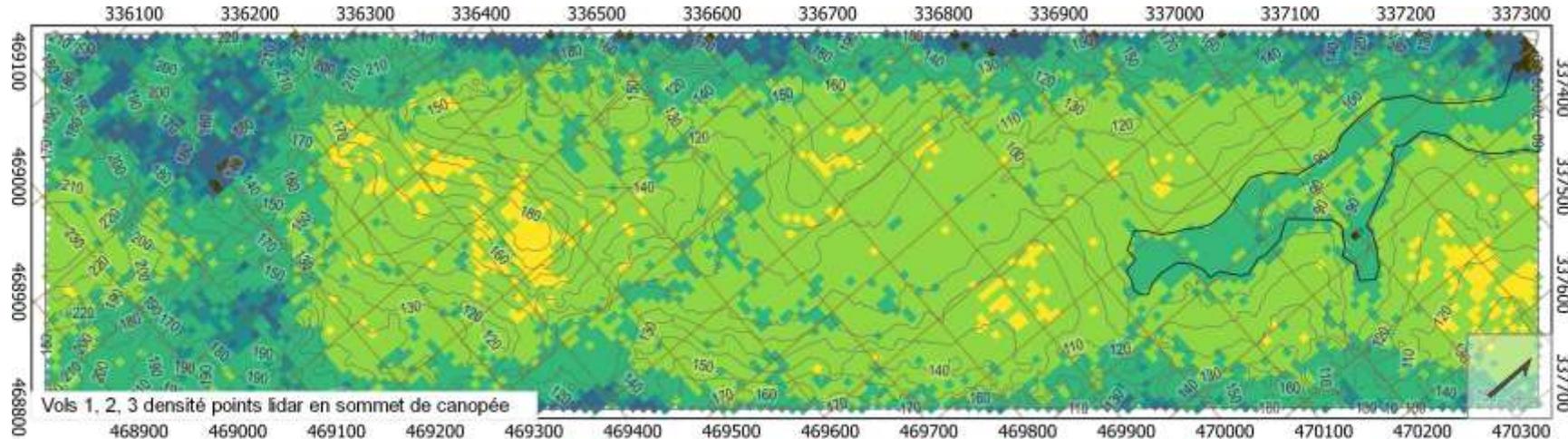
Vol 4 médiane 31.5m/canopée



Quelle densité de points lidar tirer pour atteindre le sol?

Crique Georgeon

- ✓ Densité de points totale sur canopée et sur sol
- ✓ Cahier des charges putatif: 400 pts/m² partout
- ✓ Résultat vu la topographie: majoritairement entre 100 et 400 pts/m² en sommet de canopée
- ✓ Malgré ça, densité de points sol majoritairement ≤ 1 pt/m²



Slide suivante

Quel maille de MNT convient à la densité effective de données?

Crique Georgeon

Sur le secteur du vol 4, évaluation des distances au point de donnée lidar le plus proche

Pour les vols 1,2,3 :

