



UNIVERSITÉ  
**LAVAL**

Faculté de foresterie, de géographie  
et de géomatique



**CENTRE DE RECHERCHE**

EN DONNÉES ET INTELLIGENCE  
GÉOSPATIALES

**Jordan McManus,**  
Étudiant à la maîtrise de recherche  
Département des sciences géomatiques

Estimation des six paramètres d'installation d'un système  
LiDAR mobile sur plateformes hydrographiques et correction  
de la trajectoire en cas de perte de signal GNSS

**Christian Larouche,** Directeur de recherche

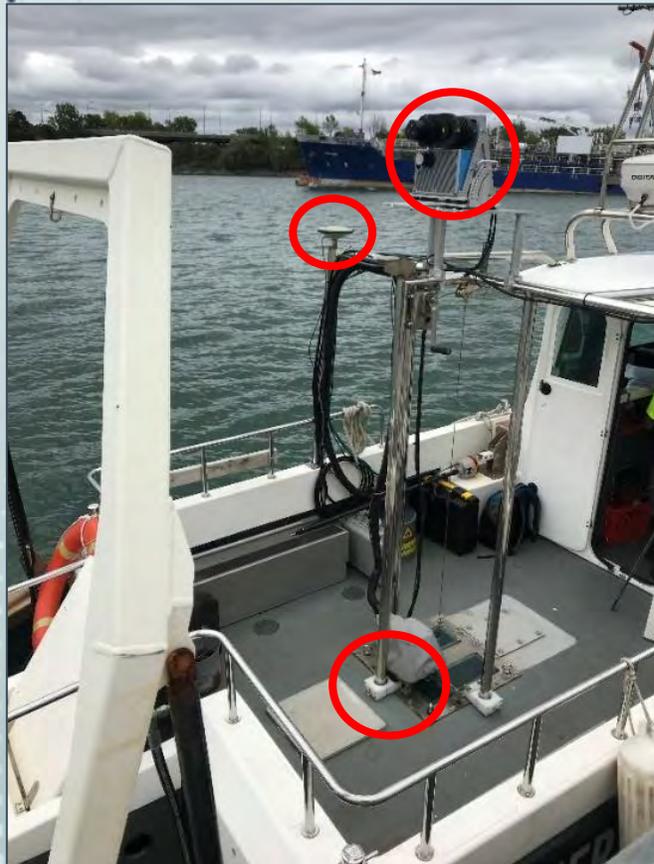




# Déroulement de la présentation



1. Introduction
2. Scanneur 3D VLP-16
  - Format des données
  - Modèle de géoréférencement
  - Génération de données synthétiques
3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D
  - Avec données synthétiques
  - Avec données réelles
4. Correction de la trajectoire erronée
  - Avec données synthétiques
  - Avec données réelles
5. Conclusions
6. Recommandations



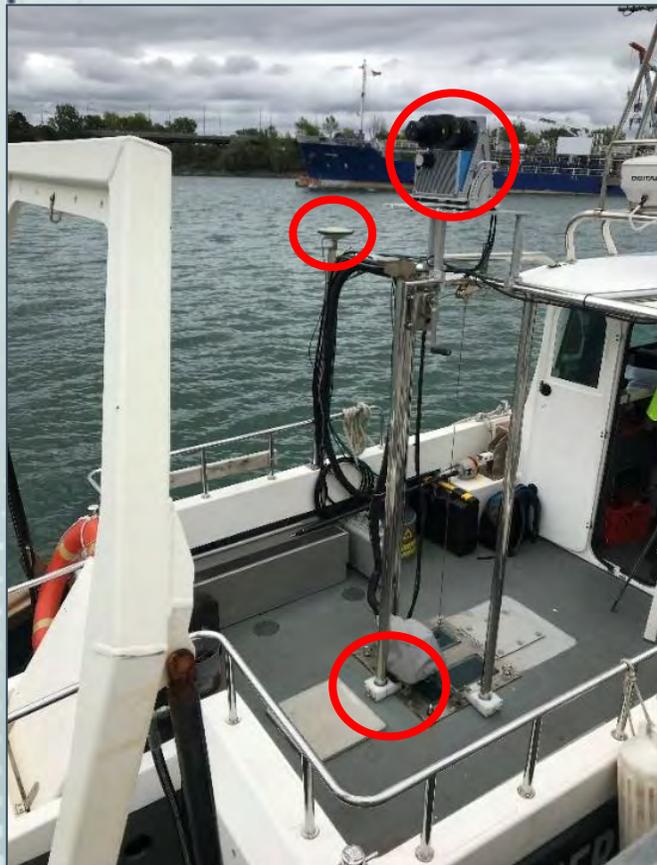


# 1. Introduction

## Contexte du projet AmphibiAR



- Surveillance des infrastructures portuaires
- Nouvelle combinaison de capteurs (LiDAR 3D)



Scanneur LiDAR 2D



Scanneur LiDAR 3D





# 1. Introduction

## Problèmes

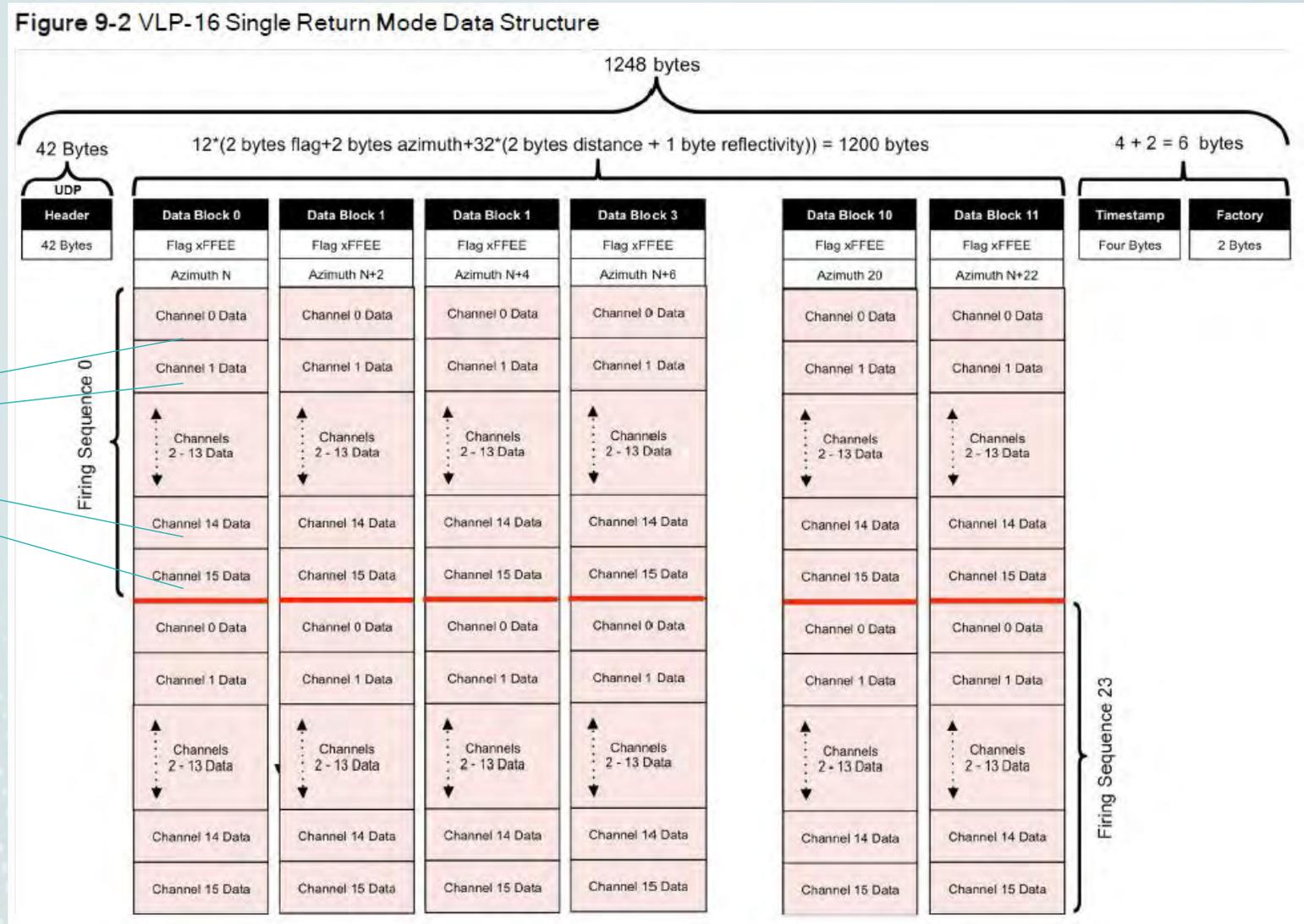
- Estimation simultanée des six paramètres d'installation d'un LiDAR
  - Bras de levier: 3 paramètres de position
  - Boresight (angles de visée): 3 paramètres d'orientation
  - Passage cibles planaires<sup>1</sup> aux cibles sphériques
  - Passage d'un scanneur 2D haut de gamme vers un scanneur 3D à bas coût
- Correction de trajectoire en cas de perte de signal GNSS avec un scanneur 3D
  - Développement à partir de données synthétiques
  - Test avec données réelles

<sup>1</sup> Mohsen Hassanzadeh Shahraji Ph.D., Development of a Novel Data Acquisition and Processing Methodology Applied to the Boresight Alignment of Marine Mobile LiDAR Systems

# 2. Scanneur 3D VLP-16

## Format des données

Format de données brutes des paquets LiDAR VLP-16



Le calibrage est impossible sans les données brutes !!!

# 2. Scanneur 3D VLP-16

## Modèle de géoréférencement



Position (GNSS)

Matrice de l'orientation (INS)

$$\begin{pmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(h) \cos(p) & \cos(h) \sin(p) \sin(r) - \sin(h) \cos(r) & \sin(h) \sin(r) + \cos(h) \sin(p) \cos(r) \\ \sin(h) \cos(p) & \sin(h) \sin(p) \sin(r) + \cos(h) \cos(r) & \sin(h) \sin(p) \cos(r) - \cos(h) \sin(r) \\ -\sin(p) & \cos(p) \sin(r) & \cos(p) \cos(r) \end{pmatrix}$$

Matrice des angles de visée (boresight)

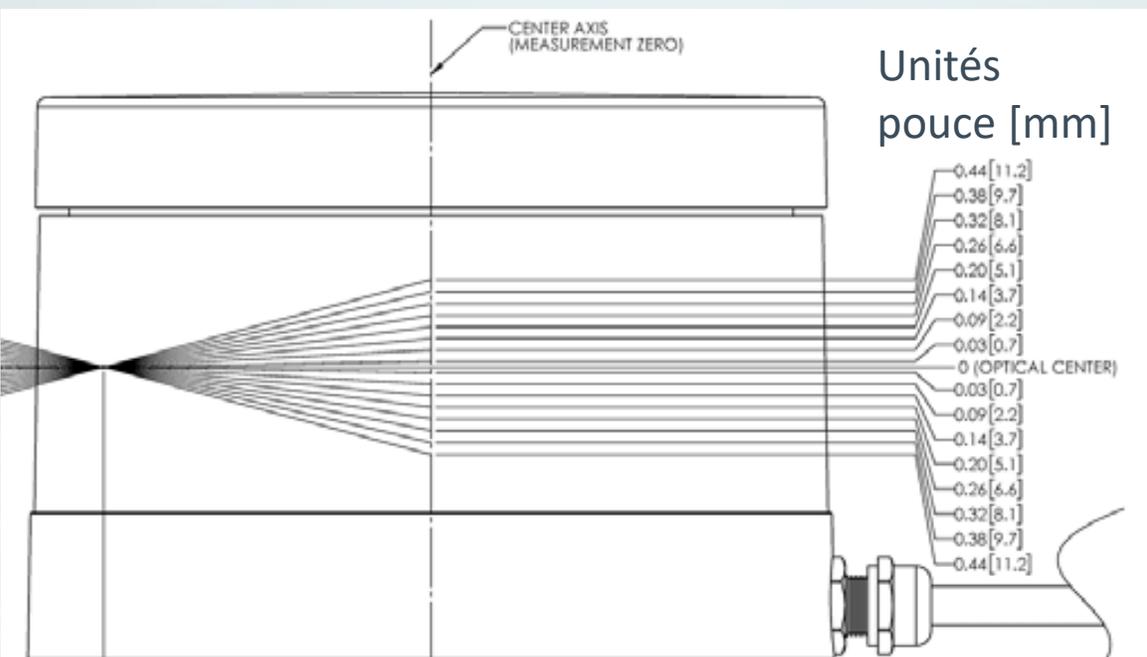
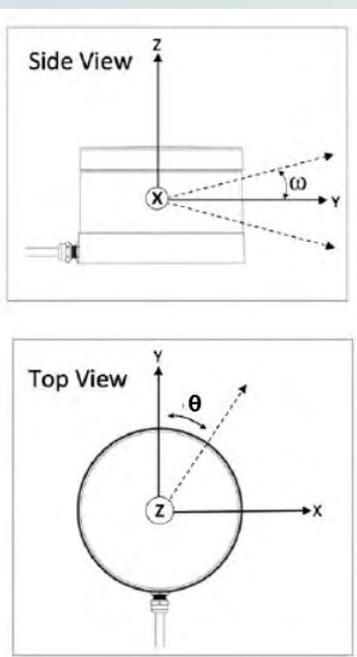
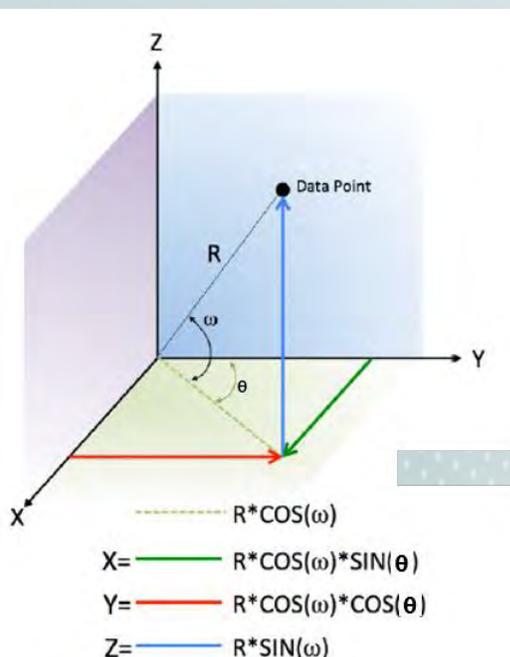
$$\begin{pmatrix} \cos(\beta) \cos(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) - \cos(\alpha) \sin(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \sin(\beta) \cos(\gamma) \\ \cos(\beta) \sin(\gamma) & \sin(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) & \cos(\alpha) \sin(\beta) \sin(\gamma) - \sin(\alpha) \cos(\gamma) \\ -\sin(\beta) & \sin(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{pmatrix}$$

