



UNIVERSITÉ
LAVAL

Faculté de foresterie, de géographie
et de géomatique



CENTRE DE RECHERCHE

EN DONNÉES ET INTELLIGENCE
GÉOSPATIALES

Calibrage d'un système de télémétrie mobile multi capteurs monté sur une motomarine (Projet FORSCE)



Christian Larouche, Professeur agrégé,

Mohsen Hassanzadeh Shahraji, Stagiaire postdoctoral

Département des sciences géomatiques,

Université Laval



Colloque CIDCO 2023 : Un océan accessible

Rimouski, 5 avril 2023

COLLOQUE
2023
SYMPOSIUM

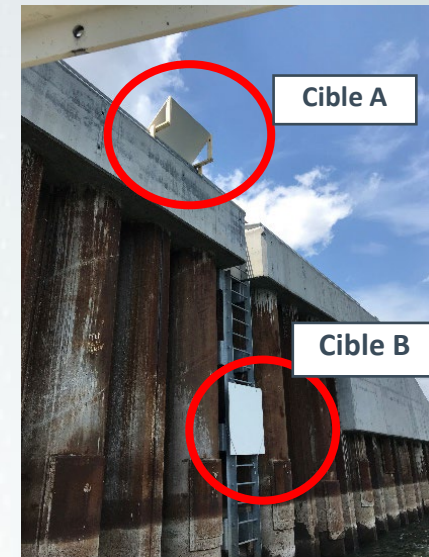
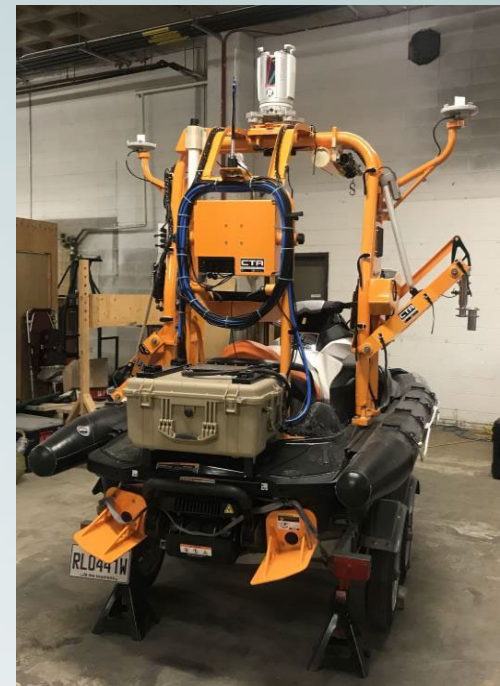


CIDCO



Plan de la présentation

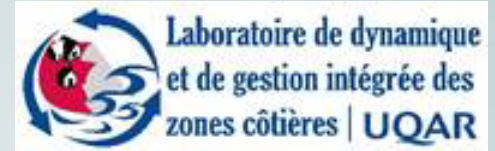
1. Introduction : Projet FORSCE
2. Objectifs
3. La motomarine multi capteurs
4. Méthodologie de mesure de bras de levier des capteurs avec les résultats
5. Méthodologie de mesure des angles de visée du scanneur LiDAR avec les résultats
6. Conclusions



1. Introduction : Projet FORSCE

Programme **FORSCE** avec LDGIZC de l'UQAR

- Flotte **Opérationnelle de Recherche en Sciences Côtières et Environnementales**
- Financement Fondation canadienne pour l'innovation (FCI) et du Gouvernement du Québec
- Ce projet vise à mettre en œuvre une flotte d'équipements de pointe pour réaliser des études sur les zones côtières
- L'équipe est composée de chercheurs de l'UQAR, de l'UQAM et de l'Université Laval
- **Rôles de l'équipe de l'Université Laval :**
 - **assurer que ces systèmes soient proprement calibrés et qu'ils fournissent des données géospatiales de bonne qualité**
 - **produire les rapports de calibrage de plateformes multi capteurs**

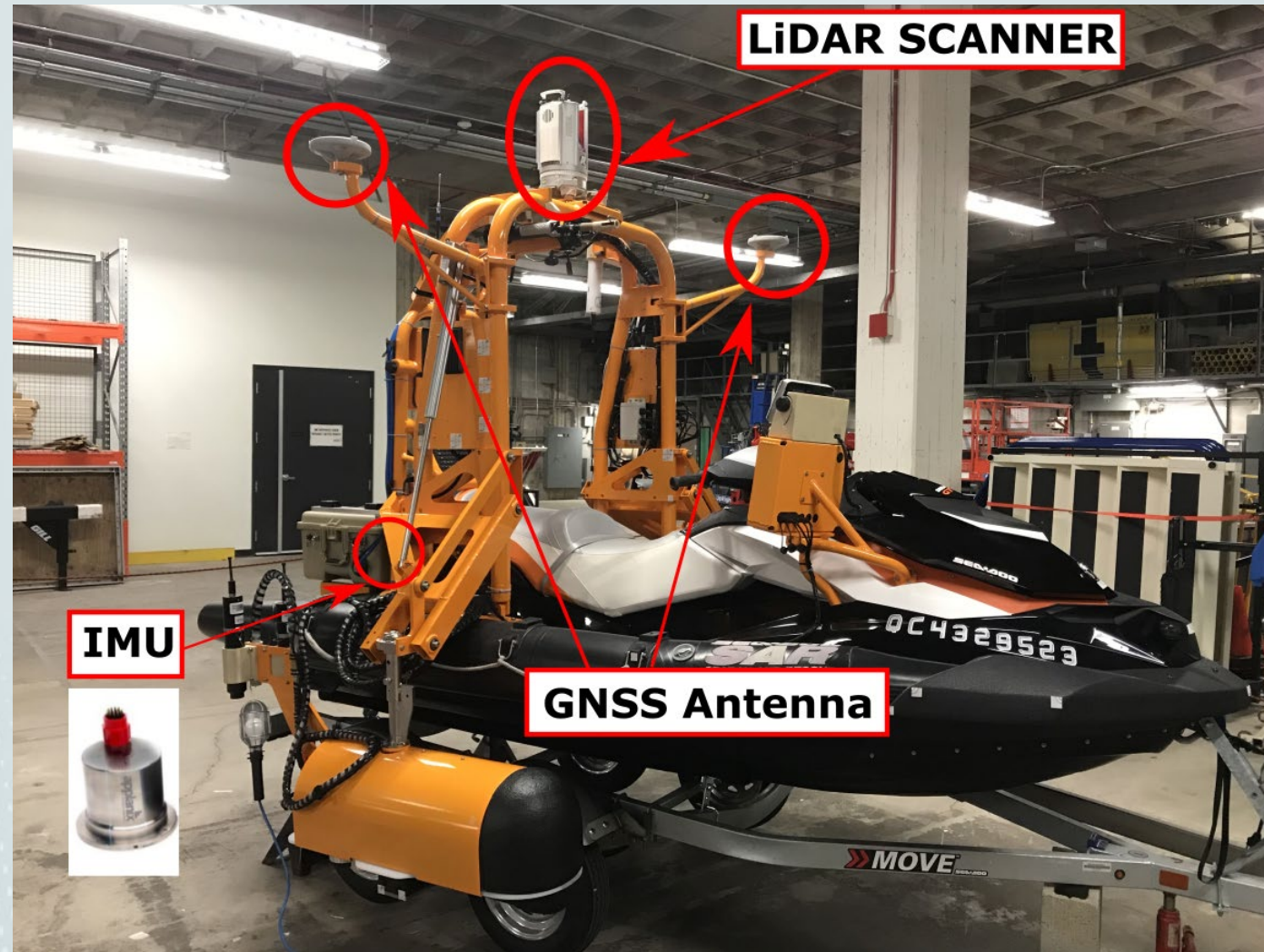




2. Objectifs

- La motomarine multi capteurs
- Méthodologie suivie pour le calibrage des capteurs
 - Estimation des bras de levier des capteurs de la motomarine
 - Estimation des angles de visé du scanneur LiDAR de la motomarine
- Résultats obtenus
 - Valeurs des bras de levier des capteurs de la motomarine par rapport à l'IMU et au centre de gravité (COG) de la motomarine
 - Valeurs des angles de visée du scanneur LiDAR de la motomarine