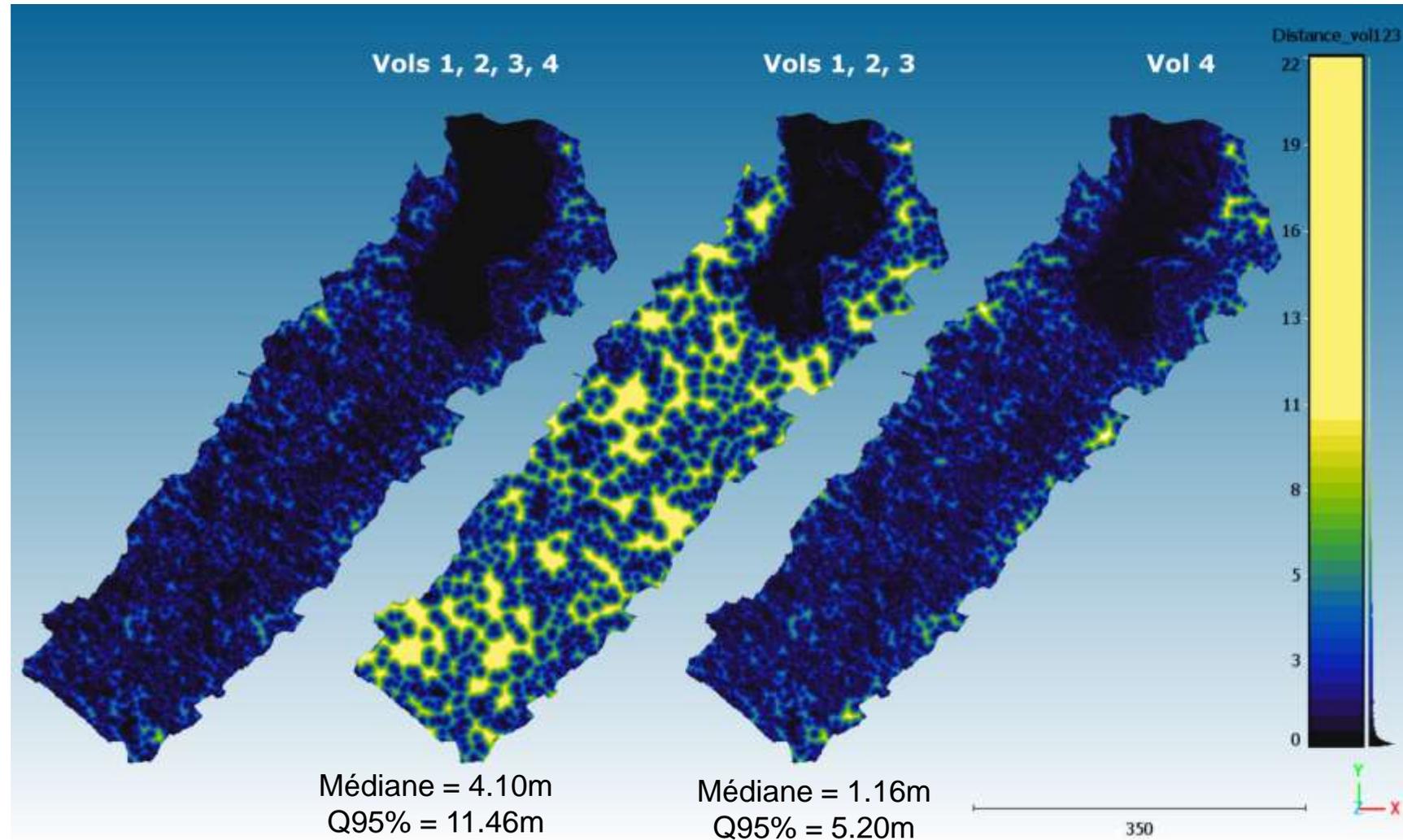
95% des points se situent à moins de 11.46m les uns des autres

MNT à 10 m préconisé

Pour le vol 4 :

95% des points sont à moins de 1.16m les uns des autres

MNT à 1m possible



Combien de points ont atteint le sol sur la quantité tirée ?

Vol	Hauteur drone-sol [m] Min – med – max	Nombre de point atteignant le sol	
		Zone totale	Zone forestière
Vol 1	111 – 205 – 294	1 pt / 390 tirs	1 pt / 1020 tirs
Vol 2	89 – 185 – 247	1 pt / 800 tirs	1 pt / 1412 tirs
Vol 3	35 – 136 – 176	1 pt / 130 tirs	1 pt / 395 tirs
Vol 4	34 – 74 – 119	1 pt / 50 tirs	1 pt / 136 tirs
Tous	-	1 pt / 99 tirs	1 pt / 255 tirs

Sur la zone forestière, le sol est atteint **4 fois sur 1000**

Pour un MNT à 1m sous la forêt, il faut viser une densité de points supérieure à 250 pts/m²

Pour comparaison (données BRGM)

