Vers une mesure de débit en rivière par drone : un capteur LiDAR vert bathymétrique couplé à la LSPIV

Aurélien Ballu (Dr), Stuart Lane (Pr)
Université de Lausanne, Institut des Dynamiques de la Surface Terrestre (IDYST)

Swiss LiDAR Day

Un seul capteur sous un drone mesure **la forme du lit** (LiDAR vert 532 nm), **la surface de l'eau** (radar) et **les vitesses de surface** (caméra global shutter, LSPIV), soit tout ce qu'il faut pour calculer un **débit**.

σ 3 cm — calibration de la distance LiDAR, paliers de 3 à 20 m

±4 cm/s — vitesses de surface (PTV) contre le courantomètre, mesure à 15 cm du fond extrapolée en surface (16 verticales)

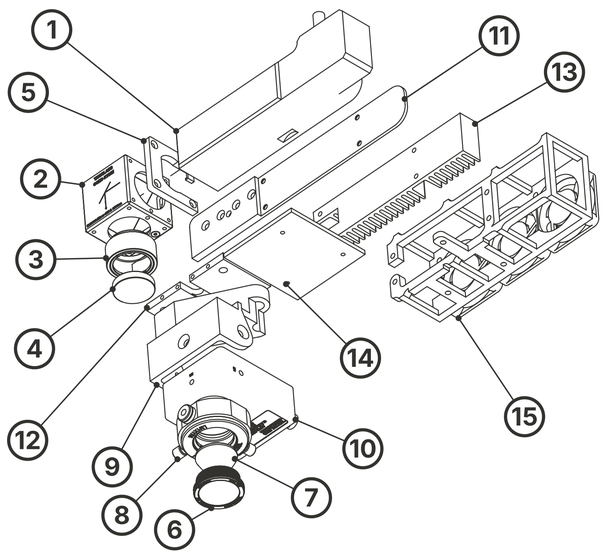
< 15 000 CHF — coût du matériel du capteur, drone non compris

−6 % — erreur sur le débit contre un courantomètre (α = 0,85) ; un seul cas d'étude : eau claire, profondeur < 0,5 m

1 Contexte et objectif

Le débit d'une rivière se calcule à partir de sa **section mouillée** (bathymétrie) et de sa **vitesse**. Les LiDAR bathymétriques, sur avion puis sur drone, cartographient le fond mais restent très coûteux. Objectif : un capteur **relativement bon marché** couplant bathymétrie et vitesse de surface.

2 Le capteur



Émission
1. Laser à microcristal 532 nm (Teem Photonics SNG-100P-1S0)
2. Cube optique de cage 30 mm (Thorlabs CCM1-K13/M)
3. Tube SM1 de 0,5 po (Thorlabs SM1L05)
4. Fenêtre biseautée en silice fondue Ø 25,4 mm, antireflet (Thorlabs WW41050-A)
5. Capot de protection anti-poussière du laser

Réception
6. Adaptateur SM1 externe / monture C interne (Thorlabs SM1A10A)
7. Lentille asphérique de collection, f = 16 mm (Thorlabs ACL25416U-A)
8. Monture de lentille à translation X-Y (Thorlabs LM1XY/M)
9. Support de la photodiode
10. Module photodiode à avalanche au silicium (Thorlabs APD430A2/M)

Structure, refroidissement, électronique
11. Plaque support du laser et de la photodiode
12. Plaque de fixation de la photodiode
13. Radiateur de refroidissement
14. Plaque de maintien de la carte contrôleur du laser
15. Support de l'électronique

Laser : Teem Photonics SNG-100P-1S0

valeurs de la fiche constructeur (préliminaires) ; contrôleur MLC-03A, alimentation 12 V

532 nm — longueur d'onde, faisceau gaussien TEM00

> 20 kHz — cadence des impulsions (≈ 22 kHz mesurée)

< 0,85 ns — durée d'impulsion (largeur à mi-hauteur)