3. La motomarine multi capteurs



La motomarine du projet FORSCÉ et ses capteurs

3. La motomarine multi capteurs

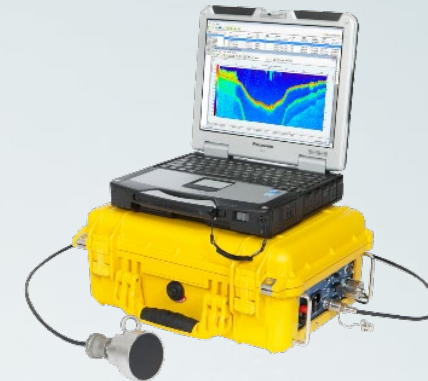
- POS MV V5 d'Applanix



- Antenne GNSS de Trimble 540 AP



- Échosondeur mono faisceaux MX de Biosonics



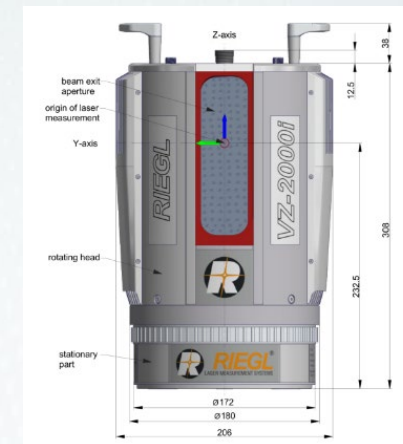
- Pinger ou profileur de sédiments de Knudsen



- Échosondeur multi faisceaux 2022 de R2Sonic



- Scanneur LiDAR VZ-2000i de Riegl



4. Méthodologie : Paramètres recherchés géoréférencement direct



Coordonnées du véhicule au moment de l'observation du point LiDAR
Observées par le récepteur GNSS (G)

Matrice de rotation entre la référence cartographique (m) et le IMU (b)
Observées par le IMU (I)

Coordonnées d'un point dans le système local du capteur LiDAR
Observées par le capteur LiDAR (L)

$$\begin{bmatrix} X_M \\ Y_M \\ Z_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix} + R_b^m(H_I, R_I, P_I) \cdot R_l^b(B_{XL}, B_{YL}, B_{ZL}) \cdot \begin{bmatrix} r_L \cdot \cos(\theta_L) \cdot \cos(\varphi_L) \\ r_L \cdot \sin(\theta_L) \cdot \cos(\varphi_L) \\ r_L \cdot \sin(\varphi_L) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_O \\ Y_O \\ Z_O \end{bmatrix}$$

Coordonnées géoréférencées d'un point LiDAR dans le système cartographique (M)

m : mapping frame
b : body frame
l : laser scanner frame

Matrice de rotation entre le capteur LiDAR (l) et le IMU (b)
Obtenu par calibrage des angles de visée

Distances entre le IMU et le capteur LiDAR – bras de leviers ou offsets (O)
Obtenues par calibrage ou mesures précises en laboratoire

Paramètres recherchés

4. Méthodologie : Équipements choisis pour effectuer des mesures précises de bras de leviers

MS60 : Multi station totale robotisée pour faire des mesures précises de distances inclinées, d'angles verticaux, de directions horizontales

MS60



LS10 : Niveau électronique pour faire des mesures précises d'élévations

LS10

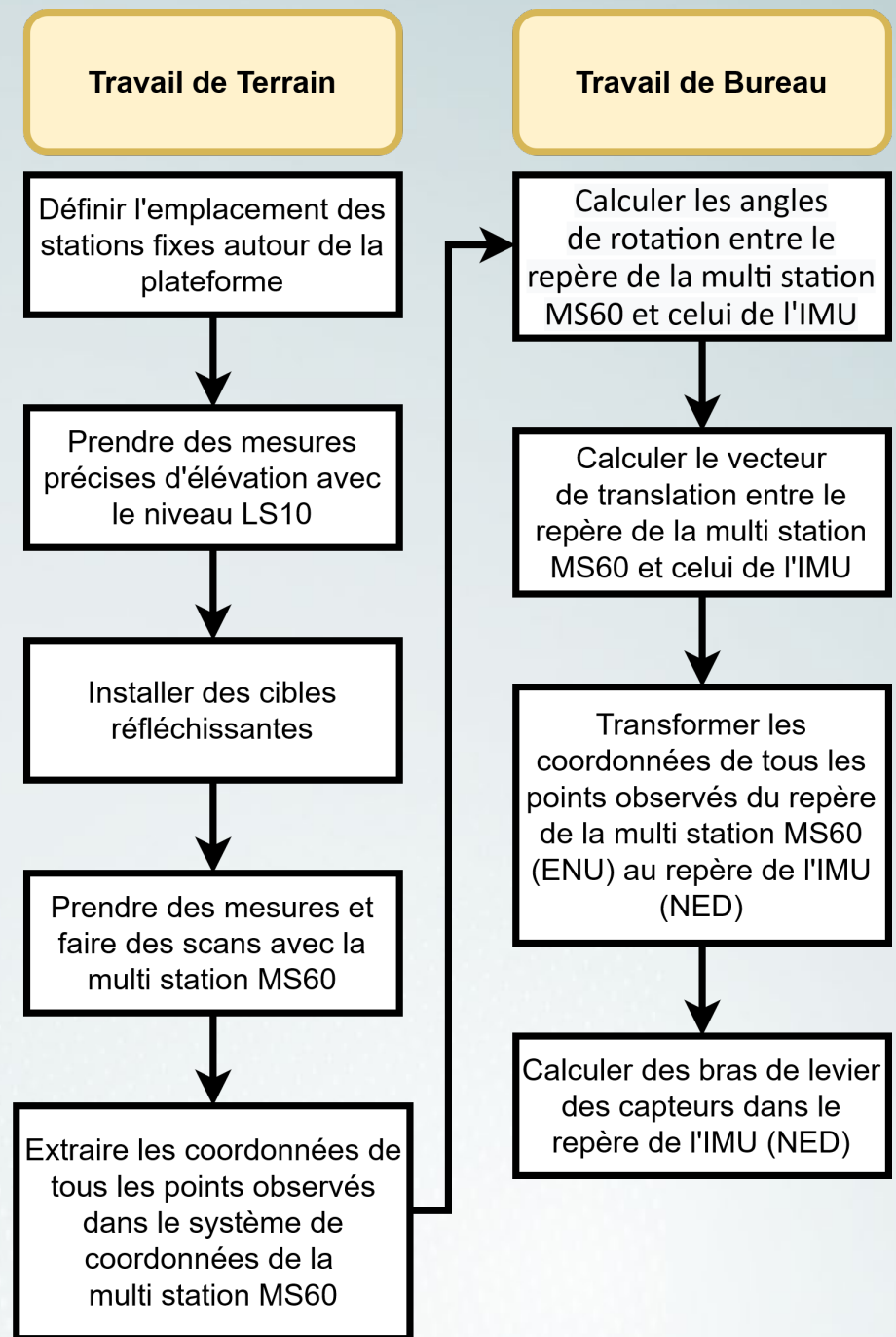


Caractéristiques	MS60	LS10
Portée (sans prisme)	Jusqu'à 2 000m	Jusqu'à 110 m
Précision angulaire	1"	N/A
Précision linéaire (sans prisme)	2mm + 1.5ppm	0.3mm (nivellement sur 1 km)
T° d'utilisation	-20°C à +50°C	-20°C à +50°C

Quelques caractéristiques des instruments utilisés



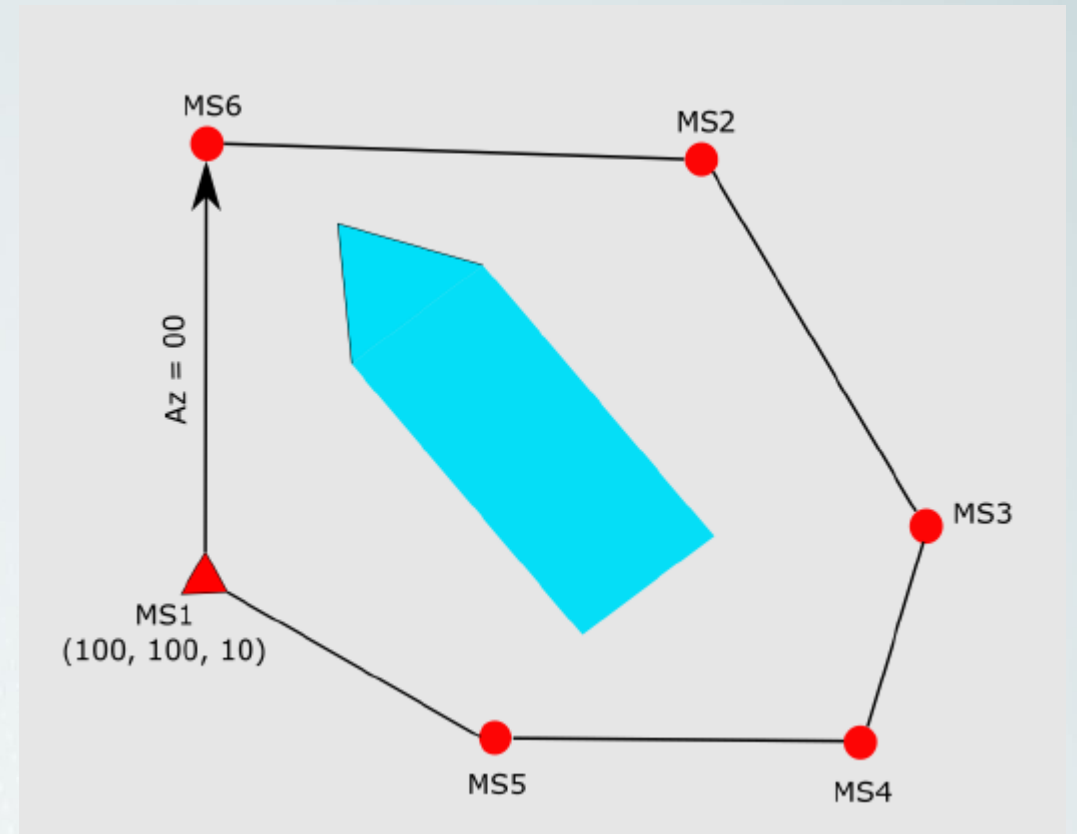
4. Méthodologie : Estimation précise des bras de levier de la motomarine multi capteurs