Vignes champenoises en hiver : 1 pt / 4 tirs

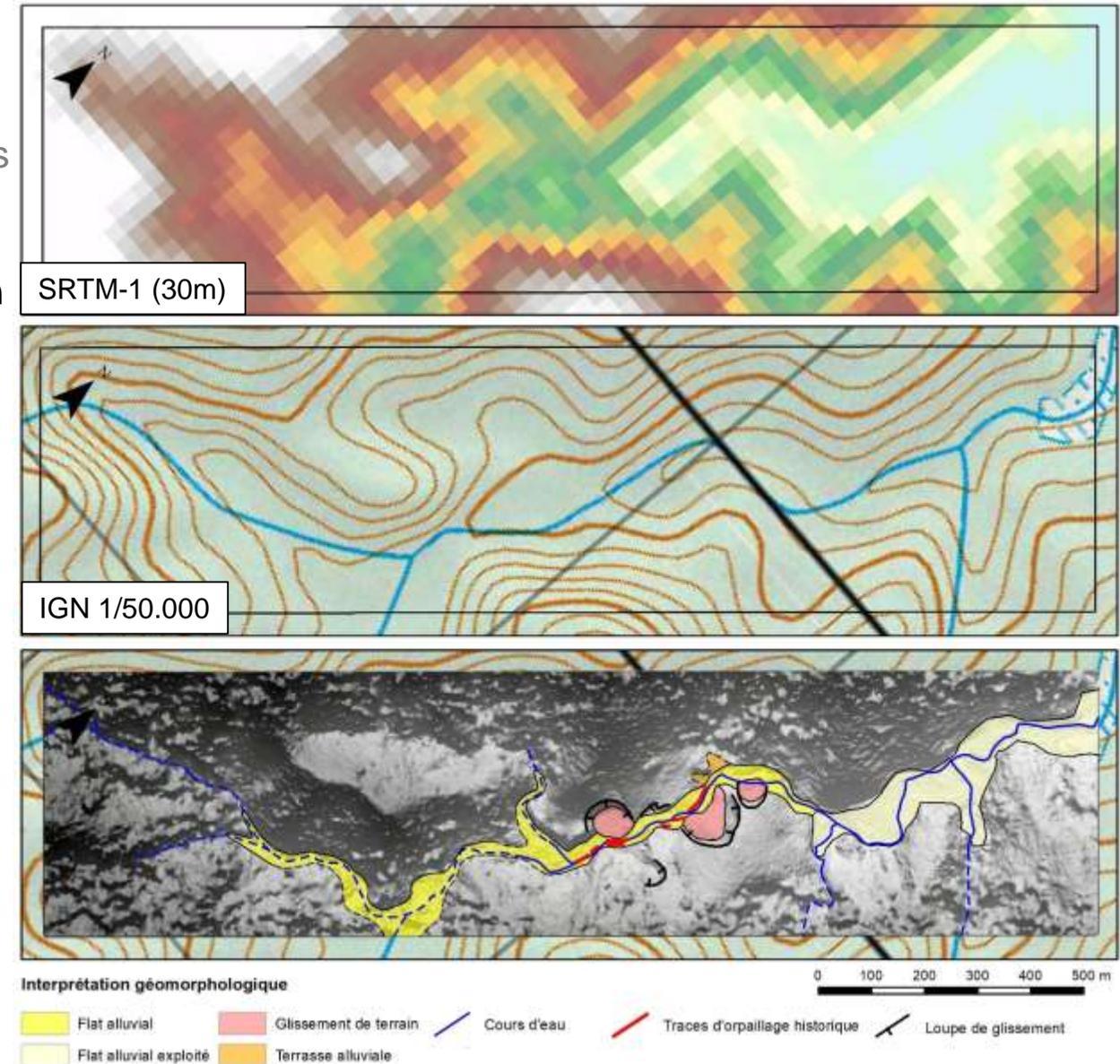
Forêt Champenoise en hiver : 1 pt / 30 tirs

Forêt Martinique : 1 pt / 100 tirs

Quels gains apportent la donnée drone dans le contexte de l'exploration alluvionnaire ?

La donnée drone apporte :

- Une **information à jour**, disponible à l'instant t
- Une **donnée de haute-résolution** par rapport aux documents conventionnels disponibles dans ce contexte
- Une **caractérisation de la vallée alluviale et une extension précise de la zone de flat** (surface, périmètre)
- L'identification des **formes géomorphologiques** utiles (zone de flat, terrasses, glissements de terrain, traces d'orpaillage historique, etc.)
- Applications des données lidar/photogrammétriques **sur l'ensemble du cycle minier** :
 - **Exploration** : cf. supra
 - **Exploitation** : Planification et suivi des travaux miniers, par couplage avec les données d'exploration
 - **Réhabilitation** : Définition de la topographie avant exploitation. Planification des travaux de restauration pour remodelage des vallées alluviales au plus proche du milieu naturel initial.



Conclusions

1. Quelles contraintes de mise en œuvre?
 - Nécessité d'une zone décollage assez large (Φ 120 m à 40m du sol)
 - Portée limitée du lidar par rapport au relief local → Tenir compte de la topographie, ajuster le plan de vol par tronçons
2. Est-ce que les flats aurifères et leur morphologie sont détectables dans les nuages de points drone?
3. Est-ce qu'un lidar monté sur drone **est plus flexible** que les solutions existantes montées sur avion ou hélicoptère?
 - **Ca dépend**
 - Avantages du drone: léger, peu consommateur d'énergie, vol autonome répété grâce à la planification
 - Avantages de l'aéronef habité: adaptation instantanée au terrain, peu de limitations sur la charge utile (donc lidar + puissant)
 - Pour de la **reconnaissance en terrain mal connu**: préférer avion/hélicoptère
 - Une fois la topographie connue, le drone peut s'imposer pour le suivi/clôture de chantier

Faut-il préférer un drone à aile fixe ou à voilure tournante?