Bras de levier

$$\rho \cdot \begin{pmatrix} \sin(\theta) \cos(\omega) \\ \cos(\theta) \cos(\omega) \\ \sin(\omega) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{pmatrix}$$

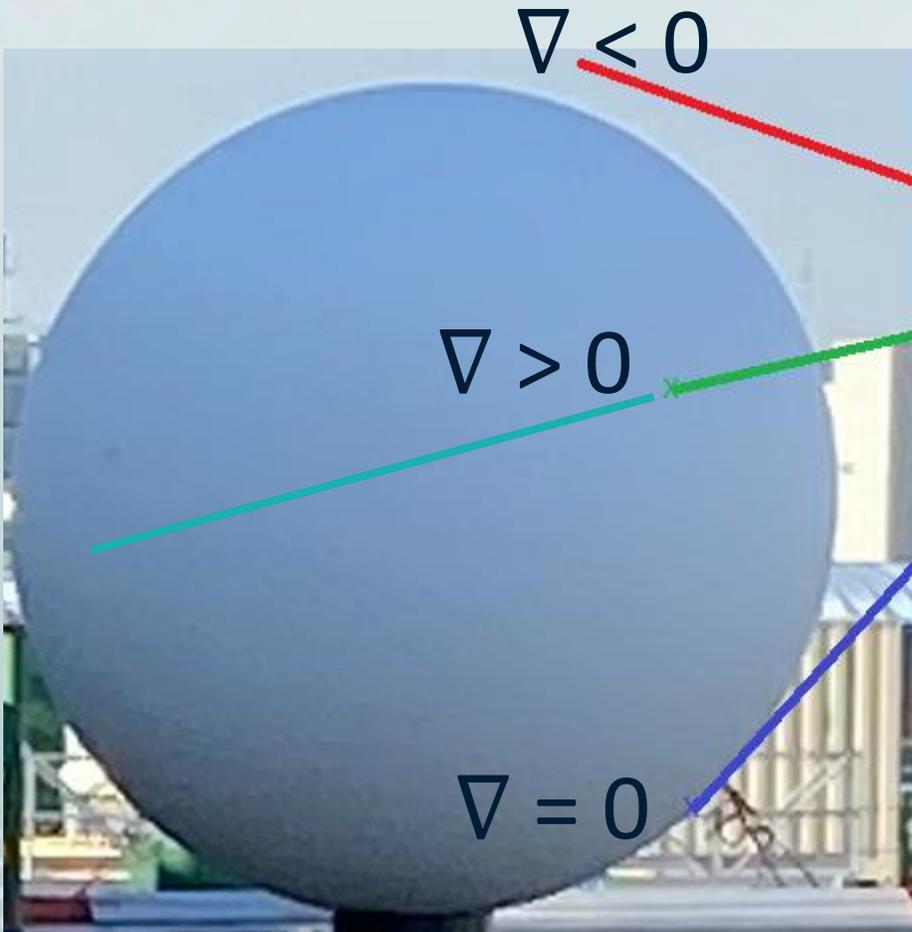
VLP-16

$\rho$  : portée  
 $\theta$  : angle horizontal  
 $\omega$  : angle vertical



## 2. Scanneur 3D VLP-16

### Génération de données synthétiques



$\mathbf{o}$  : La position du centre optique  
 $\mathbf{c}$  : La position du centre de la sphère  
 $r$  : Le rayon de la sphère  
 $\hat{\mathbf{u}}$  : vecteur de tir (unitaire)  
 $d$  : la distance recherchée

$$\nabla = [\hat{\mathbf{u}} \cdot (\mathbf{o} - \mathbf{c})]^2 - (\|\mathbf{o} - \mathbf{c}\|^2 - r^2)$$
$$d = -[\hat{\mathbf{u}} \cdot (\mathbf{o} - \mathbf{c})] \pm \sqrt{\nabla}$$



## 2. Scanneur 3D VLP-16

### Génération de données synthétiques

Équation vectorielle d'une ligne

$$\mathbf{p} = \mathbf{o} + \hat{\mathbf{u}}d$$

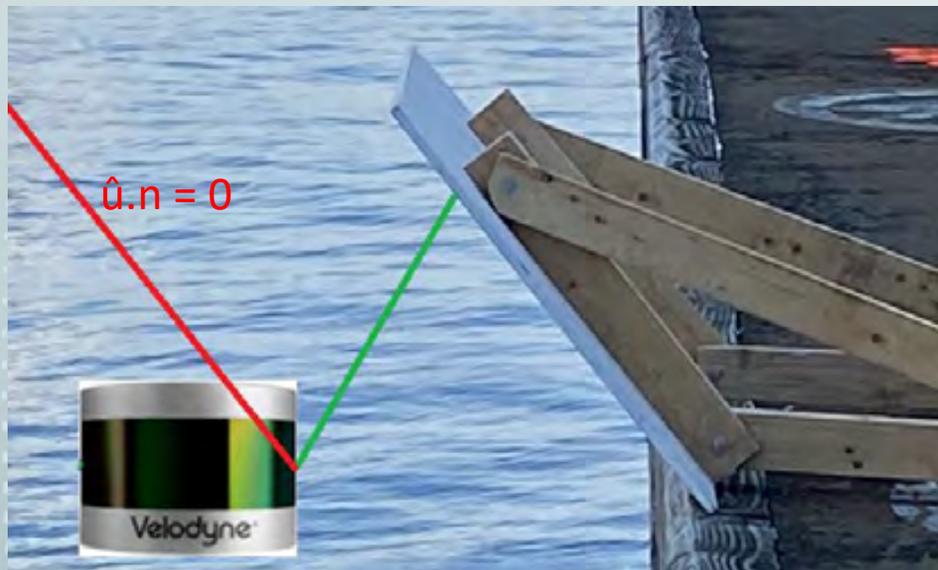
Équation vectorielle d'un plan

$$(\mathbf{p} - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} = 0$$

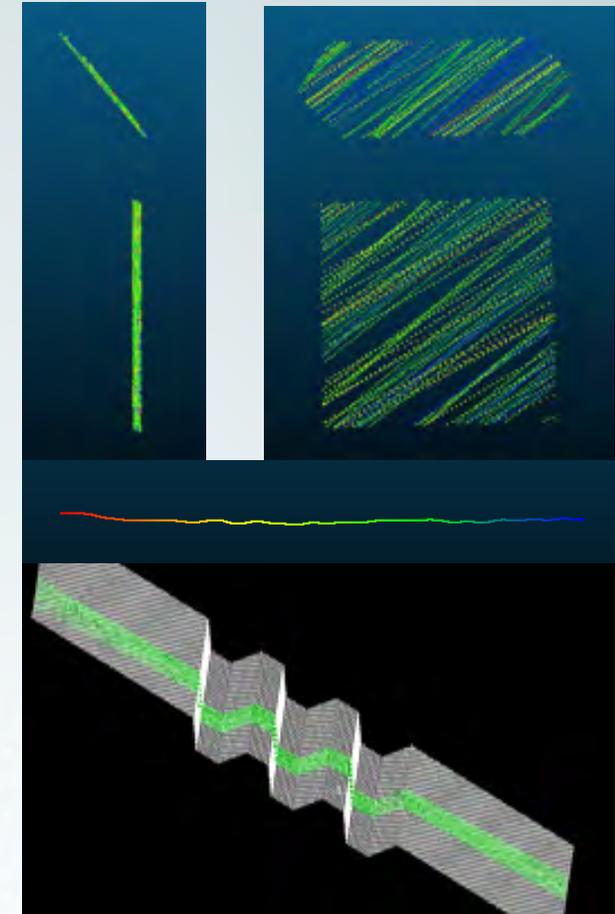
$$\hat{\mathbf{u}} = C_b^w C_s^b \hat{\mathbf{u}}^b$$

Orientation (INS)	Angles de visée (Boresight)
-------------------	-----------------------------

$$d = \frac{(\mathbf{p}_0 - \mathbf{o}) \cdot \mathbf{n}}{\hat{\mathbf{u}} \cdot \mathbf{n}}$$



- $\mathbf{o}$  : La position du centre optique
- $\mathbf{p}$  : L'intersection ligne-plan
- $\mathbf{p}_0$  : Un point sur le plan
- $\mathbf{n}$  : La normale (unitaire) au plan
- $\hat{\mathbf{u}}$  : vecteur de tir (unitaire)
- $d$  : la distance recherchée





# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Utilisation de cibles sphériques au lieu de cibles planaires

Les cibles planaires

- Difficiles à installer
- Impossible de connaitre les paramètres de plan
- Oscille avec le vent
- Suppose aucune erreur de bras de levier
- Adaptation du calcul matriciel vers un scanneur 3D

Les cibles sphériques:

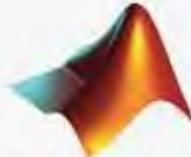
- Facile à installer
- Facile à positionner
- Estime bras de levier et boresight
- Application à un LiDAR 3D



# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

Utilisation de cibles sphériques au lieu de cibles planaires

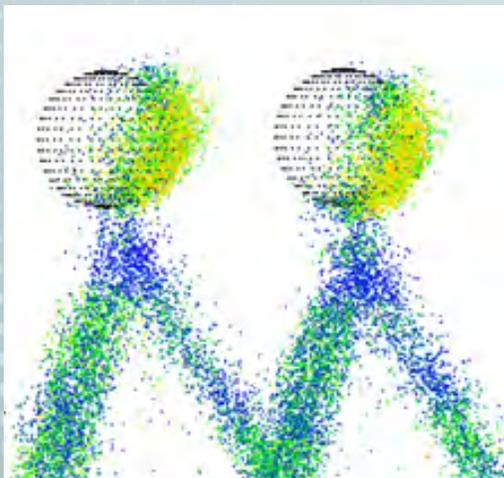


fminsearch   
MATLAB

$$\operatorname{argmin}_b \sum_i \left| \left| \mathbf{x}_i(b) - \mathbf{c} \right| - r \right|$$

A blue arrow points from the  $\mathbf{x}_i(b)$  term in the equation to the MATLAB logo.

Sphère 1 Sphère 2



Connus:

- $\mathbf{c}$  = centre de la sphère
- $r$  = rayon de la sphère

Observations:

- $\mathbf{x}_i$  = point géoréférencé

Inconnus ( $b$ )

- Angles de visée (3)
- Bras de levier (3)

Rayon = 19 cm	Latitude (DD)	Longitude (DD)	Hauteur ellipsoïdale (m)
Sphère 1	46.8187276	71.20054531	-20.904
Sphère 2	46.81876101	71.20029096	-20.891



# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données synthétiques

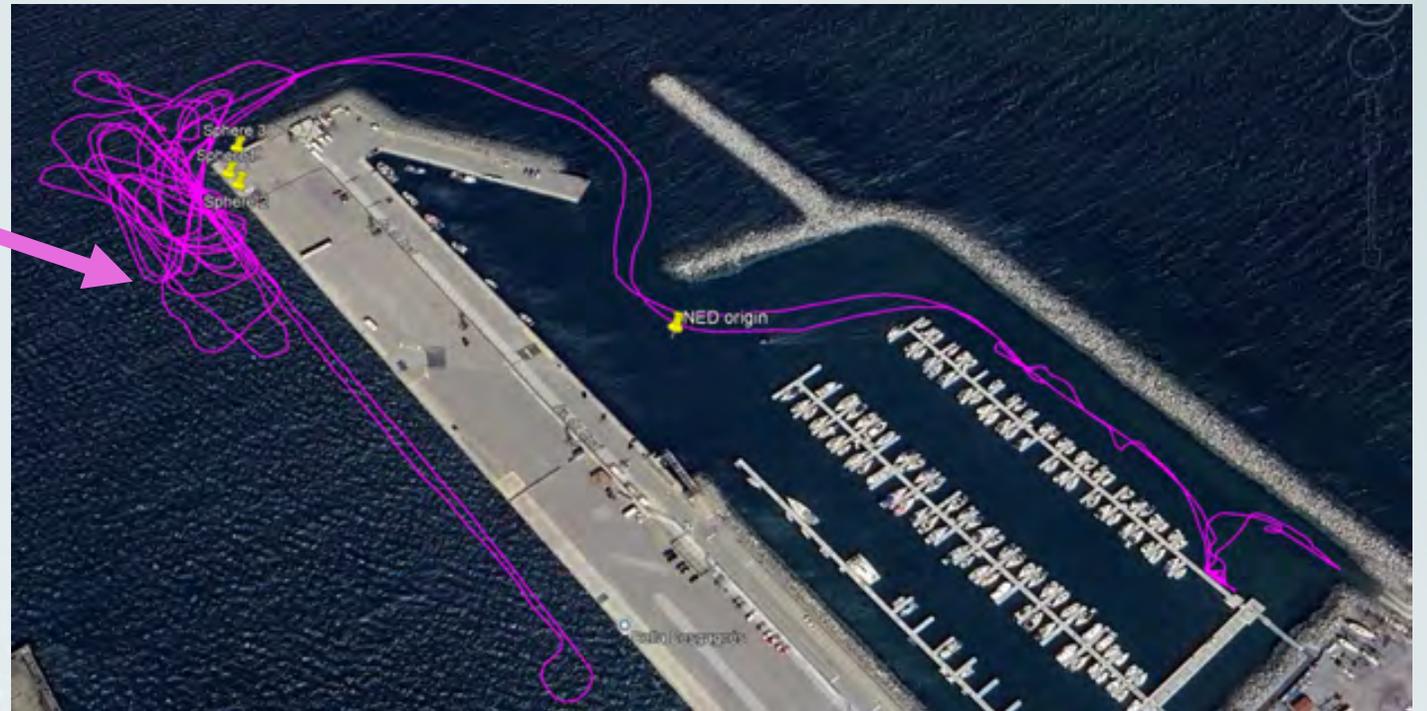
Génération de données à partir d'une trajectoire d'un levé existant.