4. Méthodologie : Estimation précise des bras de levier de la motomarine multi capteurs

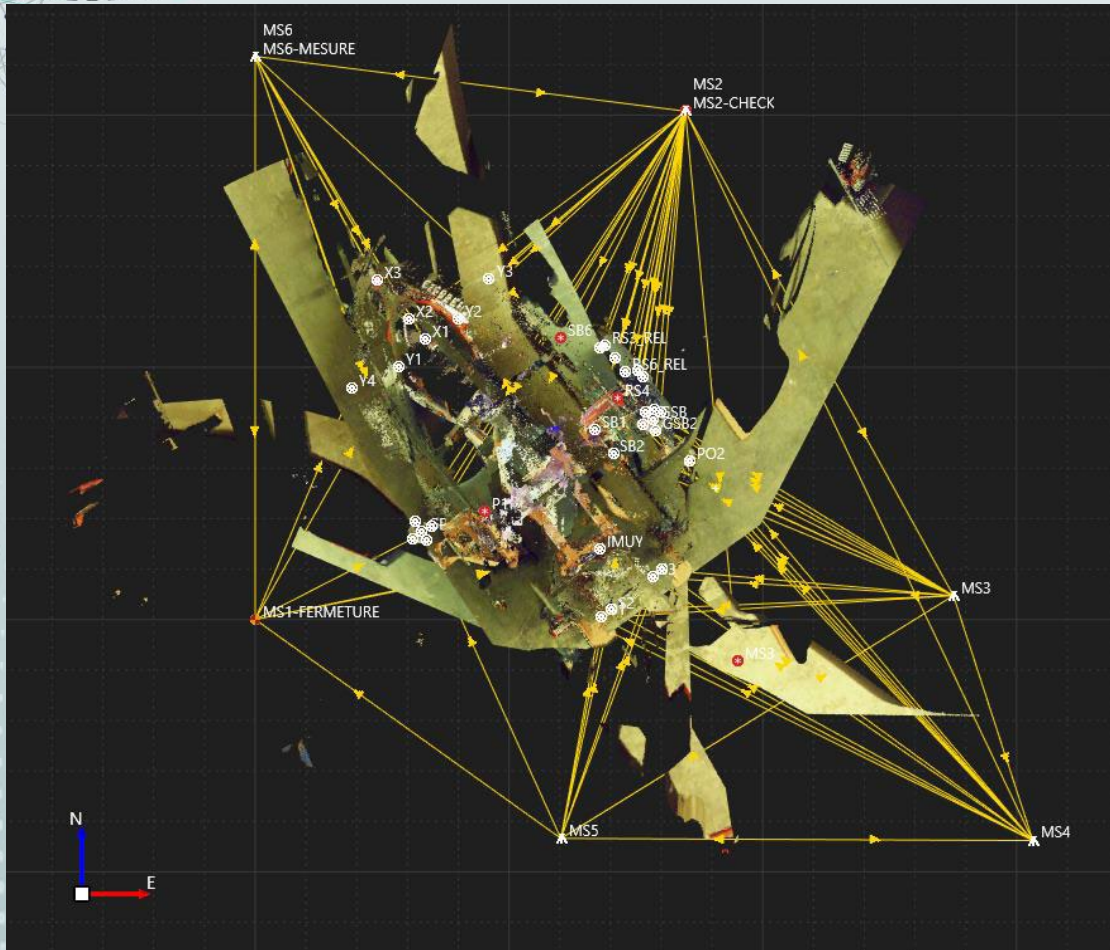
La méthode développée consiste à :

- établir un micro réseau fermé de stations autour de la plateforme avec la multi station Leica MS60;
- contrôler l'altimétrie du micro réseau avec le niveau Leica LS10;
- mesurer un point précis sur chaque capteur (IMU, antennes GNSS, caméra et scanneur LiDAR, etc.) avec la multi station Leica MS60;
- estimer les coordonnées 3D de chaque point.

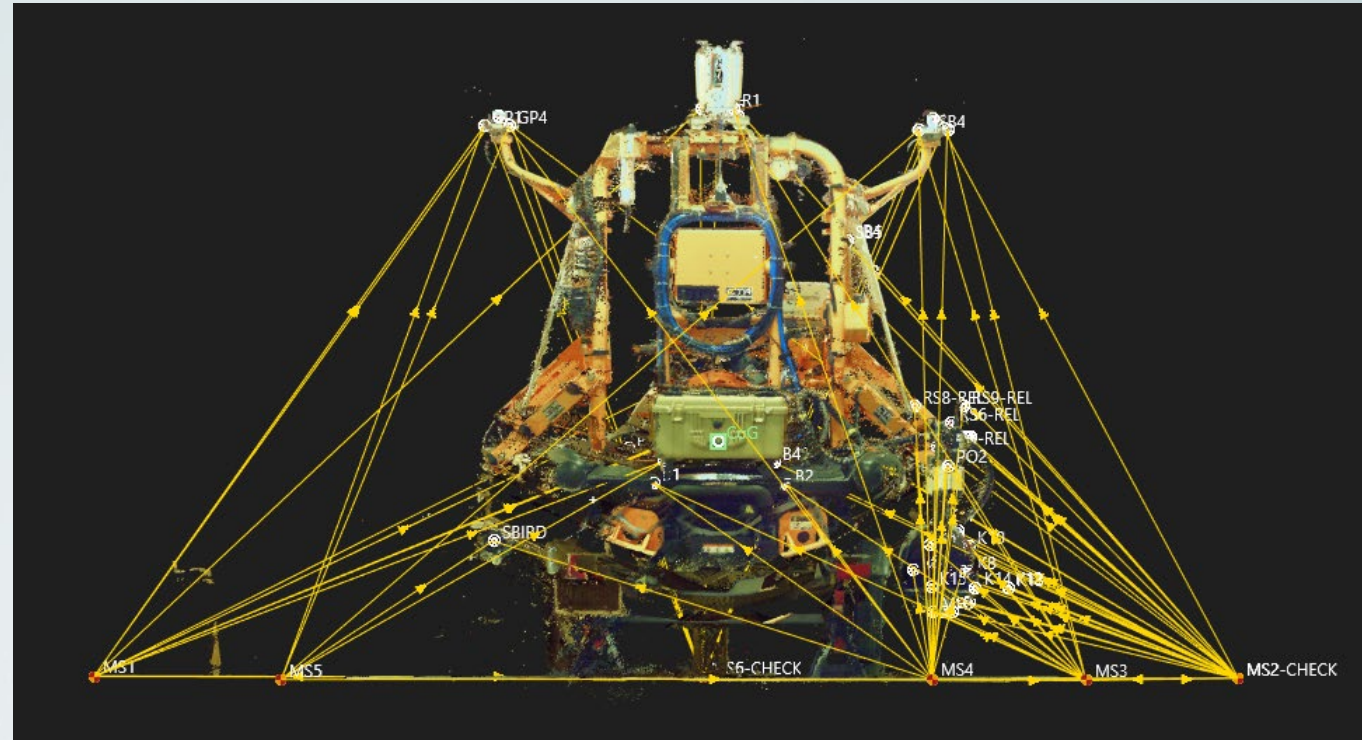


*Schéma d'un réseau micro-géodésique
Les observations de la multi station en boucle fermée*