... Ca dépend: **autonomie de vol** >< **suivi de terrain**

Critère de flexibilité	Trinity F90+ avec Qube 240	Multirotor type DJI M300+YellowScan Surveyor
Décoller	-1 : zones de décollage existent à distance; validé sur Valentin avec 9 km de transit ; Zone de décollage de 120 m de diamètre	+1 (zones de décollage plus fréquentes dans des faibles trouées, à condition d'accepter de décoller sans satellite)
Rejoindre la zone d'acquisition	+2 : validé sur Valentin avec 9 km de transit réalisé	-2 (doit décoller localement pour ne pas consommer d'énergie sur le transit)
Couvrir la superficie de 1 km ² en un seul vol	+2 : 40 minutes pour lever 1km ²	-2 (vitesse de vol en mesure à 5 m/s, vols de 14 minutes = 4200m/vol pour les 28000 à 32000m de lignes de vol nécessaires)
Voler à hauteur sol constante	-1 (possible dans certaines limites, suppose de reconnaître la topographie par un ou plusieurs vols de reconnaissance, la longueur d'onde du relief doit être compatible avec les capacités de vol 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 (maximum de flexibilité du drone pour épouser au mieux la topographie sans inertie, mais le vol programmé demande une topographie de reconnaissance préalable ; le pilotage manuel difficile à cause de l'écran des arbres) – solution Mavic photogrammétrique acceptable si le coût énergétique du calcul photogrammétrique en forêt est possible
Obtenir la densité de points en sommet de canopée	+1 les performances sont liées à la puissance limitée du scanner et à la hauteur de vol, selon le relief	non déterminé sans doute efficace
Obtenir des points sol	+1 Efficace quand la hauteur de vol reste sous 180m	non déterminé mais sans doute plus favorable car un multicoptère est plus agile pour épouser le relief
Fournir l'énergie de bord pour lever 1km ² de forêt	+2 Trinity F90+ → 1 vol de 40 min pour 1km ² incluant 9 km de transit; 1 batterie de 64.8Wh par vol. Energie nécessaire 64.8Wh/km² Il faut laisser refroidir les batteries avant de les recharger	-2: DJI Matrix M300 → 2 vols de 30 min pour 1 km ² sans transit; 2 batteries de 274Wh par vol. Energie nécessaire 1096Wh/km² (17x énergie Trinity) DJI Matrix M600 → 4 vols de 15 min pour 1 km ² sans transit; 6 batteries de 129.6Wh/vol. Energie nécessaire 3110 Wh/km² (24 batteries) pour la couverture lidar seule (~50x énergie Trinity) A noter que l'amené/repli de 24 batteries depuis la métropole est rédhibitoire
Refroidir les moteurs et l'électronique en surchauffe dans les phases de vol stationnaire	-1 (concerne le décollage/atterrissage, nécessité de refroidir les ESC dans un véhicule climatisé ou avec du gaz sous-pression) échauffement lié à la translation verticale et à la température ambiante	+2 (le décollage en champ proche rend rédhibitoire l'amener d'un véhicule sur place pour refroidir l'électronique, mais prévu pour vol stationnaire)
Garder la ligne de vol	+1 le drone doit toujours être en mouvement pour rester en l'air. Il est	+2 stabilité gyroscopique énorme, récite très bien aux rafales

Remerciements

A l'équipe d'Amazone Gold pour son appui logistique et son accueil



Robin
Ingénieur



Diego
Ingénieur

Et les excellents repas de Gorette

Remerciements

L'équipe de mission

BRGM

L'Avion Jaune



Photos © Thomas Dewez - BRGM

Matthieu Chevillard
Chef de projet et de mission



Thomas Dewez
Spécialiste lidar et photogrammétrie



Bruno Roux
Co-gérant de l'Avion Jaune



John Plaetevoet
Télépilote



Contacts : t.dewez@brgm.fr m.chevillard@brgm.fr

Ces résultats sont contenues dans le rapport public :

Dewez, T.J.B., Chevillard, M., Le Maire, P., François, B., Aertgeerts, G., Roux, B., Plaetvoet, J., Houlès, M., 2022. Méthodologie d'acquisition de données LiDAR par drone et perspectives de couplages géophysiques. Application à l'exploration aurifère alluvionnaire en Guyane (No. BRGM/RP-72082-FR). BRGM, Orléans, France.

Bientôt disponible sur <https://www.mineralinfo.fr/fr>