### Angles de visée exacts

Roll	Pitch	Heading
Degrés	Degrés	Degrés
179.5	-44.9	1.2

### Bras de levier exact

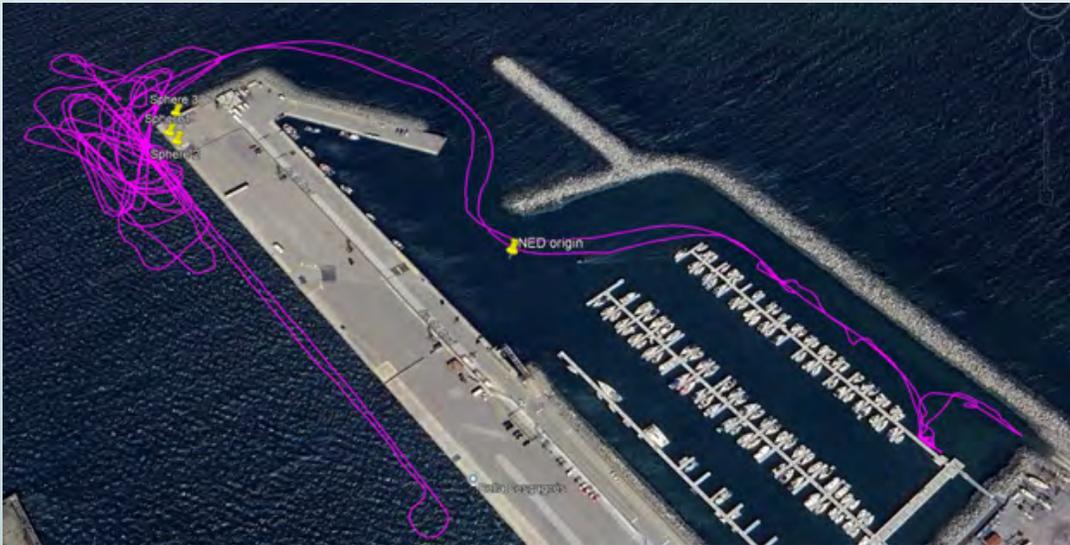
Lever Arm X	Lever Arm Y	Lever Arm Z
(m)	(m)	(m)
1.5	-1.24	-1.36



	Lat	Lon	h (m)	N (m)	H (m)
NED origin	48° 28' 48.297442" N	68° 30' 51.474039" W	-27.033	-25.573	-1.460
Sphere 1	48° 28' 50.89" N	68° 31' 3.34" W	-19.756	-25.584	5.828
Sphere 2	48° 28' 50.64" N	68° 31' 2.95" W	-19.486	-25.584	6.098

# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données synthétiques

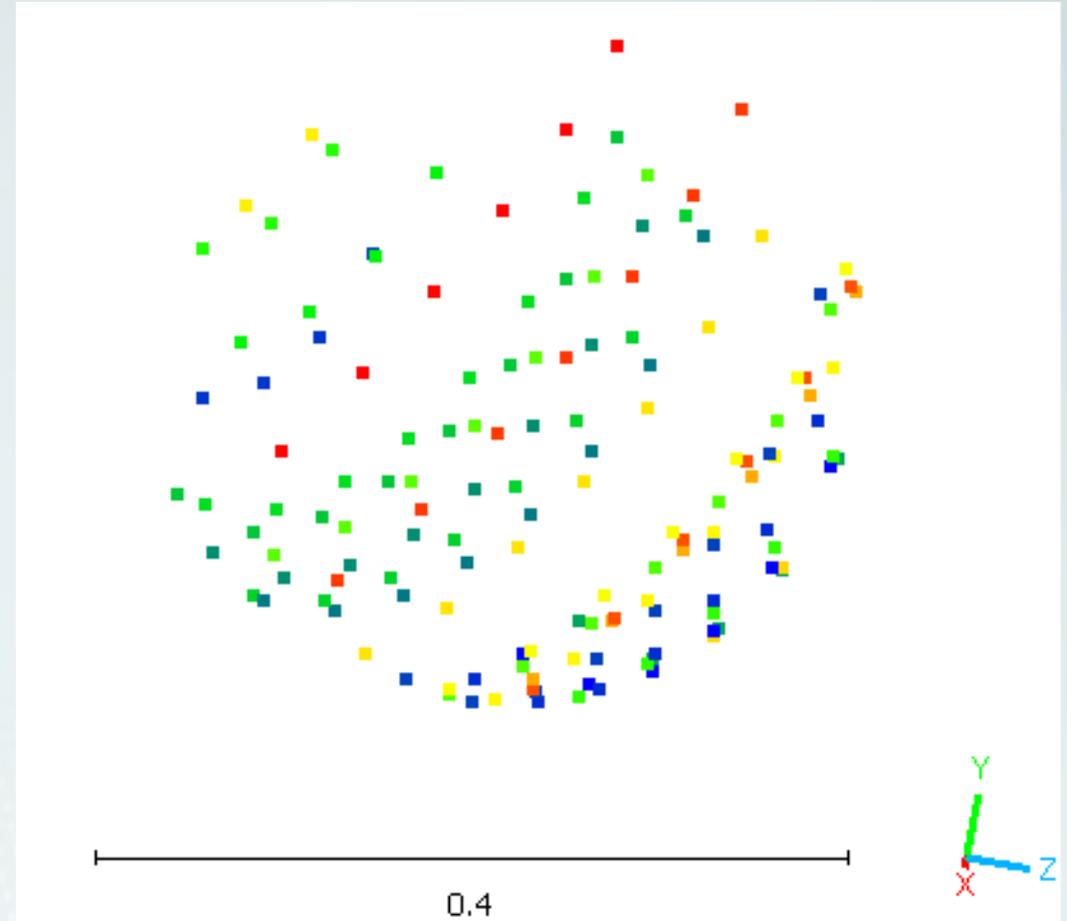


Angles de visée exacts

Roll	Pitch	Heading
Degrés	Degrés	Degrés
179.5	-44.9	1.2

Bras de levier exact

Lever Arm X	Lever Arm Y	Lever Arm Z
(m)	(m)	(m)
1.5	-1.24	-1.36





# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données synthétiques

### Angles de visée exacts

Roll	Pitch	Heading
Degrés	Degrés	Degrés
179.5	-44.9	1.2

### Angles de visée *a priori*

Roll	Pitch	Heading
Degrés	Degrés	Degrés
188.3746	8.8746	-34.8125
10.0875	-8.959	-10.159

### Angles de visée obtenus

Roll	Pitch	Heading
Degrés	Degrés	Degrés
179.5	0.0	-44.9
0.0	0.0	1.2
		0.0

### Bras de levier exact

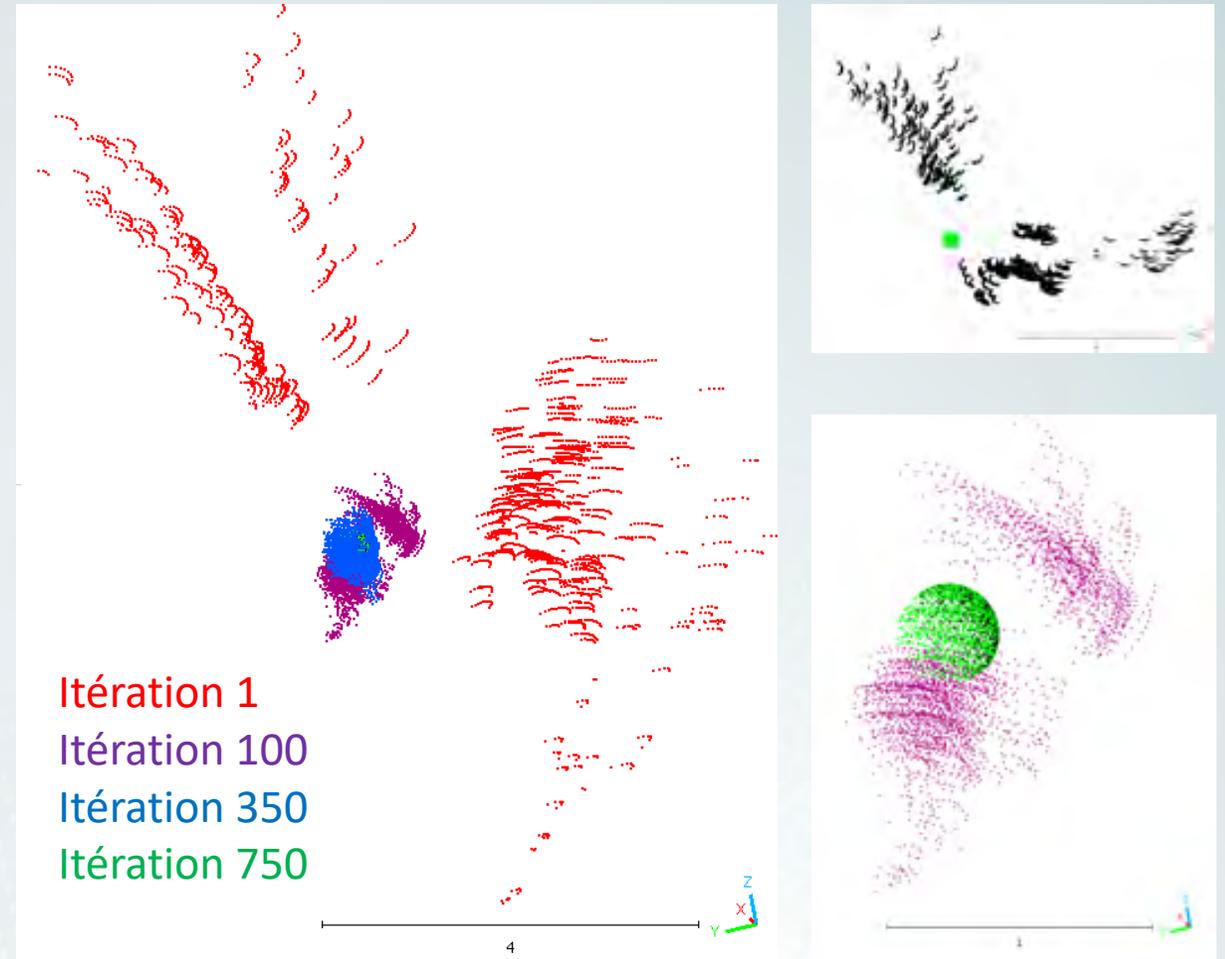
Lever Arm X	Lever Arm Y	Lever Arm Z
(m)	(m)	(m)
1.5	-1.24	-1.36

### Bras de levier *a priori*

Lever Arm X	Lever Arm Y	Lever Arm Z
(m)	(m)	(m)
1.5997	0.0997	-1.2049
0.0351	-1.7674	-0.4074

### Bras de levier obtenu

Lever Arm X	Lever Arm Y	Lever Arm Z
(m)	(m)	(m)
1.5	0.0	-1.24
0.0	0.0	-1.36
		0.0



# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données réelles

Orange: Antennes GNSS

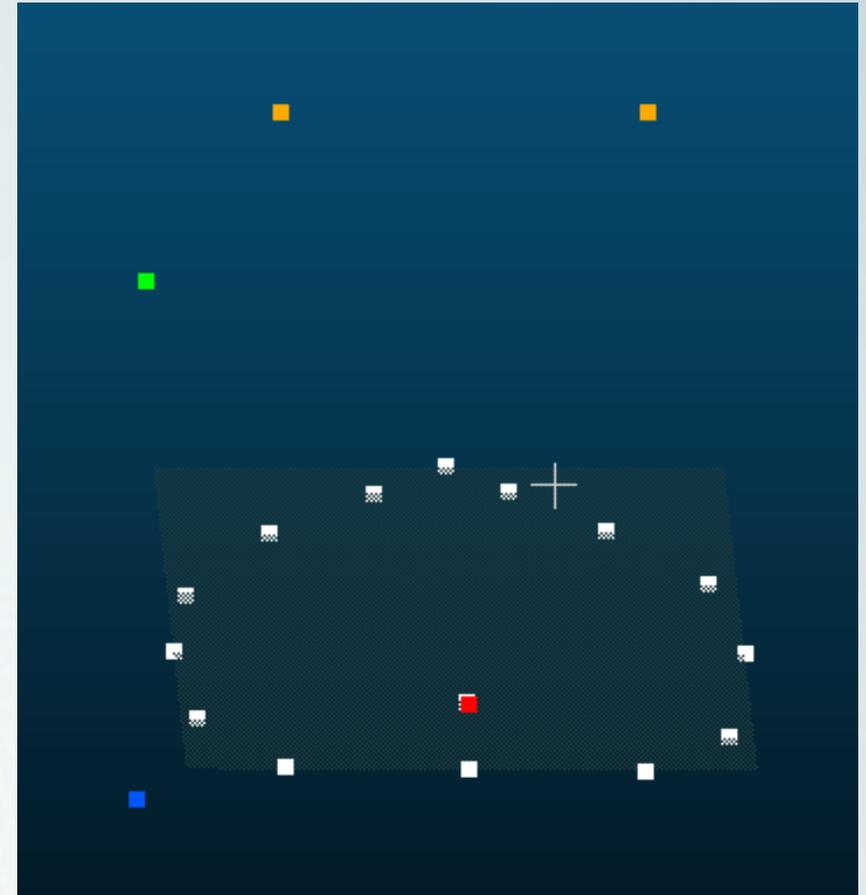
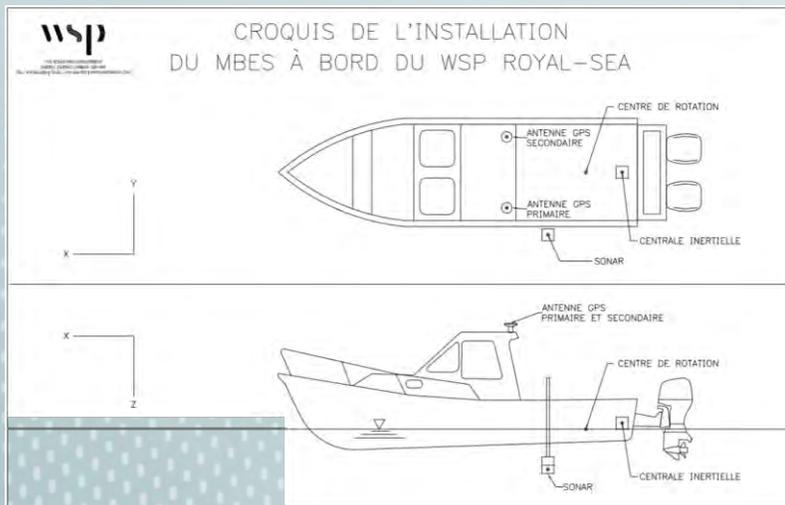
Vert: VLP-16