4. Méthodologie : Estimation précise des bras de levier de la motomarine multi capteurs



Vue en plan



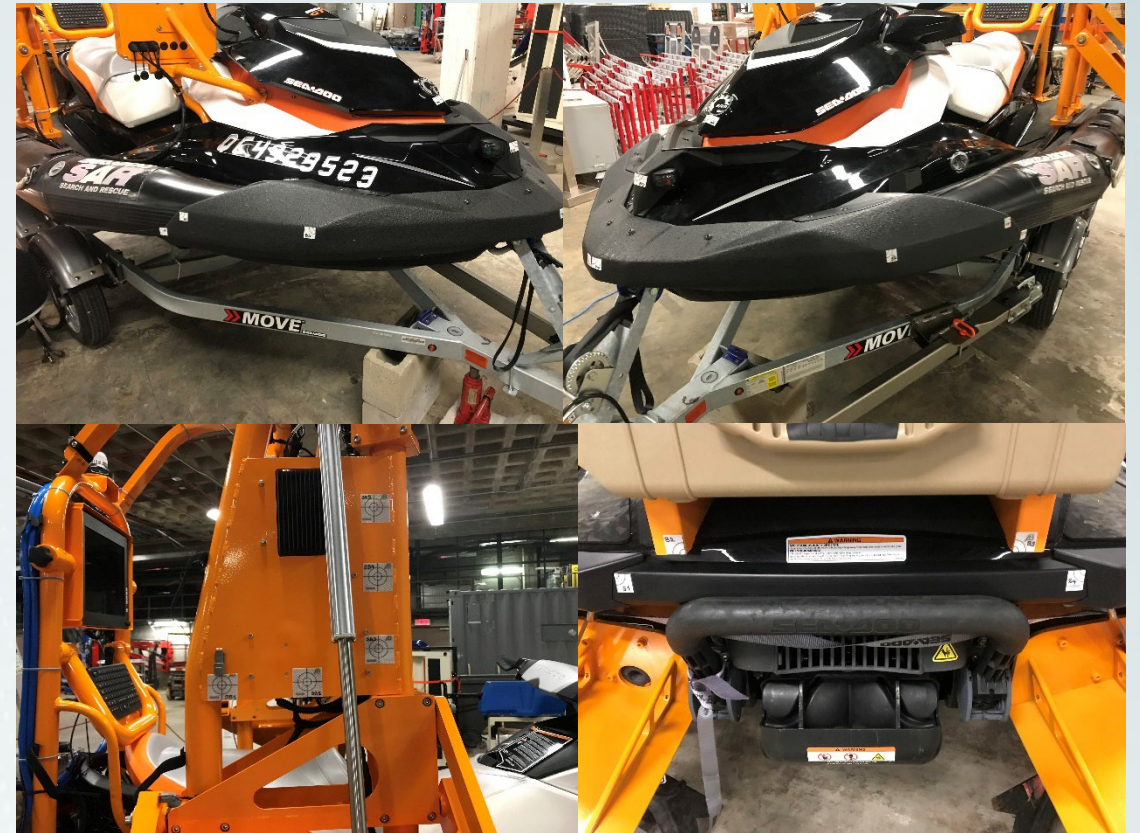
Vue arrière

Positions des stations et des cibles réfléchissantes sur la motomarine et sur les capteurs

4. Méthodologie : Estimation précise des bras de levier de la motomarine multi capteurs

Installation des cibles réfléchissantes

- Cette étape joue un rôle très important dans la transformation entre le repère de la MS60 et le repère de l'IMU de la motomarine.
- On doit utiliser un nombre optimal de cibles réfléchissantes pour pouvoir **modéliser les axes principaux** de la plateforme et les **points de référence des capteurs**.
- Ces observations permettent de calculer les bras de levier entre le centre de gravité de l'IMU et le point de référence des capteurs.

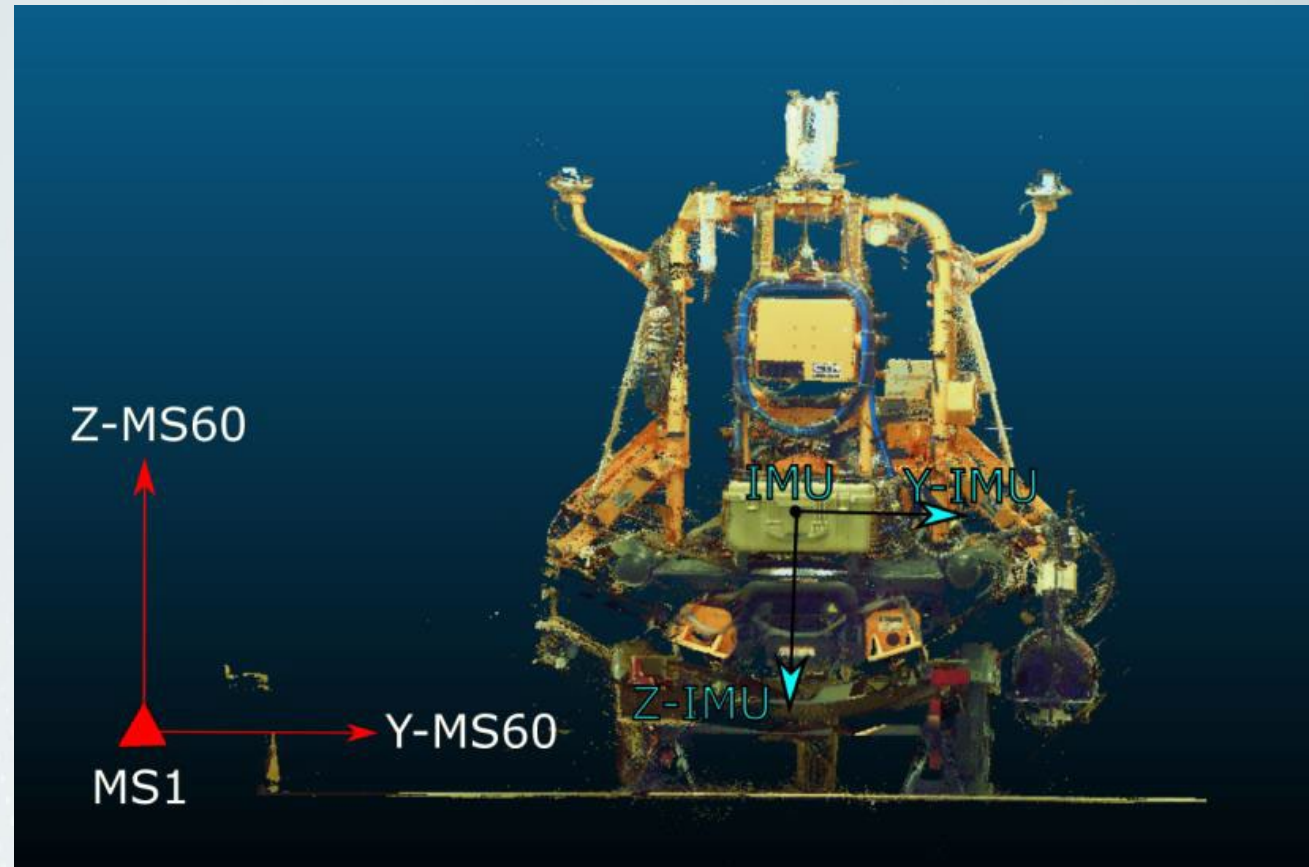


Emplacement des cibles réfléchissantes sur les axes principaux de la motomarine

4. Méthodologie : Estimation précise des bras de levier de la motomarine multi capteurs

Transformation du repère de la multi-station au repère de l'IMU

- Les coordonnées des points se trouvent d'abord dans le repère local de la multi station (ENU):
 - l'axe X est dirigé vers la droite (Est),
 - l'axe Y est dirigé vers l'avant (Nord) et
 - l'axe Z est dirigé vers le haut (Up - U).
- Les coordonnées de tous les points sont ensuite transformées dans le repère de référence de la motomarine (NED):
 - l'axe X est dirigé vers l'avant (Nord),
 - l'axe Y est dirigé vers la droite (Est) et
 - l'axe Z est dirigé vers le bas (Down - D).
- Cette transformation se fait par la méthode de compensation par moindres carrés en utilisant les contraintes de linéarité et d'orthogonalité des axes.



4. Résultats: Estimation précise des bras de levier des capteurs de la motomarine par rapport à l'IMU

IMU		X (Nord) [m]	Y (Est) [m]	Z (Down) [m]	Incertitude spatiale moyenne estimée [m]
Centre de phase d'antenne GNSS (Bâbord - Port)	ARP	1.0492	-0.9885	-1.2128	0.0023
	L1	1.0492	-0.9885	-1.2705	
Centre de phase d'antenne GNSS (Tribord - Starboard)	ARP	0.5789	0.9887	-1.2311	0.0022
	L1	0.5789	0.9887	-1.2888	
Antenna Baseline Vector (GSB – GP)		-0.4703	1.9772	-0.0183	0.0032
MX	Centre Acoustique	0.5312	1.0000	0.8007	0.0021
R2Sonic	Rx (Centre Acoustique de récepteur)	0.8759	1.0102	0.8616	0.0025
	Tx (Centre acoustique de projecteur)	1.0894	1.0102	0.8616	
RIEGL	Centre optique	0.6347	-0.0112	-1.6096	0.0023

Les bras de levier des capteurs installés sur la motomarine par rapport à l'IMU

ARP : Antenna Reference Point

L1 : GNSS Signal

5. Résultats: Estimation précise des bras de levier des capteurs de la motomarine par rapport à son CoG

Détermination du centre de gravité (CoG) de la motomarine

- Pour pouvoir calculer le vrai **pilonnement** (heave en anglais) d'une embarcation, on doit connaître son centre de gravité (CoG).
- Celui-ci étant différent du centre de gravité de l'IMU, il faut recalculer les bras de levier des capteurs par rapport à ce point.