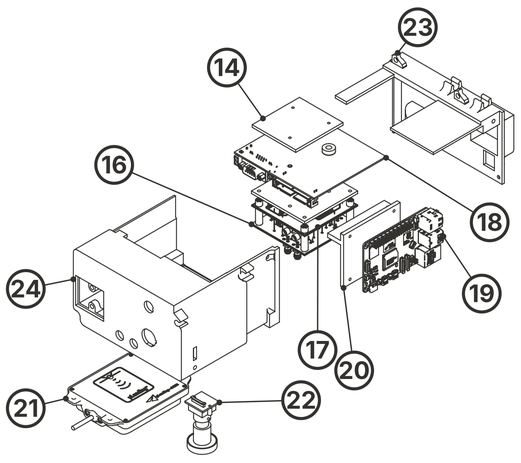
> 5 µJ — énergie par impulsion

> 7 kW — puissance crête

> 100 mW — puissance moyenne

4,2 mrad — divergence pleine du faisceau

Classe 3B — 300 g, 145 × 42 × 35 mm



Acquisition et contrôle du laser
16. Carte de détection START/STOP (comparateurs rapides)
17. Carte d'acquisition : Teensy 4.1 et convertisseur temps-numérique TDC7200
18. Contrôleur du laser, carte MLC-03A-BR1 (Teem Photonics)

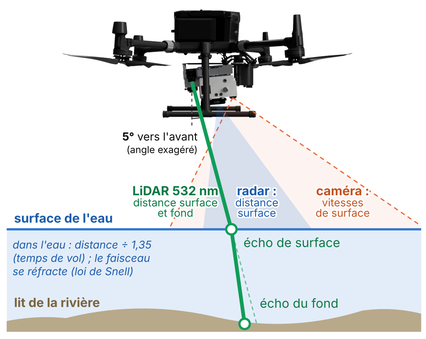
Calcul
19. Raspberry Pi 5
20. Support du Raspberry Pi

Capteurs
21. Radar altimètre US-D1
22. Caméra à interface MIPI, obturateur global (IMX296)

Boîtier
23. Boîtier de protection blindé, partie 1
24. Boîtier de protection blindé, partie 2


DJI Matrice 300 RTK équipé du capteur


Tir du laser vert, de nuit, depuis le drone en vol



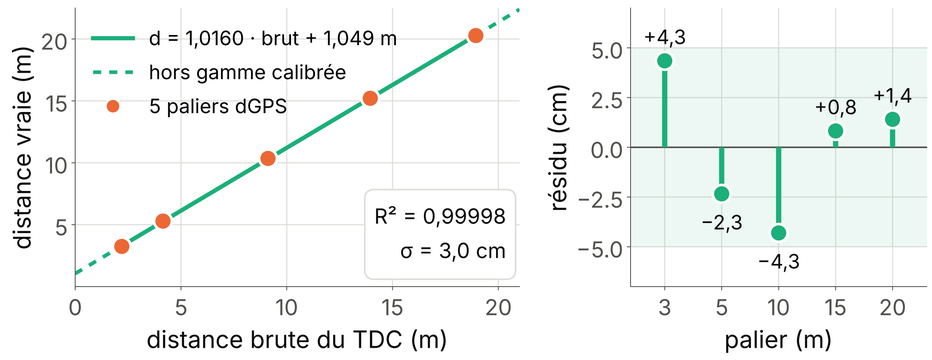
Porteur : DJI Matrice 300 RTK, commandes sur la radiocommande (Payload SDK). **Coût du matériel :** laser et contrôleur 7 400 CHF · APD, lentille et platine de réglage 1 900 CHF · radar US-D1 600 CHF · électronique, caméra, Raspberry Pi, SSD, filtre passe-bande étroit, etc. 3 000 CHF · **total ≈ 13 000 CHF**.

3 Calibration

Distance
5 paliers en vol stationnaire en RTK (3 à 20 m) au-dessus d'un sol levé au dGPS

Objectif de la caméra
mire ChArUco, 38 vues : RMS 0,48 px, fx = 1 092 px, forte distorsion corrigée

Géométrie
bras de levier antenne RTK → APD au CAD, antenne de référence identifiée par rotation à 180°



Distance vraie (dGPS, le long de la visée) contre distance brute du TDC : relation linéaire, résidus ≤ 4,3 cm.

4 Premiers résultats : le Nozon à Orny (VD), 30.10.2026

Référence : courantomètre électromagnétique sur 16 verticales tous les 20 cm (une mesure à 15 cm du fond, profil de vitesse supposé en loi puissance 1/6) et 173 points dGPS (RTK, LV95) sur le fond et les berges. Capteur : un transect LiDAR en travers et 5 min de vol stationnaire à 5,6 m pour les vitesses de surface.