Bleu: R2SONIC

Rouge: POSMV

Blanc: Ligne de flottaison

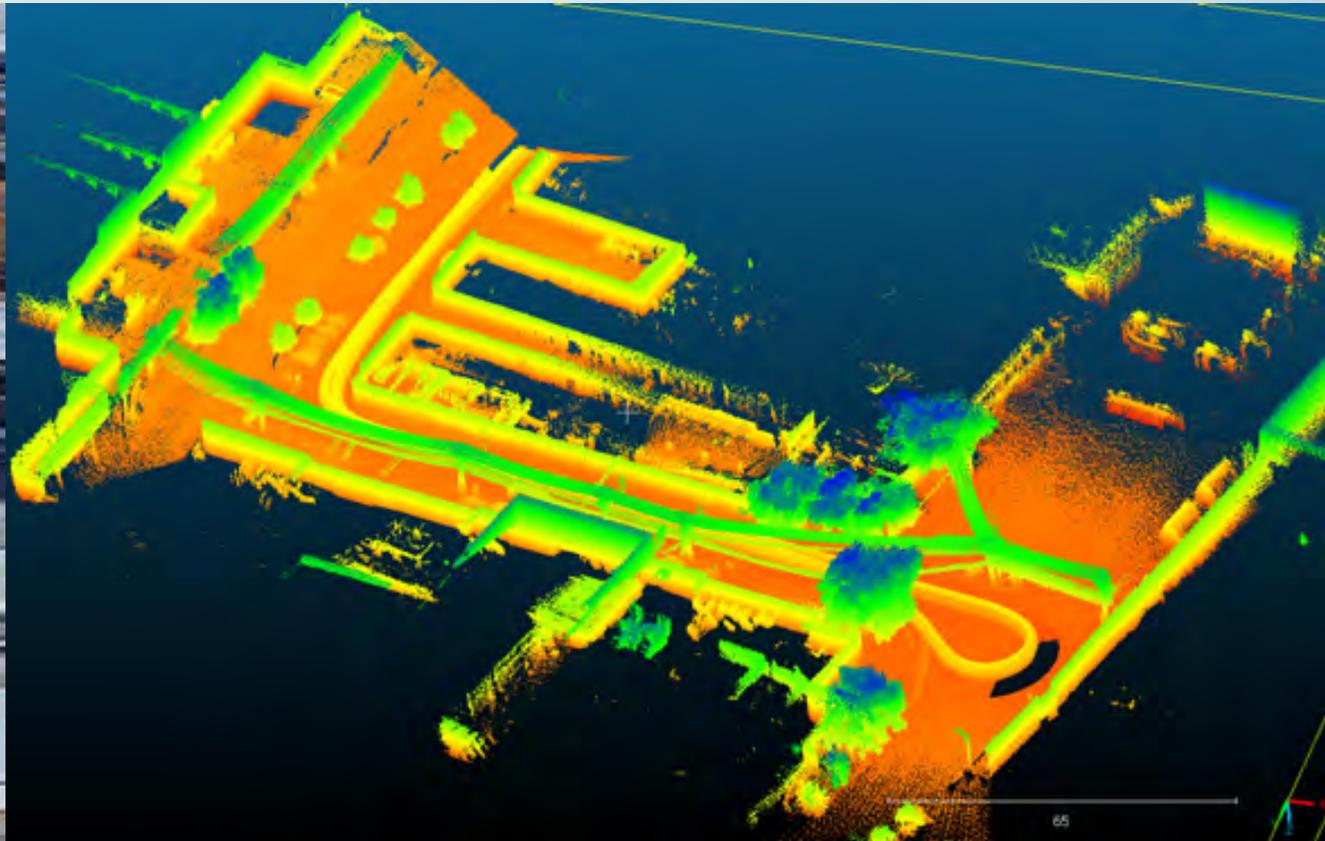
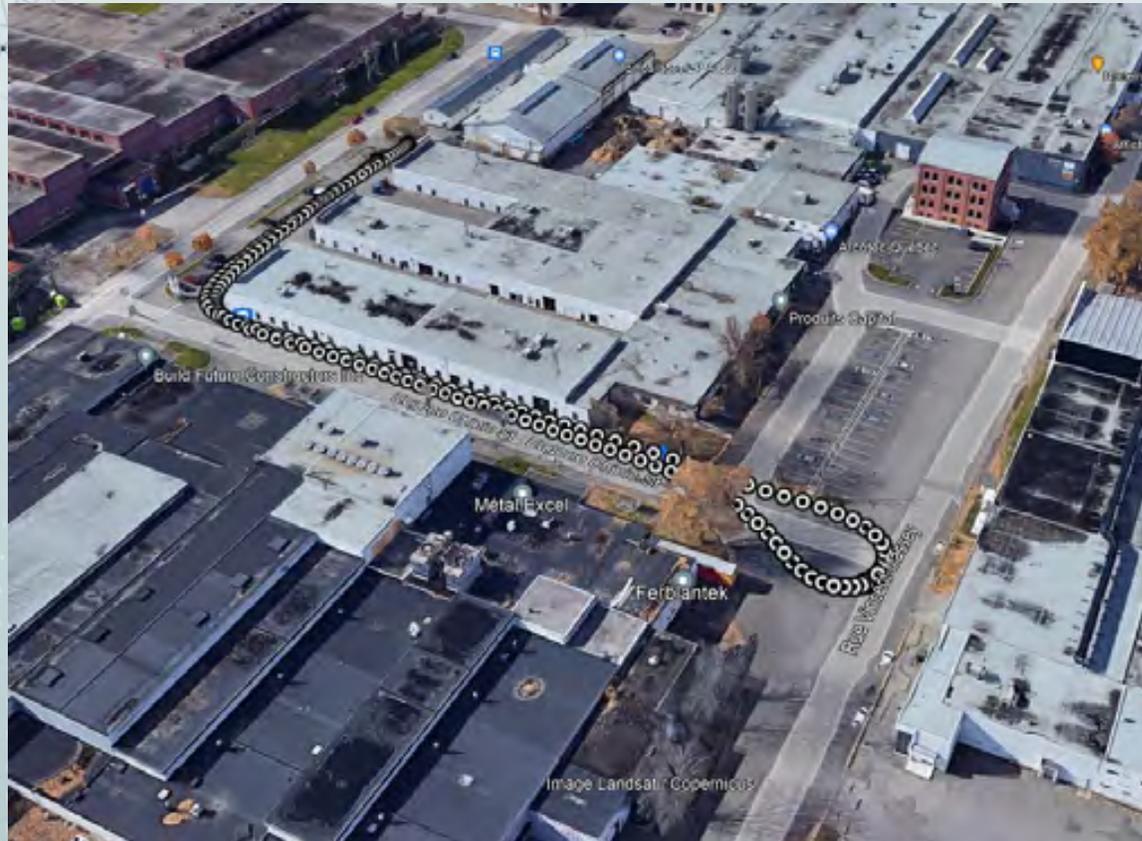
Caché: Centre de rotation





# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données réelles



Acquisition de données  
Entrepôt WSP

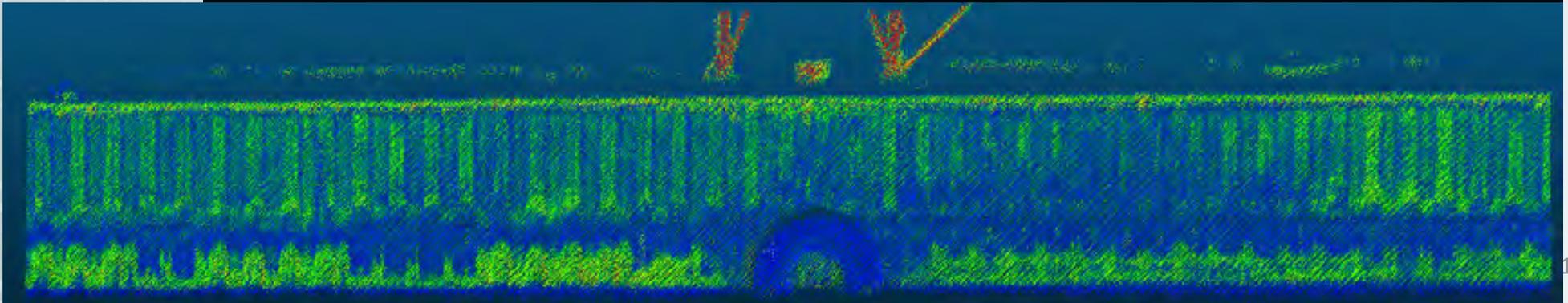
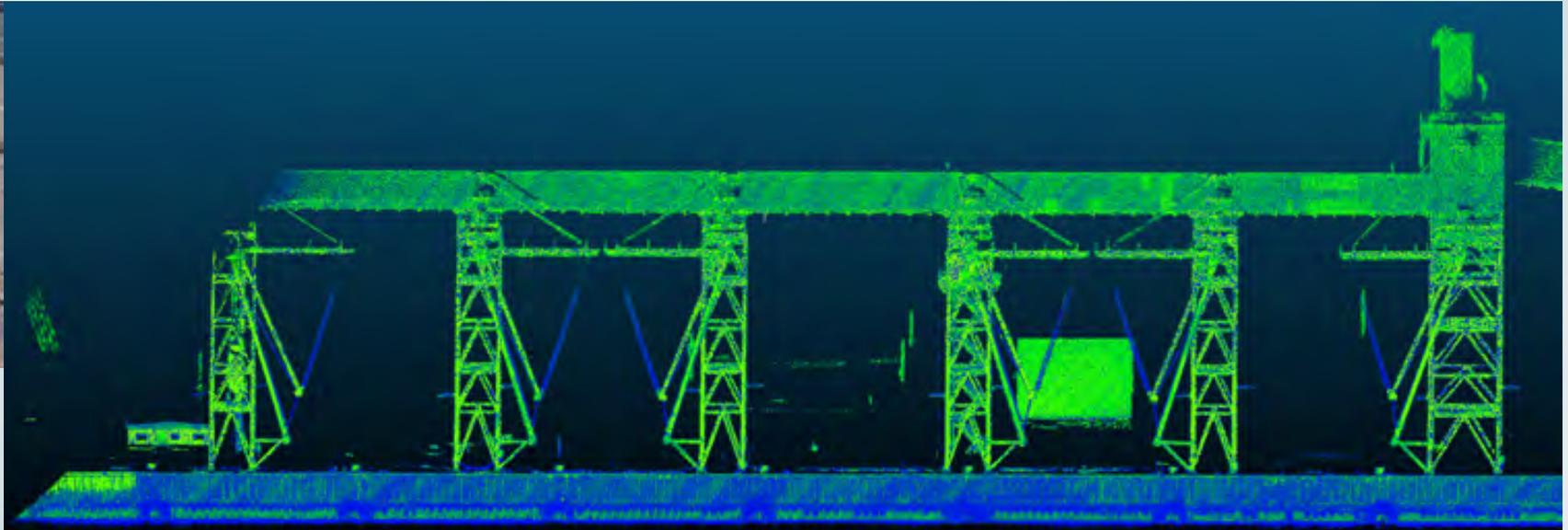


# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données réelles



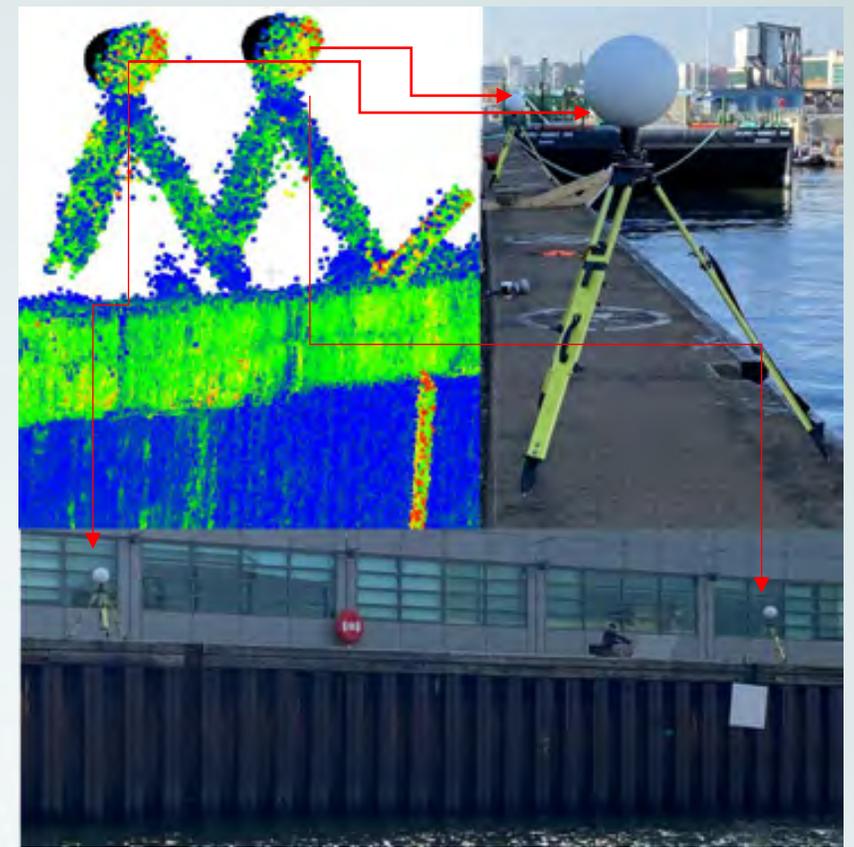
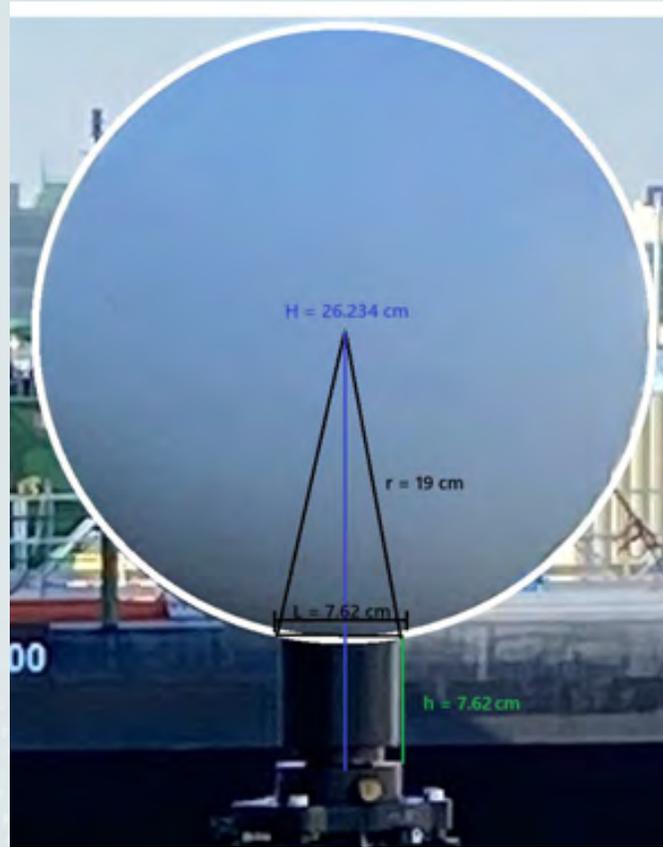
Acquisition de données  
Port-Cartier





# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données réelles

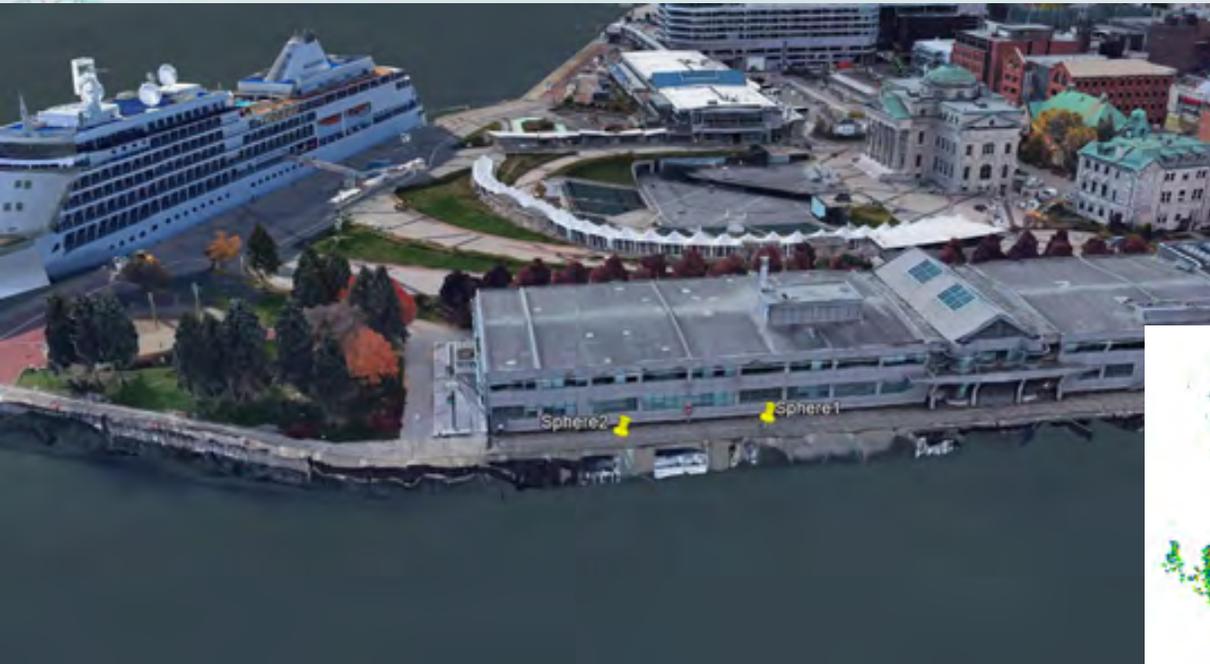


Identifiant	Latitude (D.D)	Longitude (D.D)	Hauteur Ellipsoïdale (m)
Sphère 1	46.8187276	71.20054531	-20.904
Sphère 2	46.81876101	71.20029096	-20.891

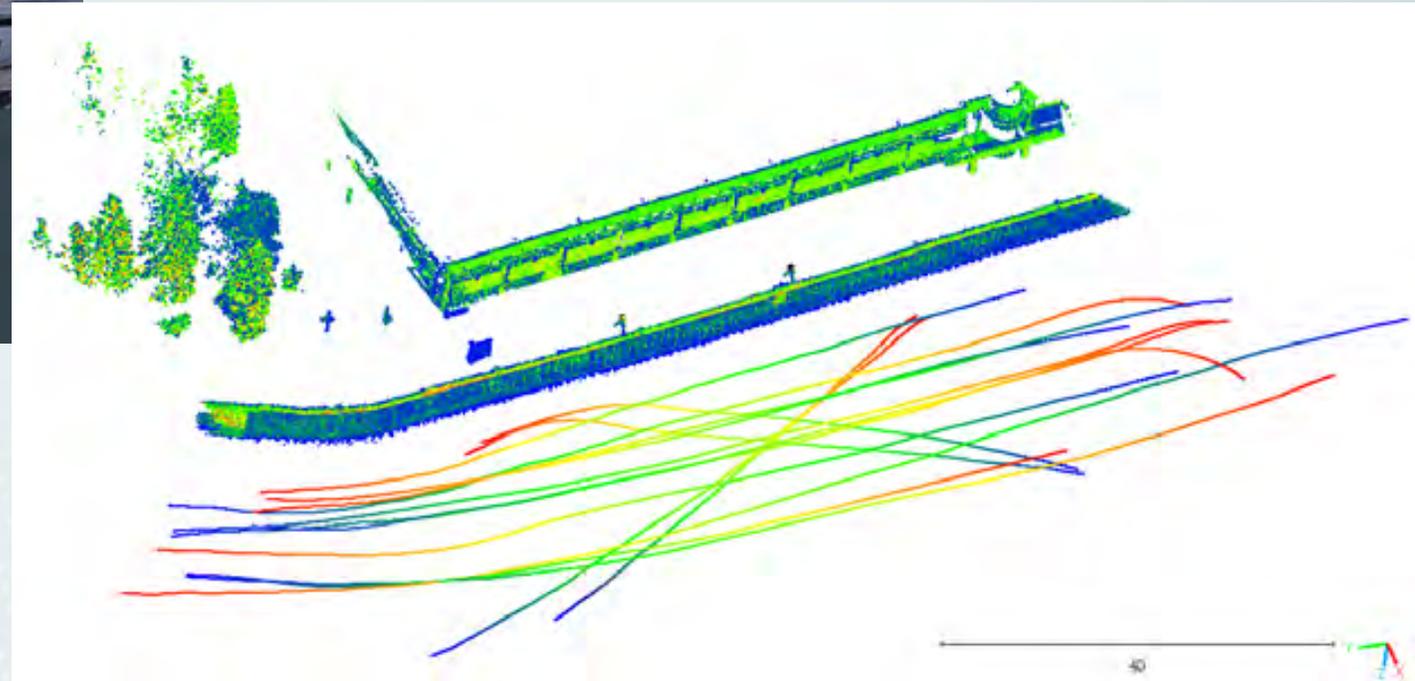


# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données réelles



Acquisition de données  
Port de Québec



Patron de lignes:

- Plusieurs passages
- Différentes distances
- Différentes orientations

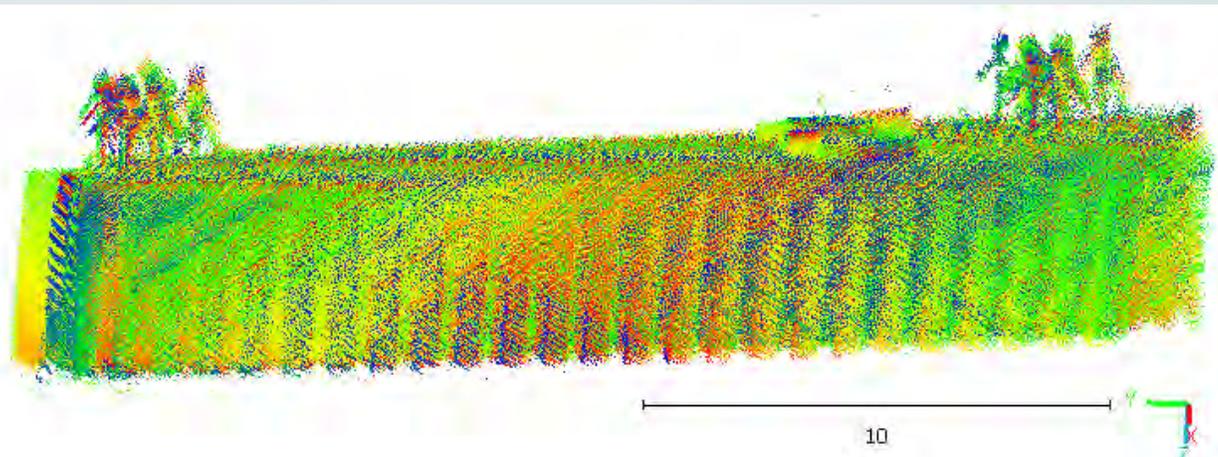


# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

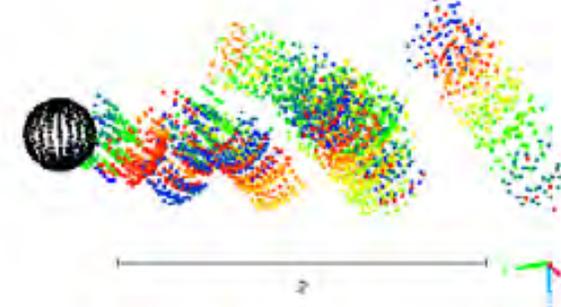
## Avec données réelles (avant calibrage)

Boresight	Roll		Pitch		Heading	
	Degrés		Degrés		Degrés	
A priori	-180	diff	45	diff	0	diff
Calibré	-179.732	0.268	47.5784	2.5784	-7.1157	-7.1157

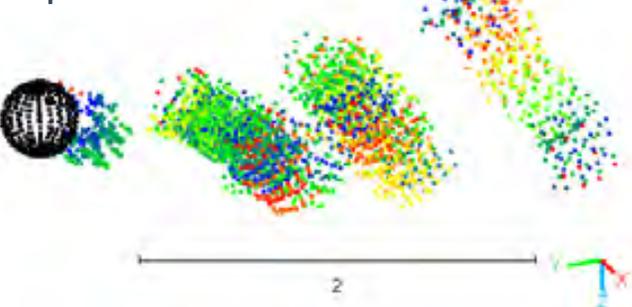
	Lever Arm X		Lever Arm Y		Lever Arm Z	
	(m)		(m)		meters	
A priori	1.363	diff	-1.22	diff	-1.402	diff
Calibré	0.582	-0.781	-1.2228	-0.0028	-1.6797	-0.2777



Sphère 1



Sphère 2

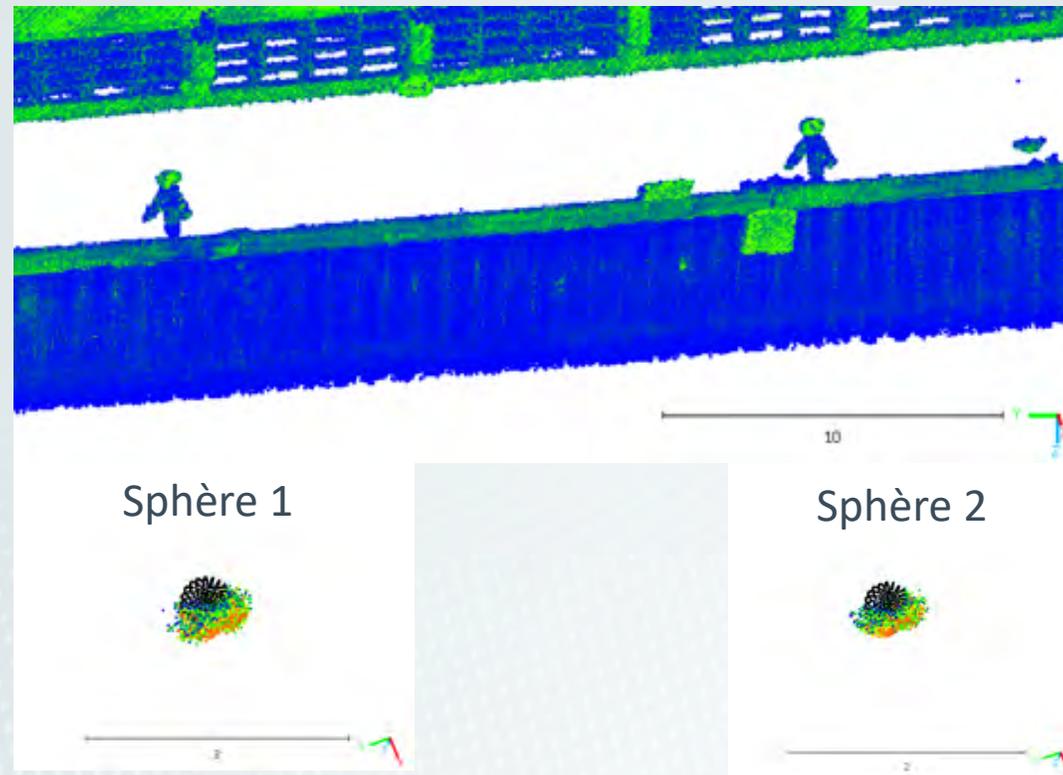




# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données réelles (après calibrage)

Boresight	Roll		Pitch		Heading		Lever Arm X		Lever Arm Y		Lever Arm Z	
	Degrés		Degrés		Degrés		meters		meters		meters	
nominal	-180	diff	45	diff	0	diff	1.363	diff	-1.22	diff	-1.402	diff
calibrated	-179.732	0.268	47.5784	2.5784	-7.1157	-7.1157	0.582	-0.781	-1.2228	-0.0028	-1.6797	-0.2777



# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

## Avec données réelles (écart moyen quadratique)

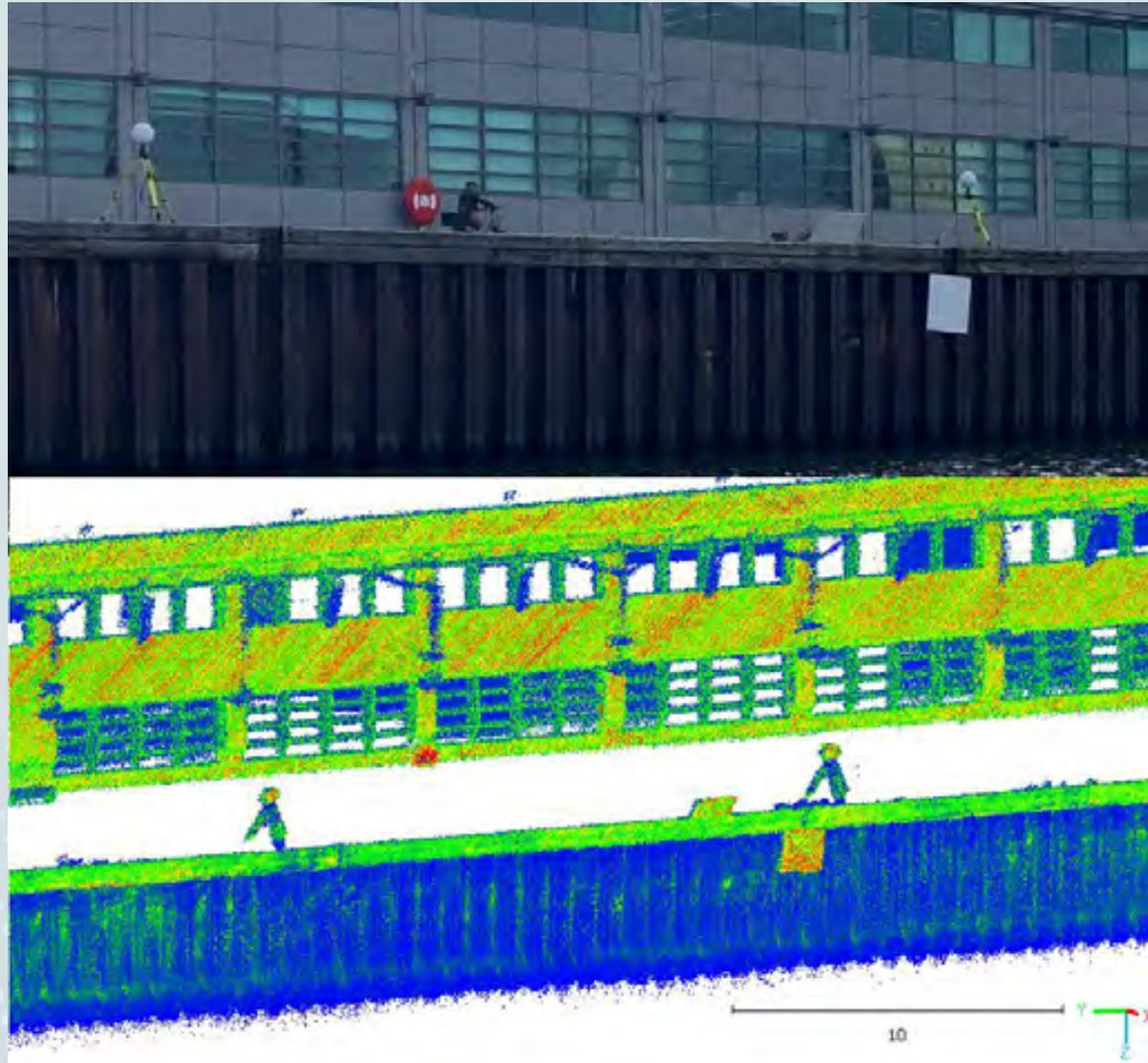
Passage_HHMMSS	Erreur (m)	Erreur (m)
Passage_132540	0.057	0.065
Passage_132717	0.126	0.142
Passage_133035	0.087	0.091
Passage_133221	0.028	0.040
Passage_133401	0.056	0.069
Passage_133559	0.022	0.032
Passage_133737	0.039	0.030
Passage_134003	0.089	0.074
Passage_134204	0.018	0.027
Passage_134400	0.012	0.044
Passage_134532	0.040	0.046
Passage_134810	0.106	0.071
Passage_134917	0.088	0.106
Passage_135044	0.125	0.090
Passage_135155	0.090	0.119
<b>EMQ</b>	<b>0.037</b>	<b>0.034</b>
	<b>Sphère 1</b>	<b>Sphère 2</b>





# 3. Calibrage du SLM avec scanneur 3D

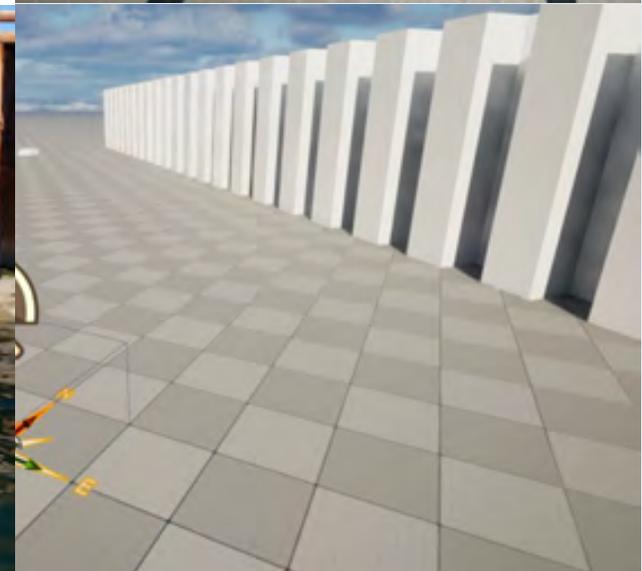
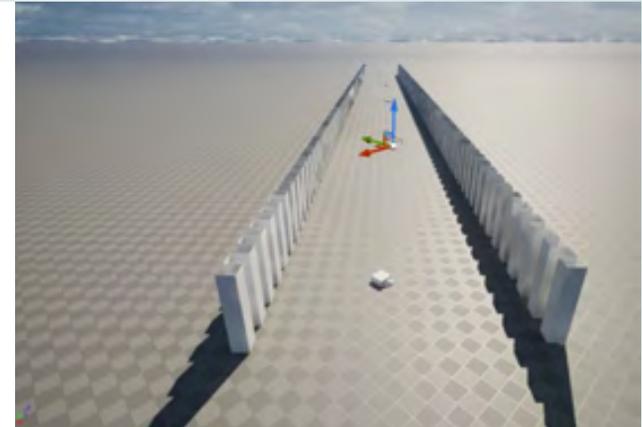
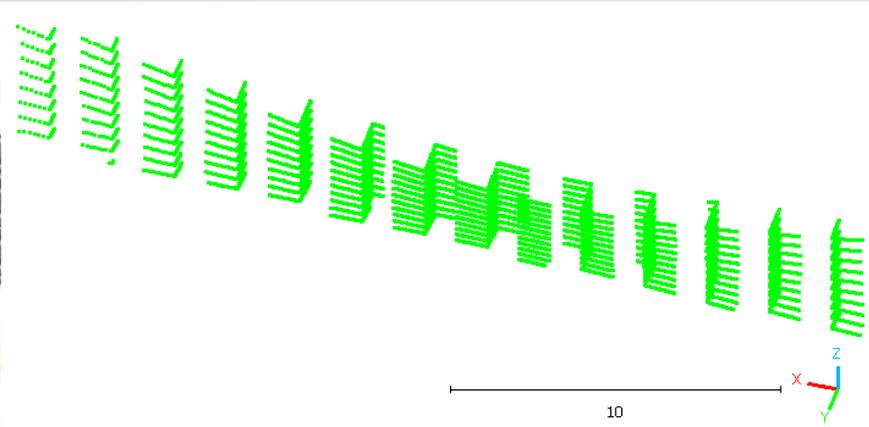
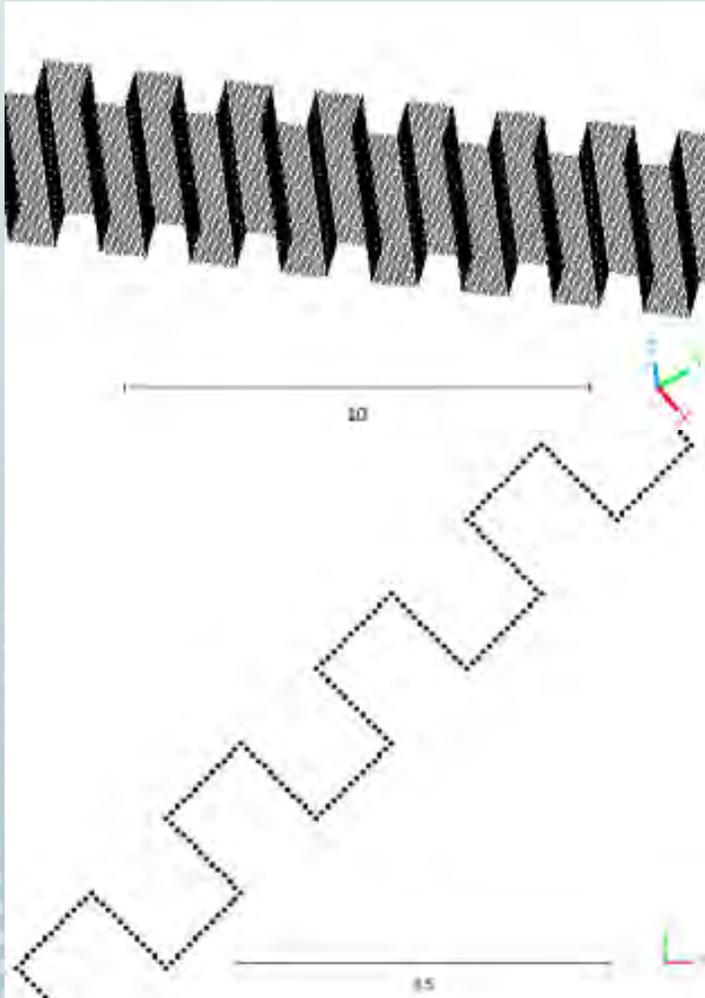
Avec données réelles (superposition des scans)





# 4. Correction de la trajectoire erronée

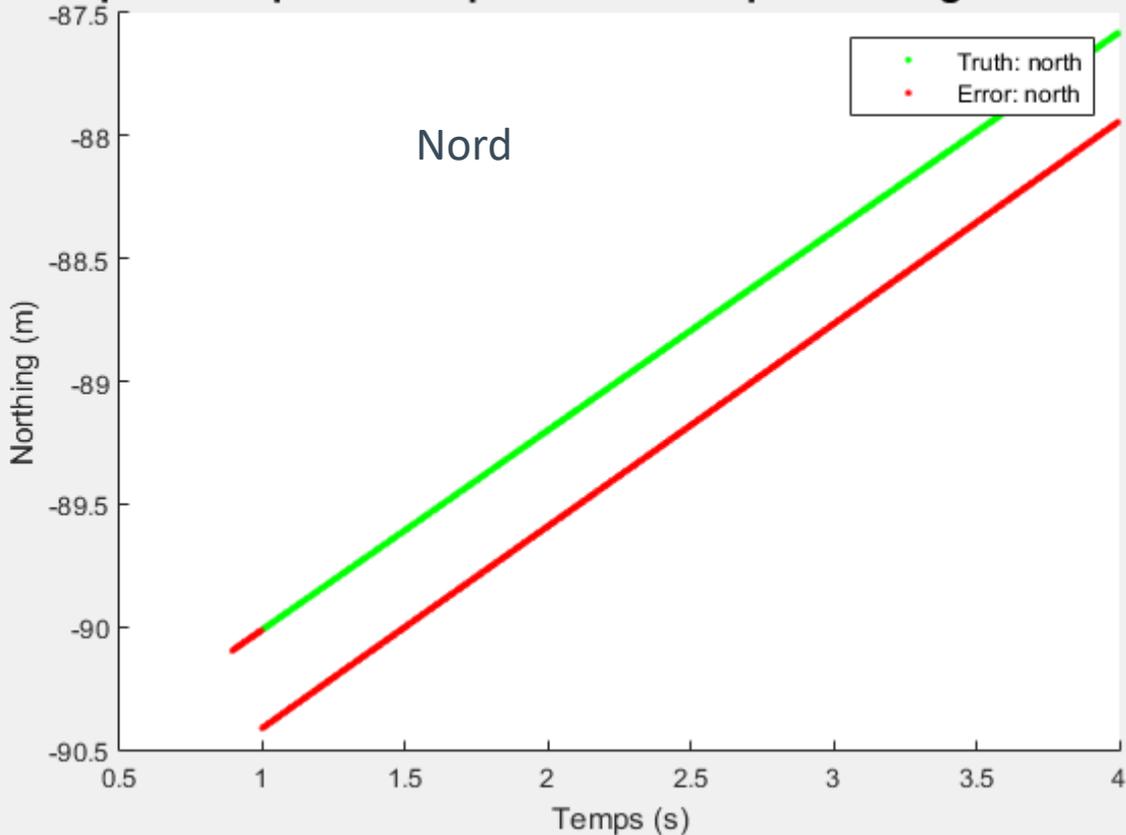
## Avec données synthétiques



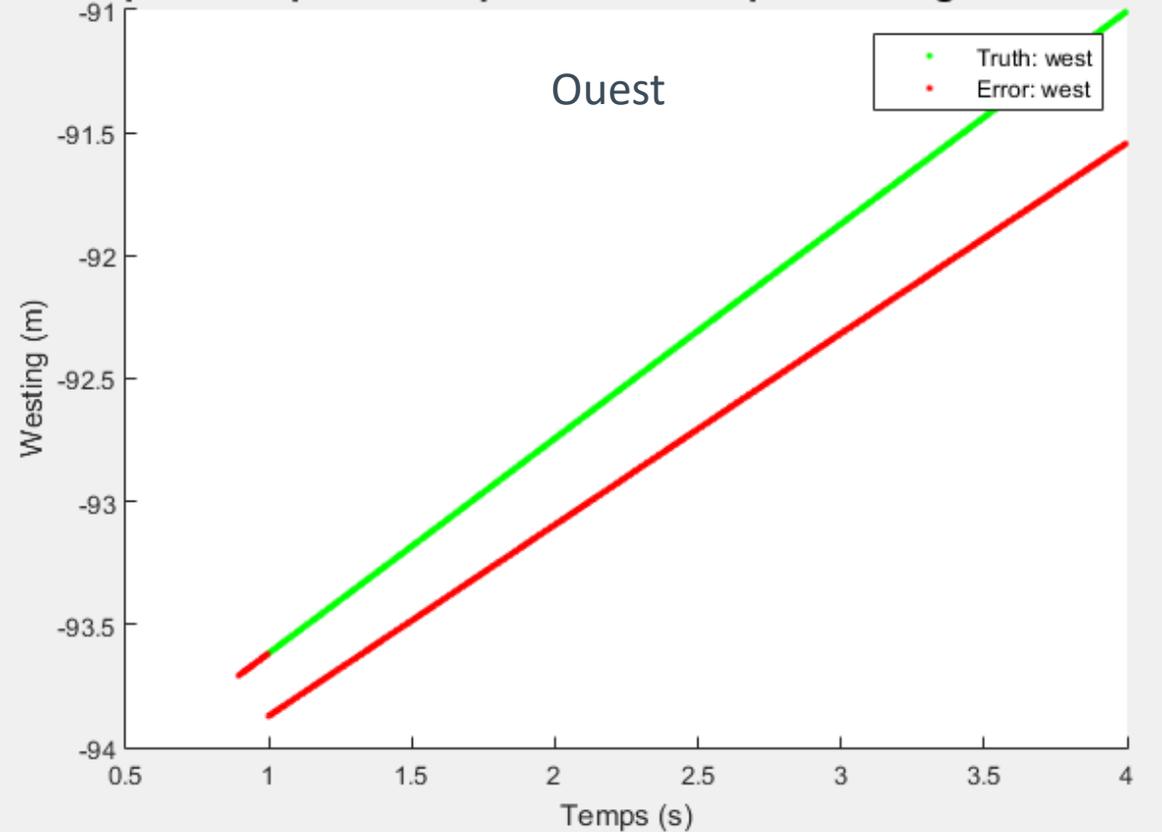
# 4. Correction de la trajectoire erronée