	X (Est) [m]	Y (Nord) [m]	Z (Up) [m]
CoG	102.1726	101.1888	11.0863

Coordonnées du COG dans le repère de la MS60



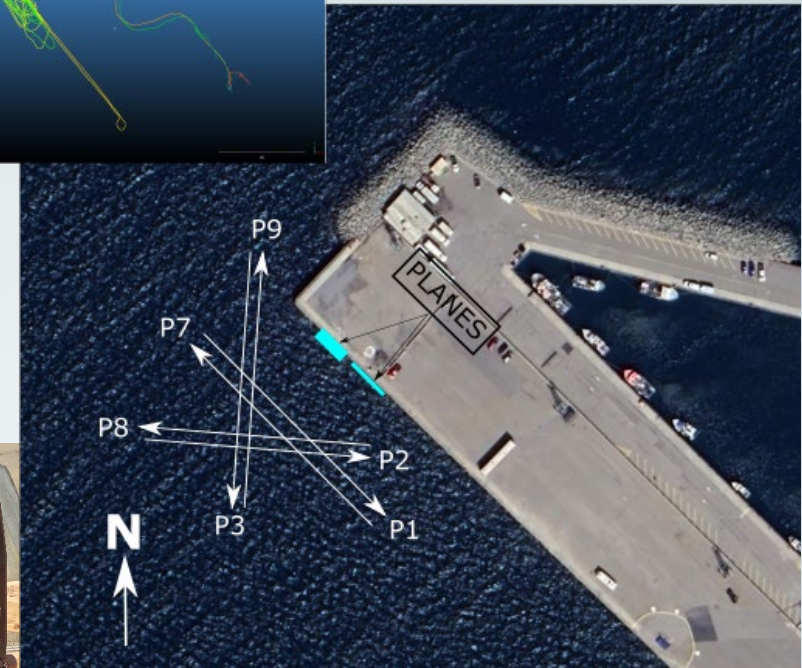
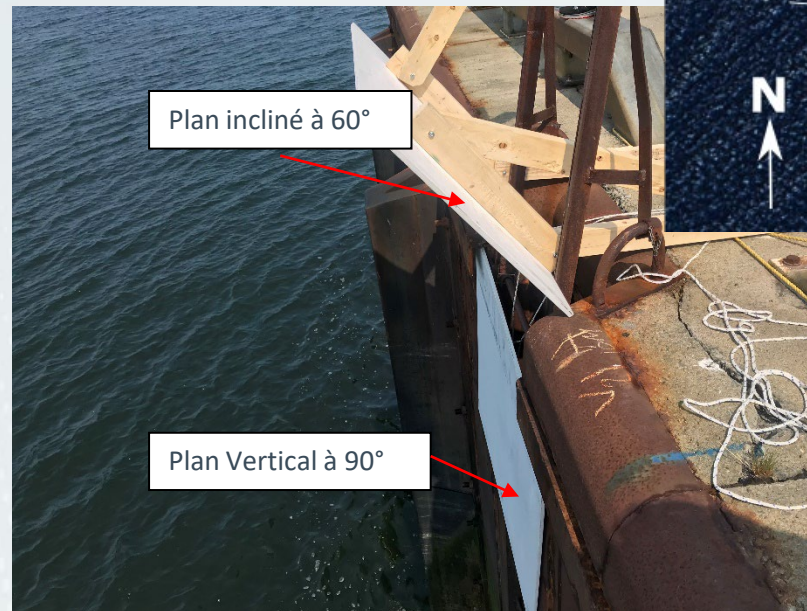
Les points S1 et S4 sur le pare-chocs

5. Méthodologie : Estimation des angles de visée IMU-LiDAR de la motomarine

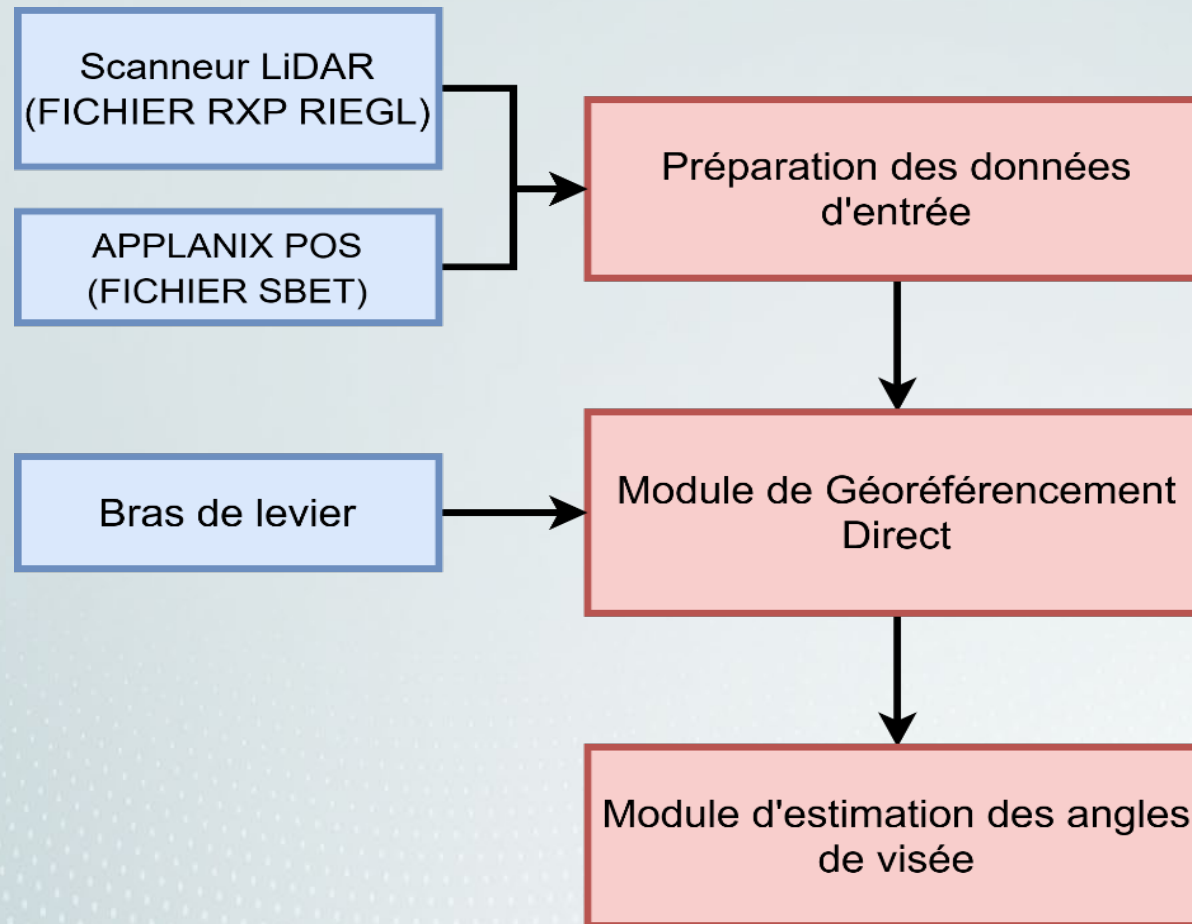
Estimation des angles de visée IMU-LiDAR

- Méthode développée à l'Université Laval par notre équipe (Shahraji et Larouche, 2019).
- Méthode simple, rapide et rigoureuse pour estimer le désalignement angulaire du scanneur LiDAR.
- Ajustement dynamique in situ utilisant des cibles planaires préfabriquées.
- Approche mathématique basée sur les équations de géo-référencement direct et sur une méthode itérative par moindres carrés.