Vitesses de surface (PTV, suivi de traceurs)

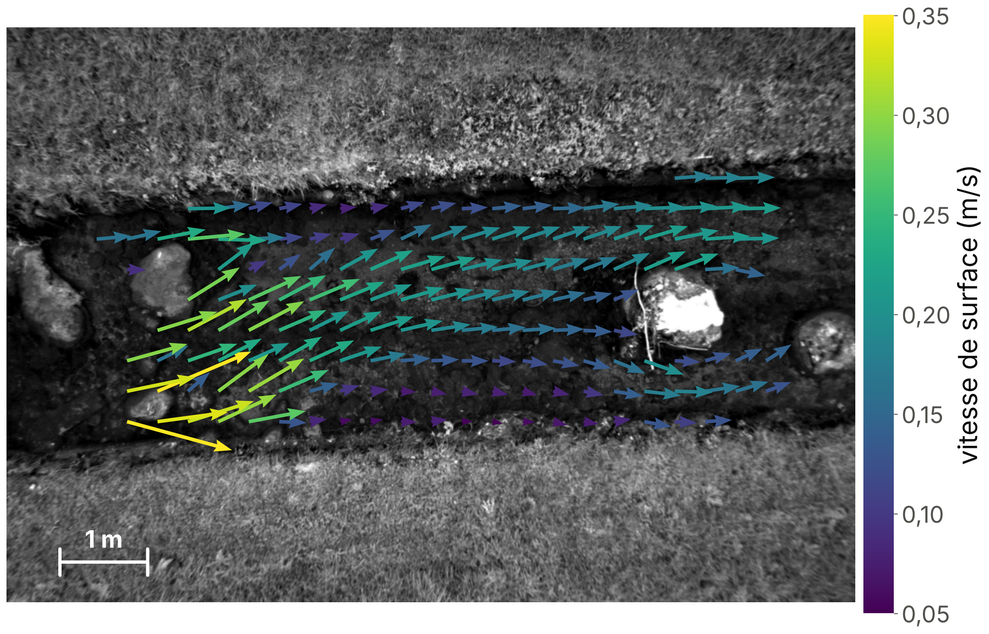
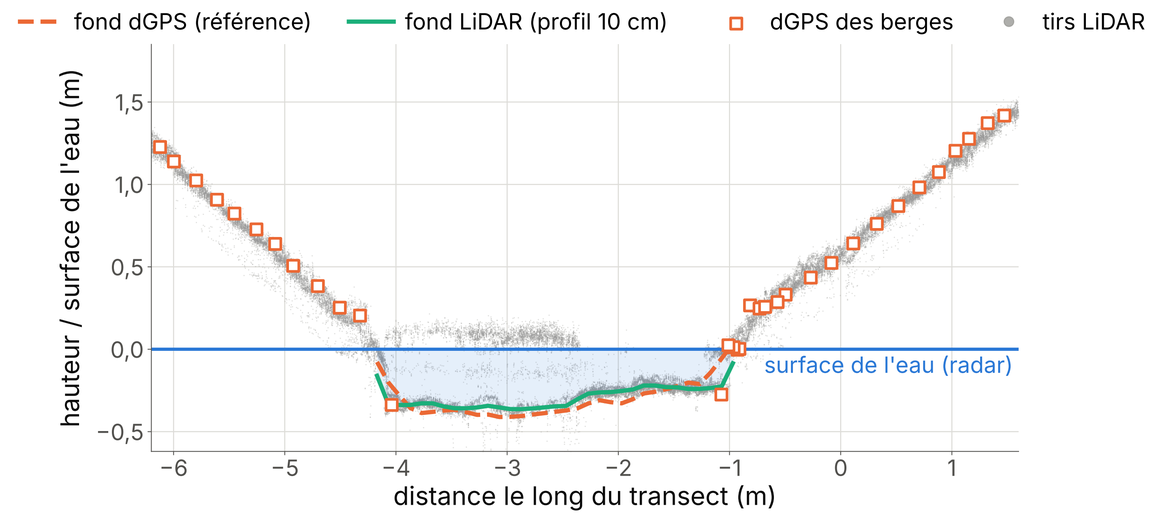