## Avec données synthétiques

Comparaison planimétrique suite à une perte de signal à T = 1 sec



Comparaison planimétrique suite à une perte de signal à T = 1 sec

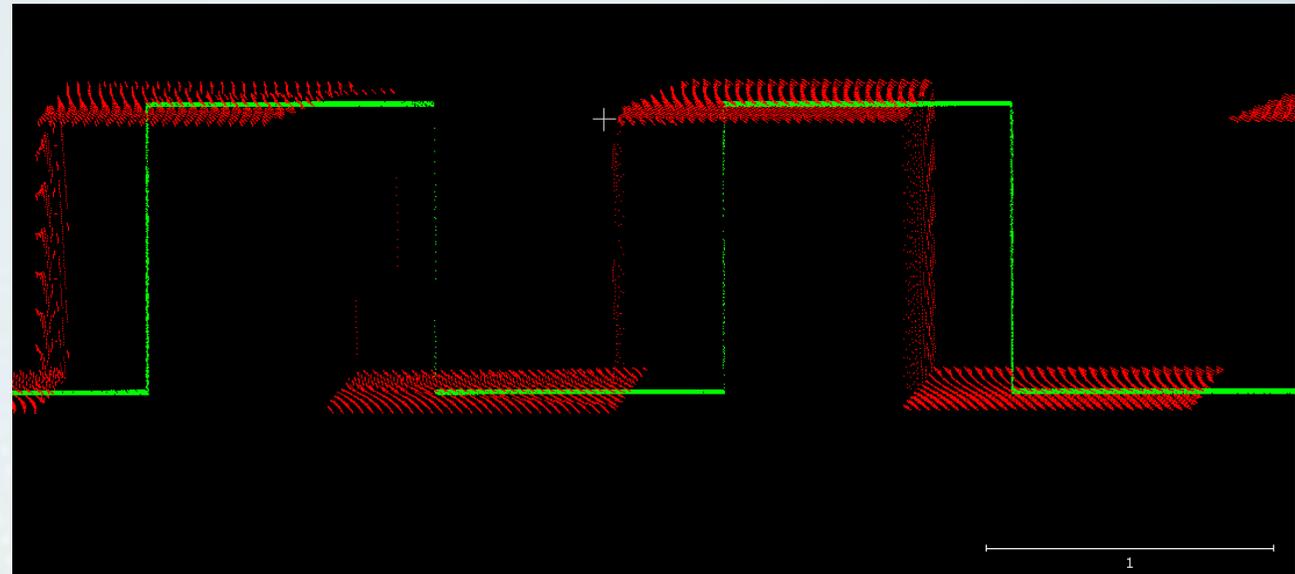
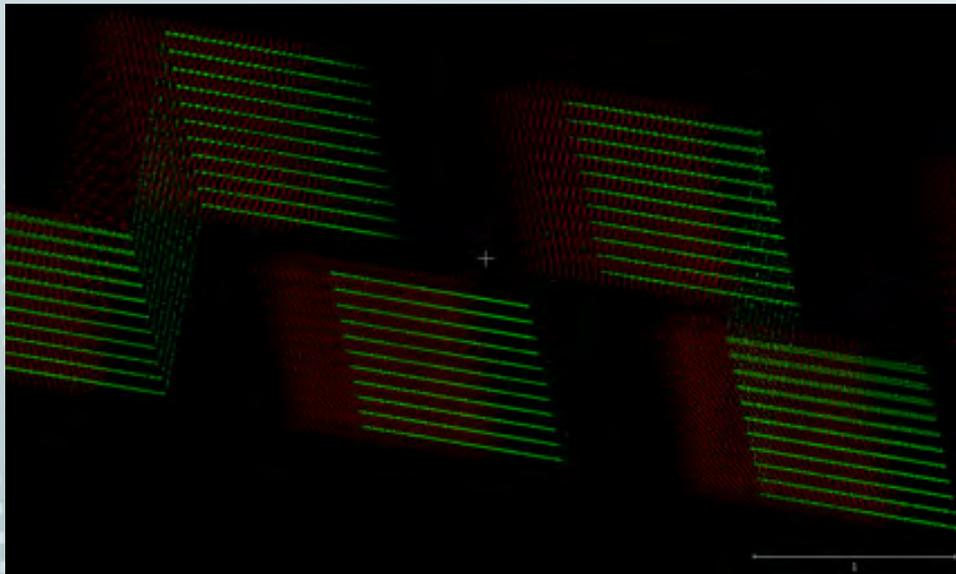


Erreur planimétrique d'environ 50 cm

# 4. Correction de la trajectoire erronée

## Avec données synthétiques

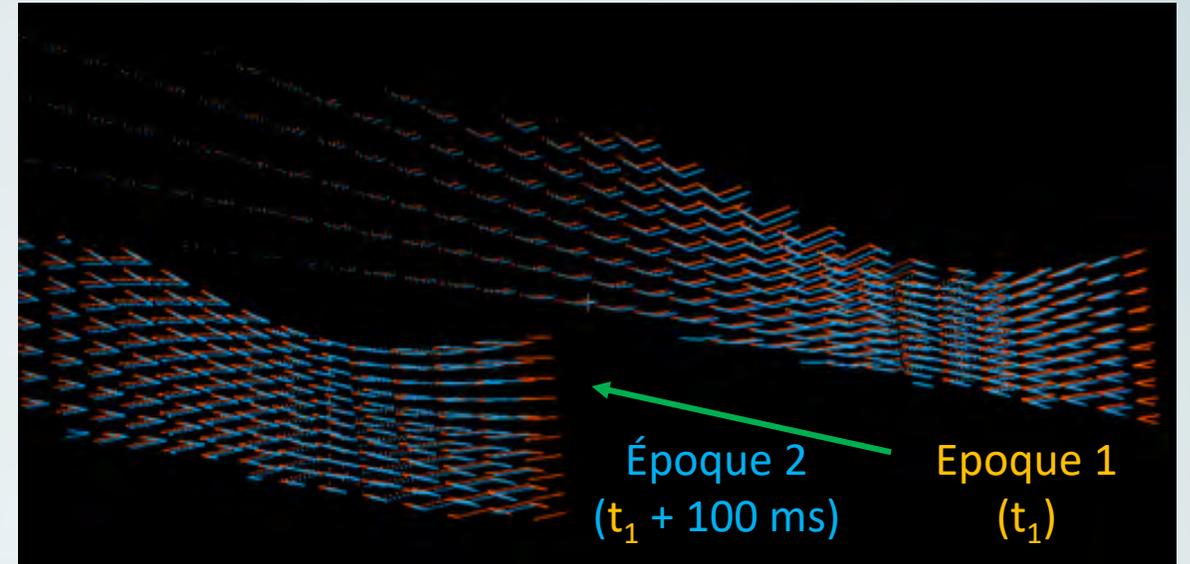
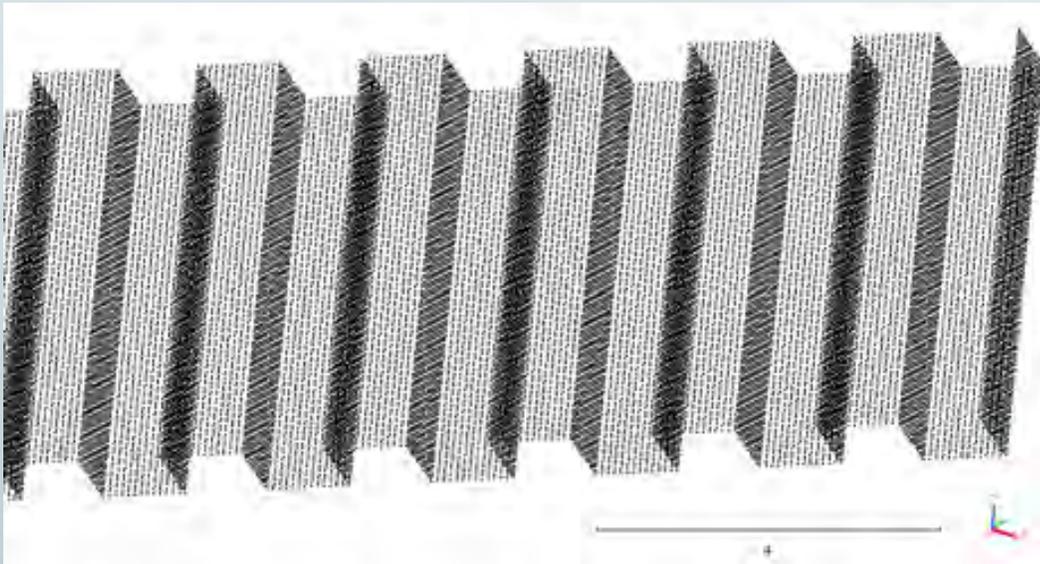
Comparaison du géoréférencement avec une trajectoire vraie (vert) et un fausse (rouge). On constate une déformation et la perte des propriétés planaires du nuage de points.