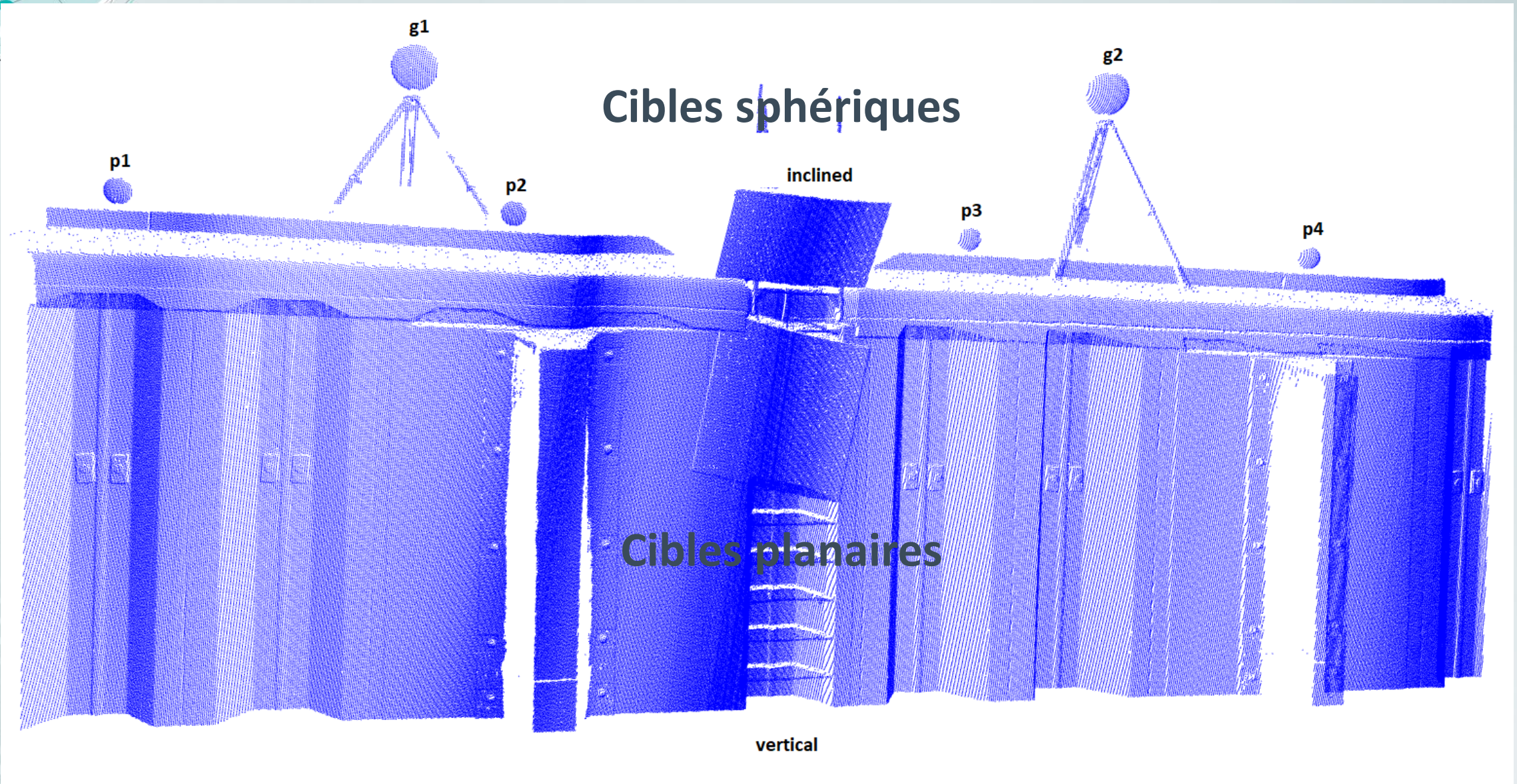
TRAJECTORY



5. Méthodologie : Estimation des angles de visée IMU-LiDAR de la motomarine



5. Méthodologie : Estimation des angles de visée IMU-LiDAR de la motomarine





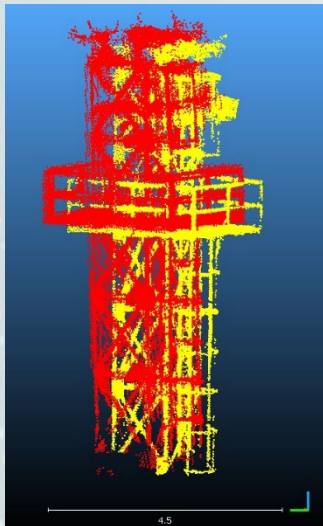
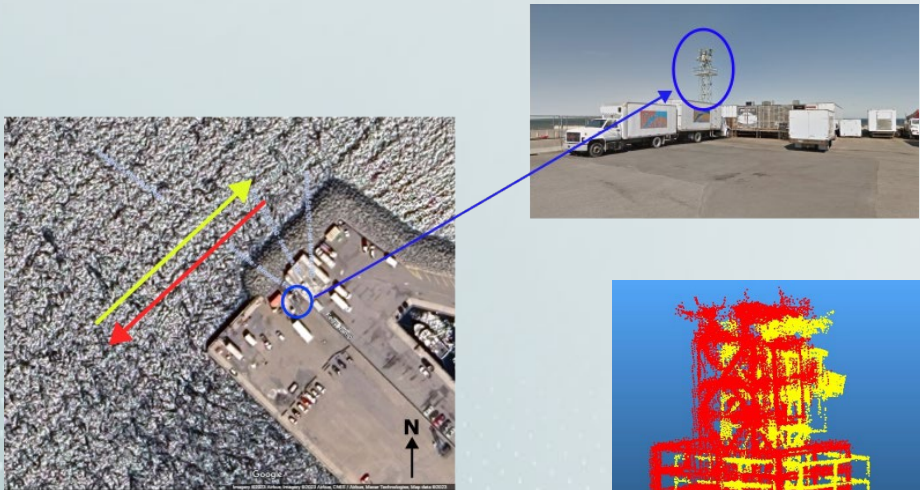
5. Résultats: Estimation précise des angles de visée du scanner LiDAR de la motomarine par rapport à l'IMU

Angles de visée estimés et les incertitudes correspondantes

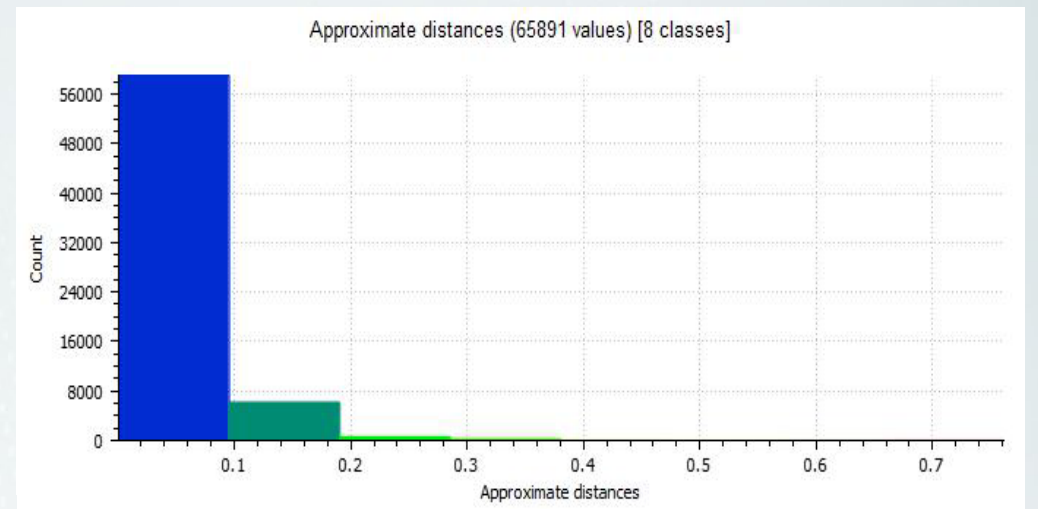
Roll [α (°)]	σ_{α} (°)	Pitch [β (°)]	σ_{β} (°)	Yaw [γ (°)]	σ_{γ} (°)
-0.199	0.0054	-0.929	0.0181	0.307	0.0048

5. Résultats: Estimation précise des bras de levier et des capteurs et des angles de visée du scanneur LiDAR du VTT par rapport à l'IMU

Nuages de points avant et après géoréférencement à l'aide de nouvelles valeurs de calibrage



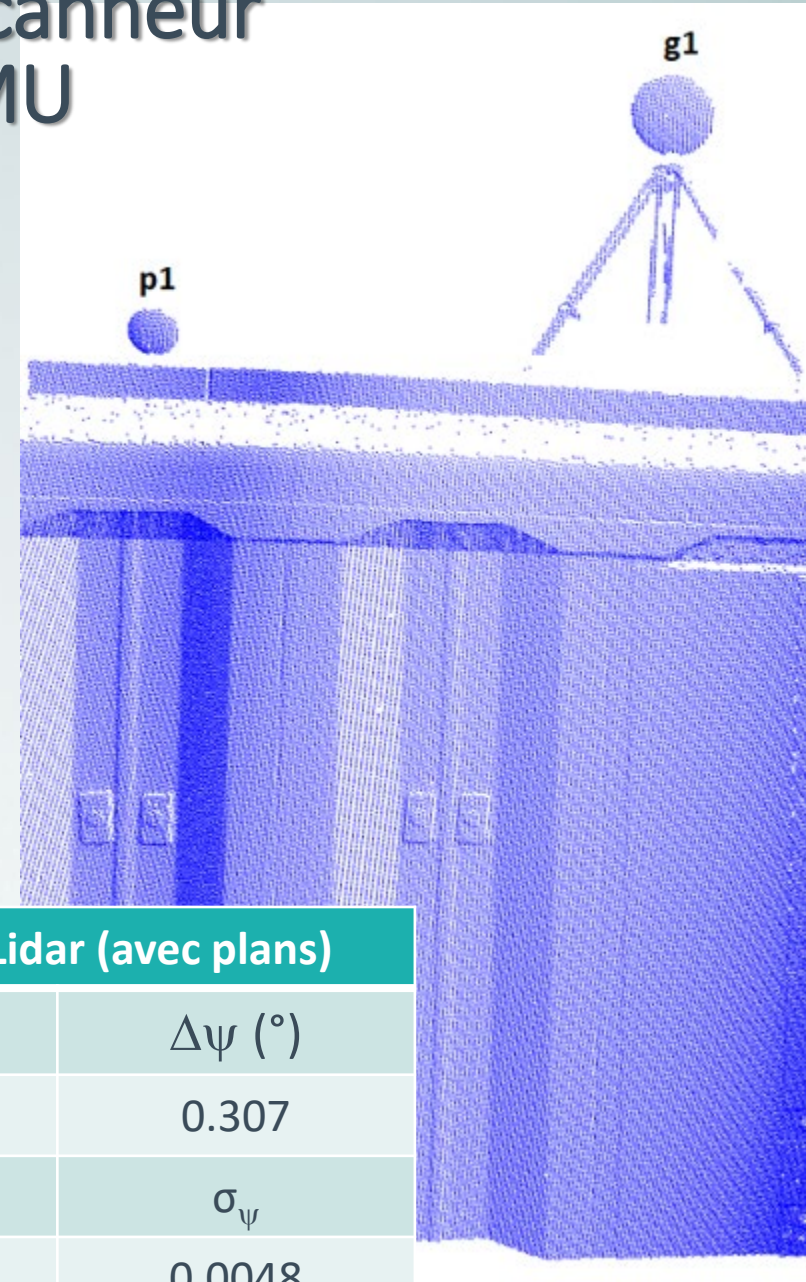
	Avant	Après
Distance Moyenne (m)	0.14	0.04
Sigma (m)	0.08	0.05