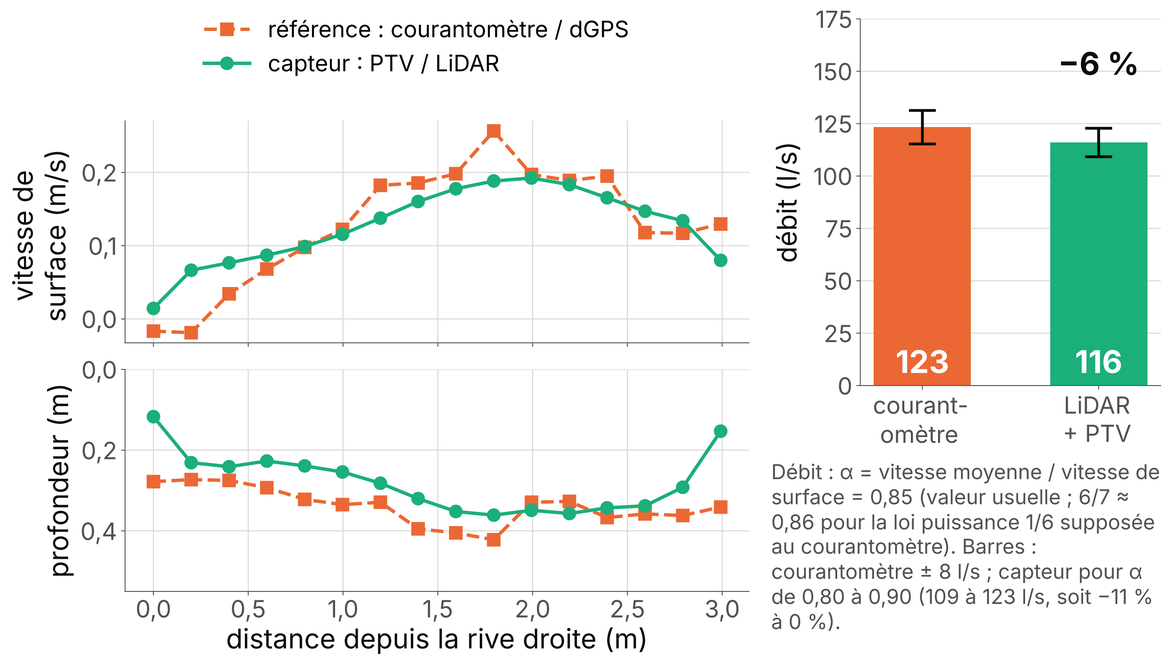
Image de la caméra global shutter IMX296 (tout le capteur exposé au même instant : traceurs non déformés), redressée (5,2 mm/pixel, écoulement de gauche à droite) et vitesses de surface moyennes sur 5 min.

Bathymétrie (LiDAR vert)



Tirs LiDAR (gris) et fond reconstruit, comparés au fond dGPS (surface 3D interpolée sur les points levés dans le lit, de part et d'autre du profil LiDAR) ; carrés : points dGPS des berges.

5 Comparaison à la référence



Débit : α = vitesse moyenne / vitesse de surface = 0,85 (valeur usuelle ; 6/7 ≈ 0,86 pour la loi puissance 1/6 supposée au courantomètre). Barres : courantomètre ± 8 l/s ; capteur pour α de 0,80 à 0,90 (109 à 123 l/s, soit −11 % à 0 %).

Aux verticales du courantomètre : vitesse de surface (courantomètre extrapolé depuis 15 cm du fond ; pas de biais d'ensemble, écart typique 3–4 cm/s, jusqu'à 8 cm/s près de la rive droite) et profondeur (écart moyen −6 cm, σ 5 cm).

Ce qui fonctionne : vitesses de surface et profondeur au milieu du lit, sans contact avec l'eau ; chaîne de traitement entièrement scriptée (calibration, géoréférencement, débit).

Ce qui reste à améliorer : le débit est à −6 % (116 contre 123 l/s), résultat de deux erreurs qui se compensent en partie : largeur du lit mouillé surestimée (3,29 m contre 2,99 m) et profondeur sous-estimée (≈ 6 cm aux verticales). Pistes : détection des rives par le LiDAR (berges raides et herbe en surplomb, qui mêlent échos du sol et de l'eau) ; positionnement horizontal des tirs (bras de levier, latence de la navigation du drone) ; transect de vol qui ne passe pas exactement sur la section jaugée ; rapport entre vitesse moyenne et vitesse de surface (α).

6 Perspectives

- traitement des rives (mélange d'échos sol / eau) et cartographie 2D du fond
- nouvelles campagnes de validation (débits plus forts, eau plus profonde et turbide)

Contact : Aurélien Ballu (Dr), IDYST, Université de Lausanne — aurelien.ballu@unil.ch