5. Estimation précise des bras de levier et des capteurs et des angles de visée du scanneur LiDAR du VTT par rapport à l'IMU

- Utilisation des **cibles sphériques** pour estimation les bras de leviers et les angles de visée du scanneur Riegl VZ-2000i sur la motomarine
- Détermination de tous les paramètres simultanément
- Résultats préliminaires obtenus
- Adapter la méthode à une approche par moindres carrés (estimation des incertitudes)



Bras de levier entre INS et Lidar (avec sphères)

Δx (m)	Δy (m)	Δz (m)
-0.1669	-0.0014	-1.6831
-0.2087	-0.0209	-1.6979

Angle de visée entre IMU et Lidar (avec sphères)

$\Delta \phi$ (°)	$\Delta \theta$ (°)	$\Delta \psi$ (°)
-0.1980	-0.9894	0.2968

Angle de visée entre IMU et Lidar (avec plans)

$\Delta \phi$ (°)	$\Delta \theta$ (°)	$\Delta \psi$ (°)
-0.199	-0.929	0.307
σ_ϕ	σ_θ	σ_ψ
0.0054	0.0181	0.0048



6. Conclusions

- Méthodologie et résultats des mesures de bras de levier des capteurs installés sur la **motomarine** adaptée aux besoins du projet FORSCE
 - Estimation des bras de levier par rapport au centre de l'IMU.
 - Estimation des bras de levier par rapport au centre de gravité de la motomarine (COG).
- Méthodologie et résultats des mesures des angles de visée du scanner LiDAR installés sur le **motomarine**.
- Technique de mesure s'inspire des méthodes classiques de la micro-géodésie et de la compensation itérative par moindres carrés.



8. Bibliographie

Bouchard, J. (2018). Des équipements de pointe de près de 8 M\$ pour étudier les zones côtières en toute saison. Consulté à l'adresse <https://www.uqar.ca/nouvelles/uqar-info/2723-des-equipements-de-pointe-de-pres-de-8-m-pour-etudier-les-zones-cotieres-en-toute-saison>

Larouche, C., Shahraji, M. H., et Chougrad, M. (2021a). Estimation précise des bras de levier des capteurs installés sur la Motomarine 1. Rapport technique produit dans le cadre du projet FORSCE (Flotte opérationnelle de recherche en sciences côtières et environnementales), mai 2021, 27 p.

Larouche, C., Shahraji, M. H., et Chougrad, M. (2021b). Estimation précise des bras de levier des capteurs installés sur la Motomarine 2. Rapport technique produit dans le cadre du projet FORSCE (Flotte opérationnelle de recherche en sciences côtières et environnementales), mai 2021, 27 p.

Larouche, C., Shahraji, M. H., et McManus, J. (2022). Estimation précise des angles de visée entre la centrale inertielle d'Applanix et le LiDAR VZ-2000i. Rapport technique produit dans le cadre du projet FORSCE (Flotte opérationnelle de recherche en sciences côtières et environnementales), octobre 2022, 16 p.

Shahraji, M. H., Larouche, C., Cocard, M. (2020). Analysis of Systematic Errors of Mobile LiDAR Systems: A Simulation Approach, XXIV ISPRS Congress, 2020, Nice, France. [ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences](#), July 2020.



9. Remerciements à l'équipe de projet U. Laval

Jordan McManus,

- Étudiant à la maîtrise,
- Professionnel de recherche 2e cycle,
- Département des sciences géomatiques, Université Laval

Bruno Dionne,

- Analyste de l'informatique et spécialiste en intégration de systèmes embarqués,
- Professionnel de recherche, Cat. 1,
- VREX-BPEI, Université Laval



Merci !

Christian Larouche, Prof. agrégé

Mohsen Hassanzadeh Shahraji, Stagiaire postdoctoral



**UNIVERSITÉ
LAVAL**



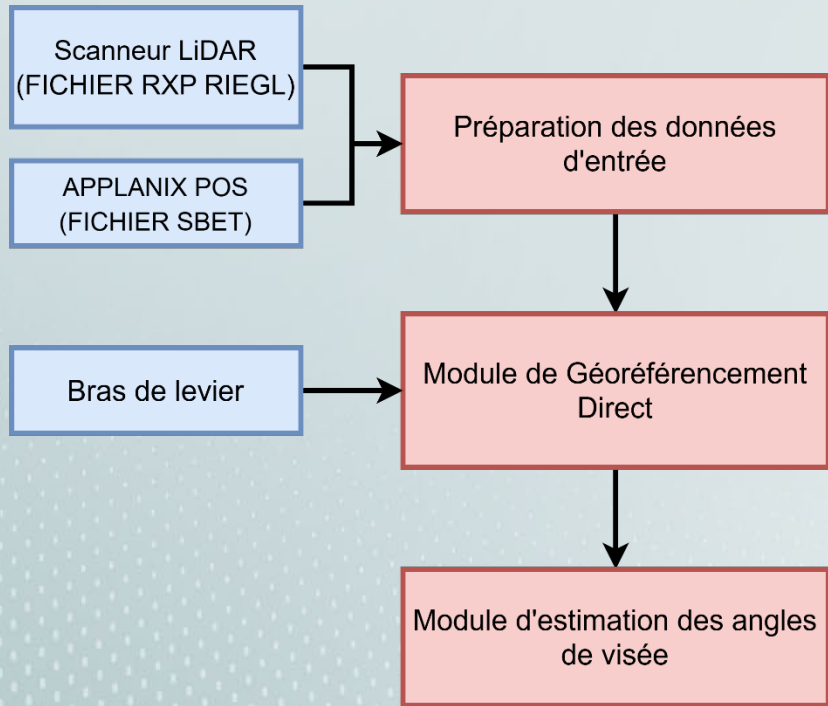
CENTRE DE RECHERCHE

EN DONNÉES ET INTELLIGENCE
GÉOSPATIALES

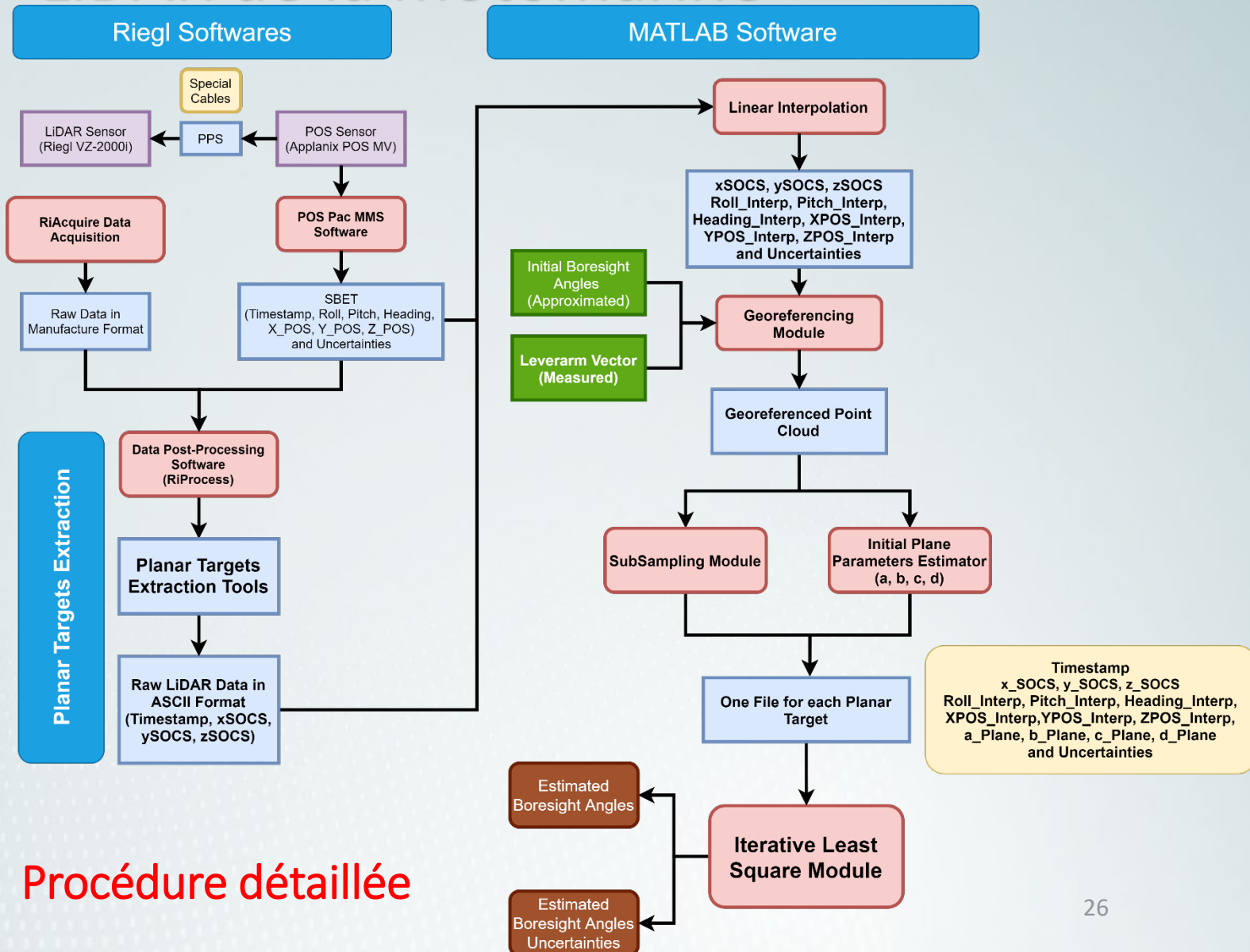


**Laboratoire de dynamique
et de gestion intégrée des
zones côtières | UQAR**

4. Méthodologie : Estimation des angles de visée IMU-LiDAR de la motomarine



Procédure sommaire



Procédure détaillée

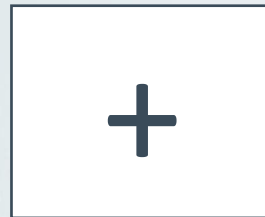
5. Résultats: Estimation précise des bras de levier des capteurs de la motomarine par rapport à son CoG

COG		X (Nord) [m]	Y (Est) [m]	Z (Down) [m]	Incertitude spatiale moyenne estimée [m]
Centre de phase d'antenne GNSS (Bâbord - Port)	ARP	0.2222	-0.9887	-1.3328	0.0023
	L1	0.2222	-0.9887	-1.3905	
Centre de phase (L1) d'antenne GNSS (Tribord - Starboard)	ARP	-0.2481	0.9884	-1.3511	0.0022
	L1	-0.2481	0.9884	-1.4088	
Antenna Baseline Vector		-0.4703	1.9771	-0.0183	0.0032
MX	Centre Acoustique	-0.2958	0.9998	0.6808	0.0021
R2Sonic	Rx (Centre Acoustique de récepteur)	0.0489	1.0100	0.7477	0.0025
	Tx (Centre acoustique de projecteur)	0.2624	1.0100	0.7477	
RIEGL	Centre Optique	-0.1966	-0.0122	-1.6964	0.0023

Les bras de levier des capteurs installés sur la motomarine par rapport au CoG

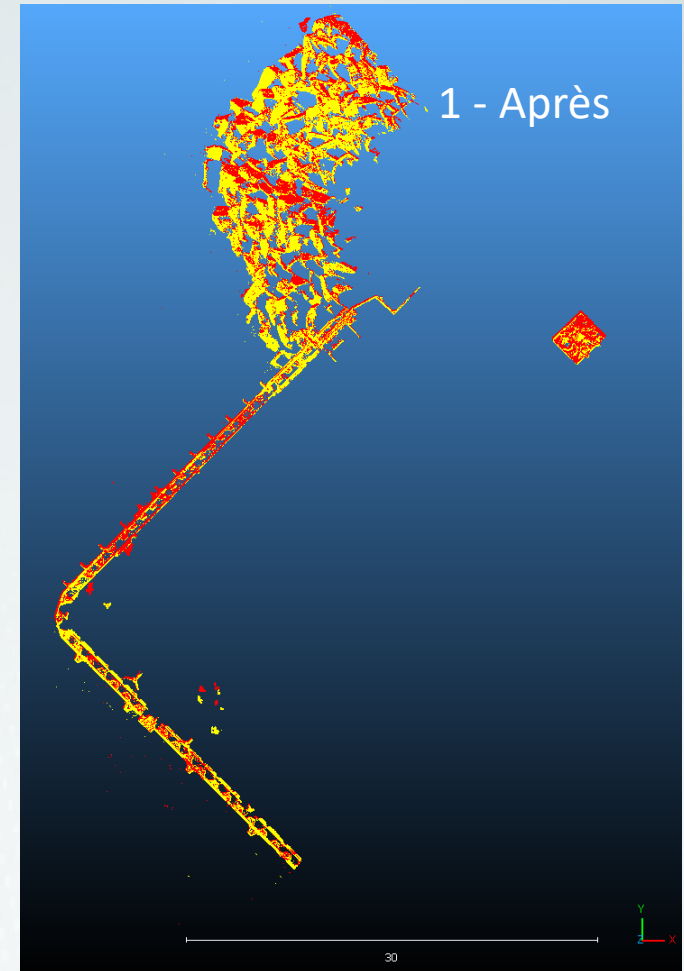
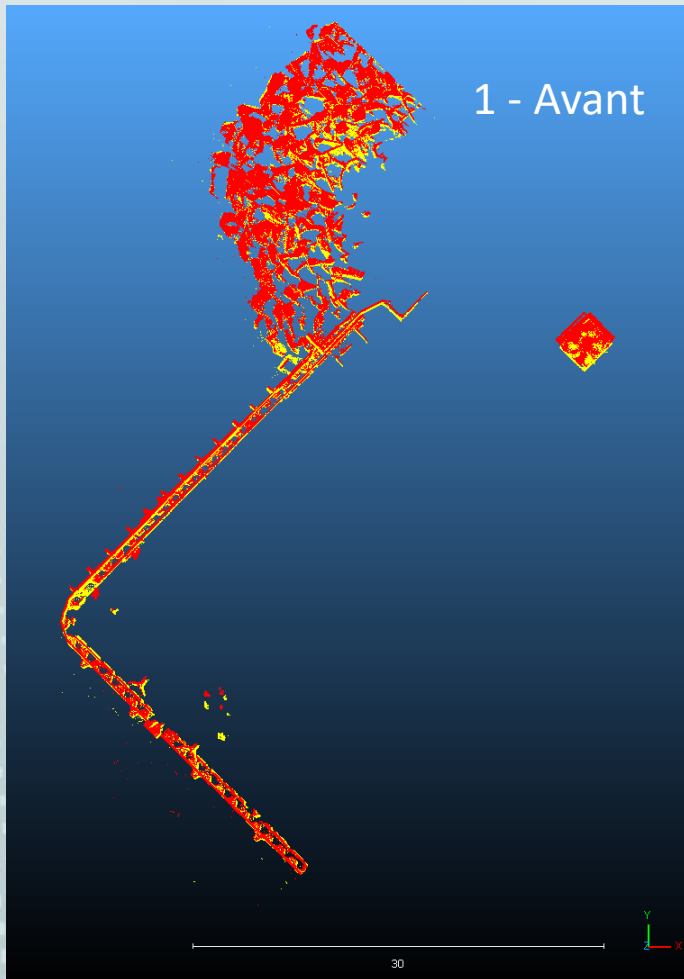
7. Travaux à venir (suite)

- Remplacer le scanneur Riegl VZ-2000i par un **Velodyne VLP 16**
 - Plus résistant à l'eau (IP67)
 - Moins dispendieux
 - Plus léger
 - Driver ROS (Robot Operating System) disponible
 - Peut-être utilisé pour améliorer la qualité de la trajectoire si perte de signal GNSS



5. Résultats: Estimation précise des bras de levier et des capteurs et des angles de visée du scanneur LiDAR du VTT par rapport à l'IMU

Nuages de points avant et après géoréférencement à l'aide de nouvelles valeurs de calibrage



Quai de la Marina de Rimouski
1) Vue en plan