# 4. Correction de la trajectoire erronée

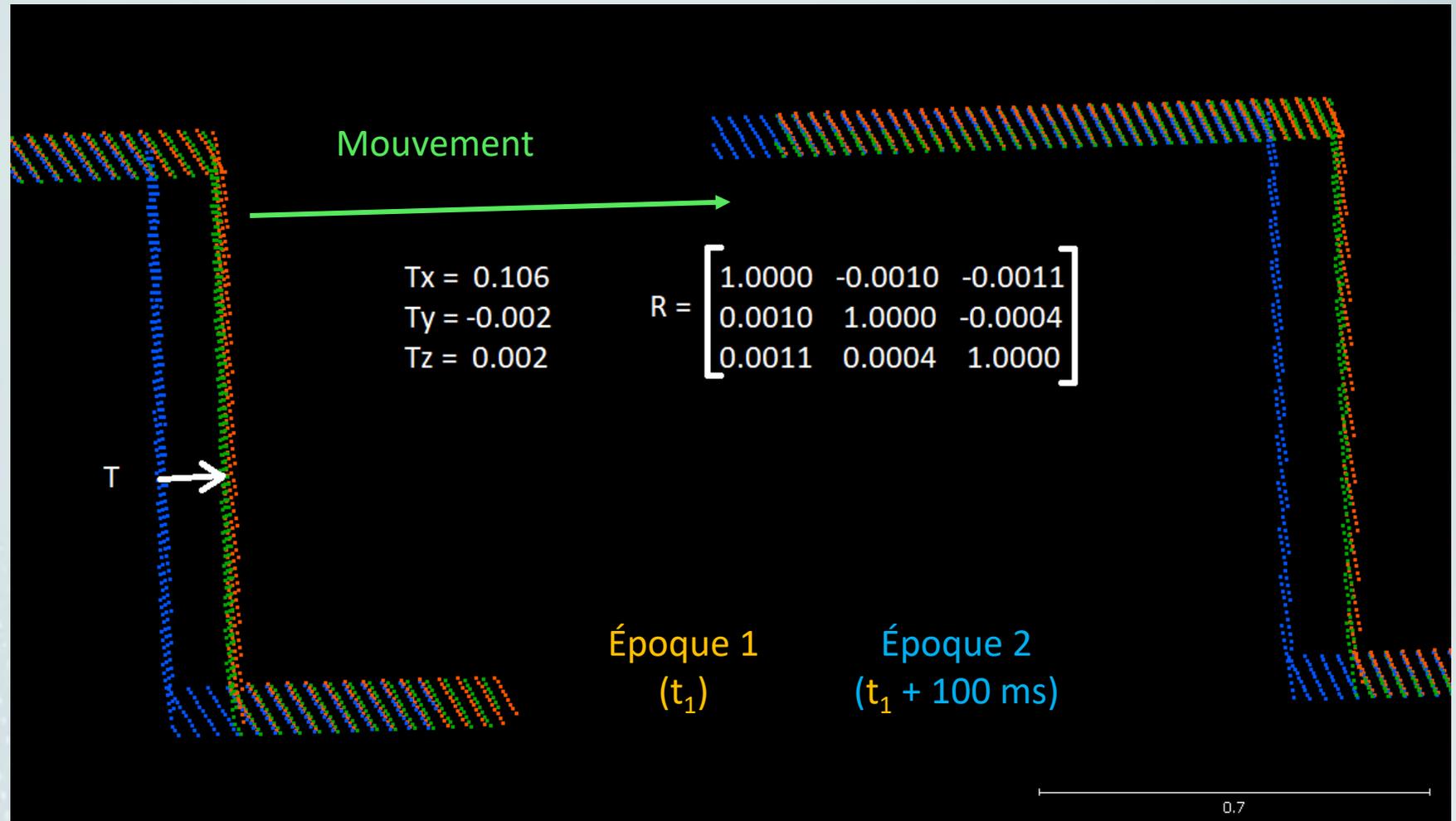
Avec données synthétiques



# 4. Correction de la trajectoire erronée

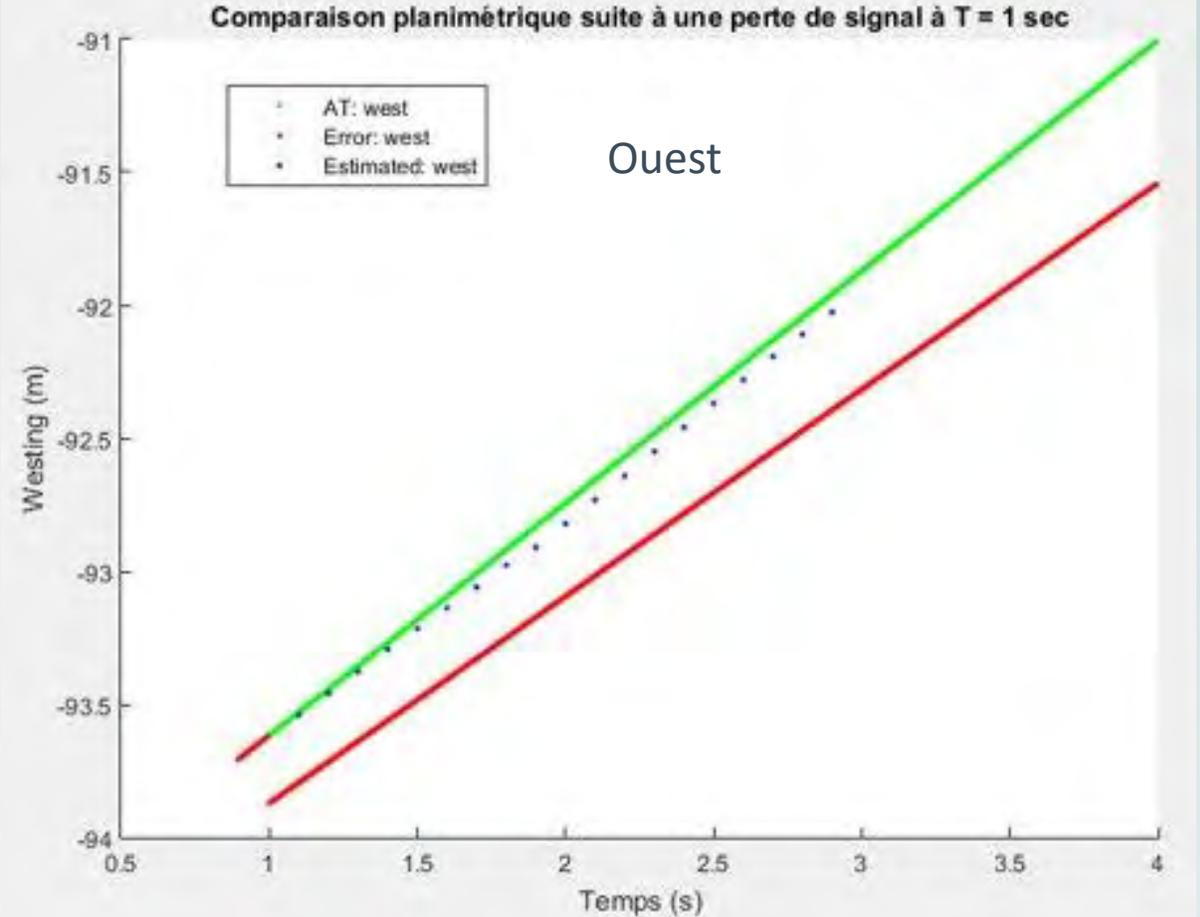
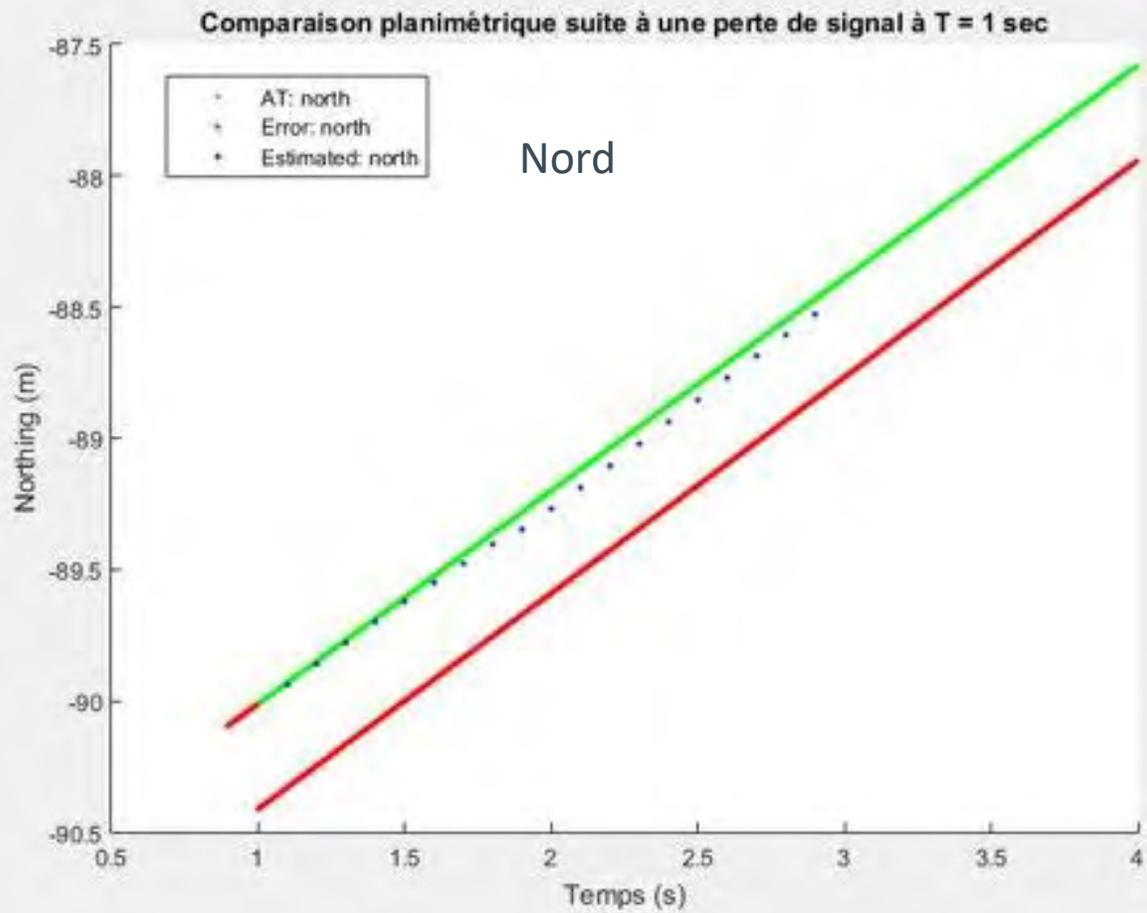
## Avec données synthétiques (ICP)

Bergström, P. and Edlund, O.  
2014, 'Robust registration of  
point sets using iteratively  
reweighted least squares'



# 4. Correction de la trajectoire erronée

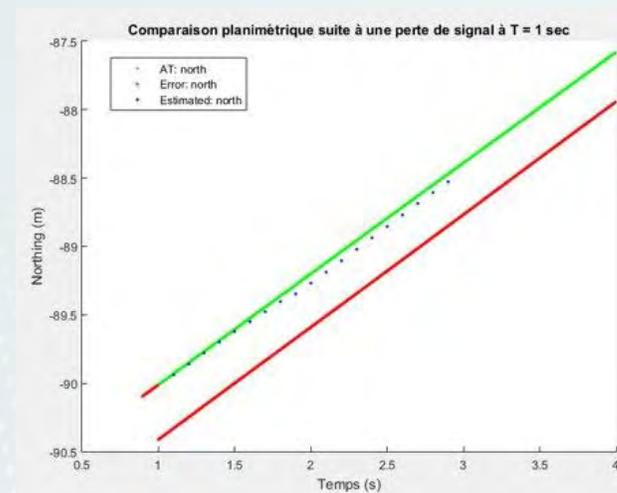
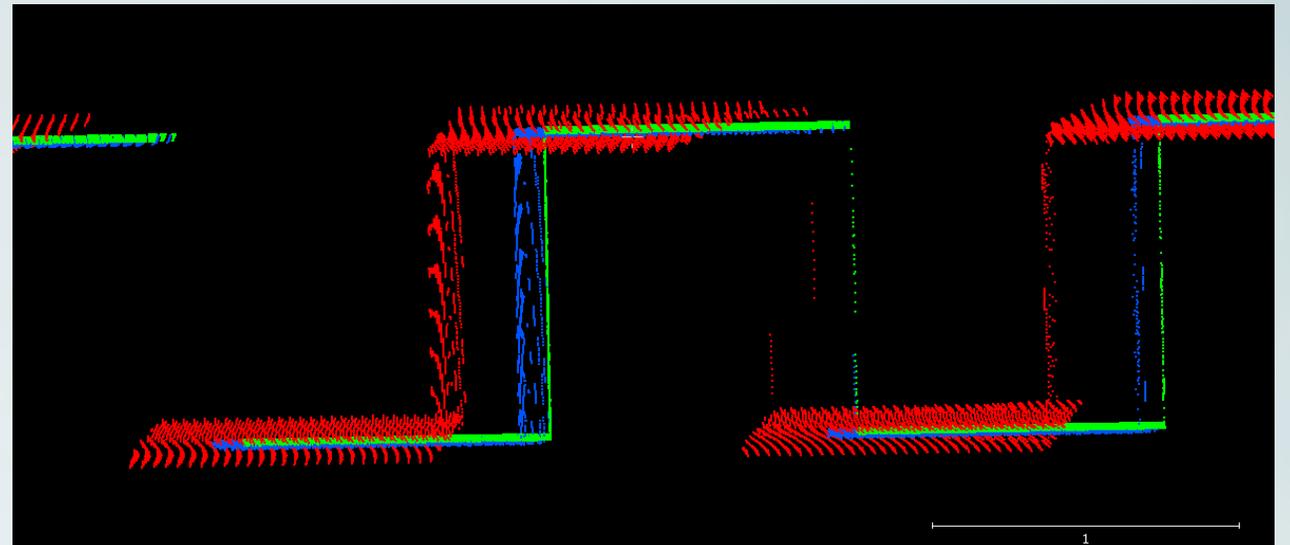
## Avec données synthétiques



# 4. Correction de la trajectoire erronée

## Avec données synthétiques

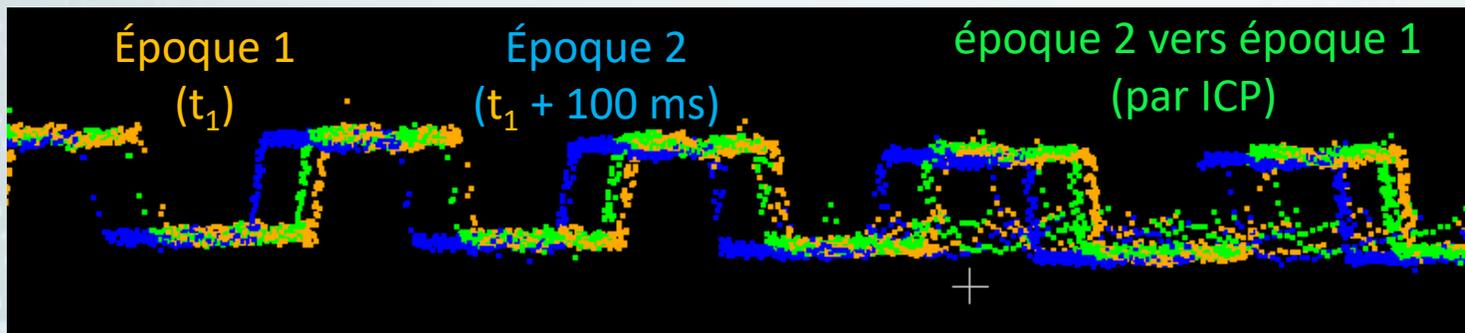
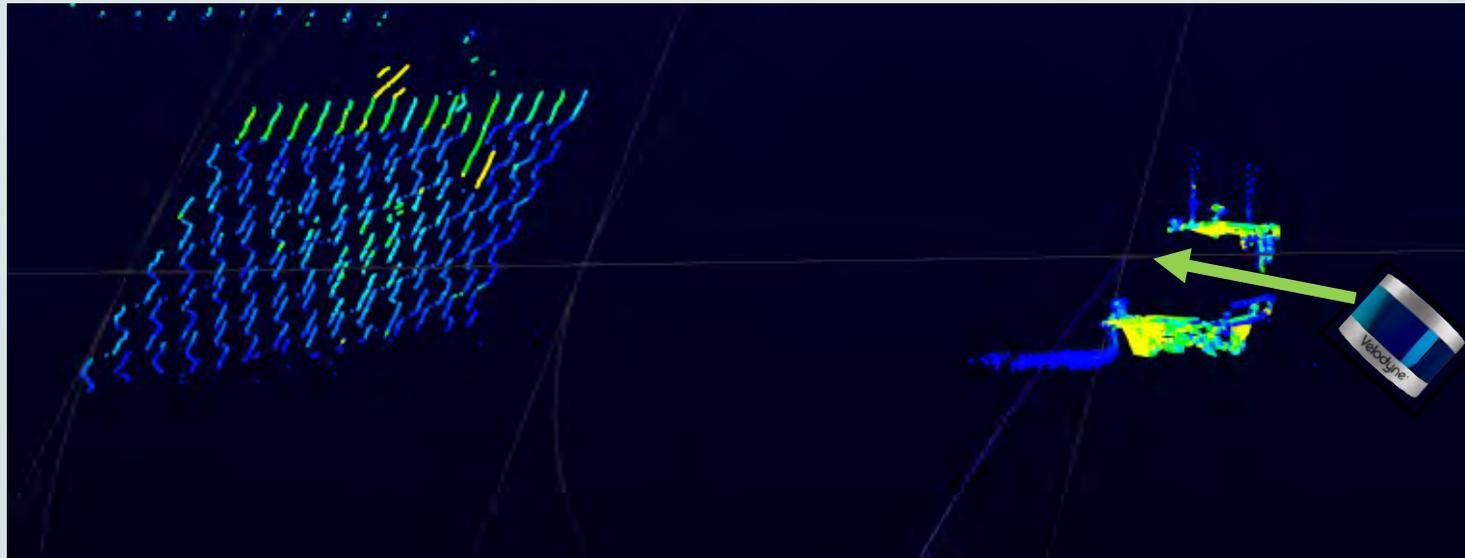
Comparaison Planimétrique		
Temps (s)	Erronée vs Vraie (m)	Corrigée vs Vraie (m)
1.1	0.479	0.013
1.2	0.482	0.019
1.3	0.487	0.024
1.4	0.491	0.028
1.5	0.496	0.038
1.6	0.502	0.051
1.7	0.507	0.063
1.8	0.513	0.072
1.9	0.519	0.103
2	0.525	0.104
2.1	0.531	0.103
2.2	0.537	0.099
2.3	0.543	0.096
2.4	0.549	0.091
2.5	0.555	0.088
2.6	0.561	0.084
2.7	0.567	0.082
2.8	0.573	0.086
2.9	0.578	0.090



Démonstration du potentiel de la correction de la trajectoire par l'algorithme ICP.

# 4. Correction de la trajectoire erronée

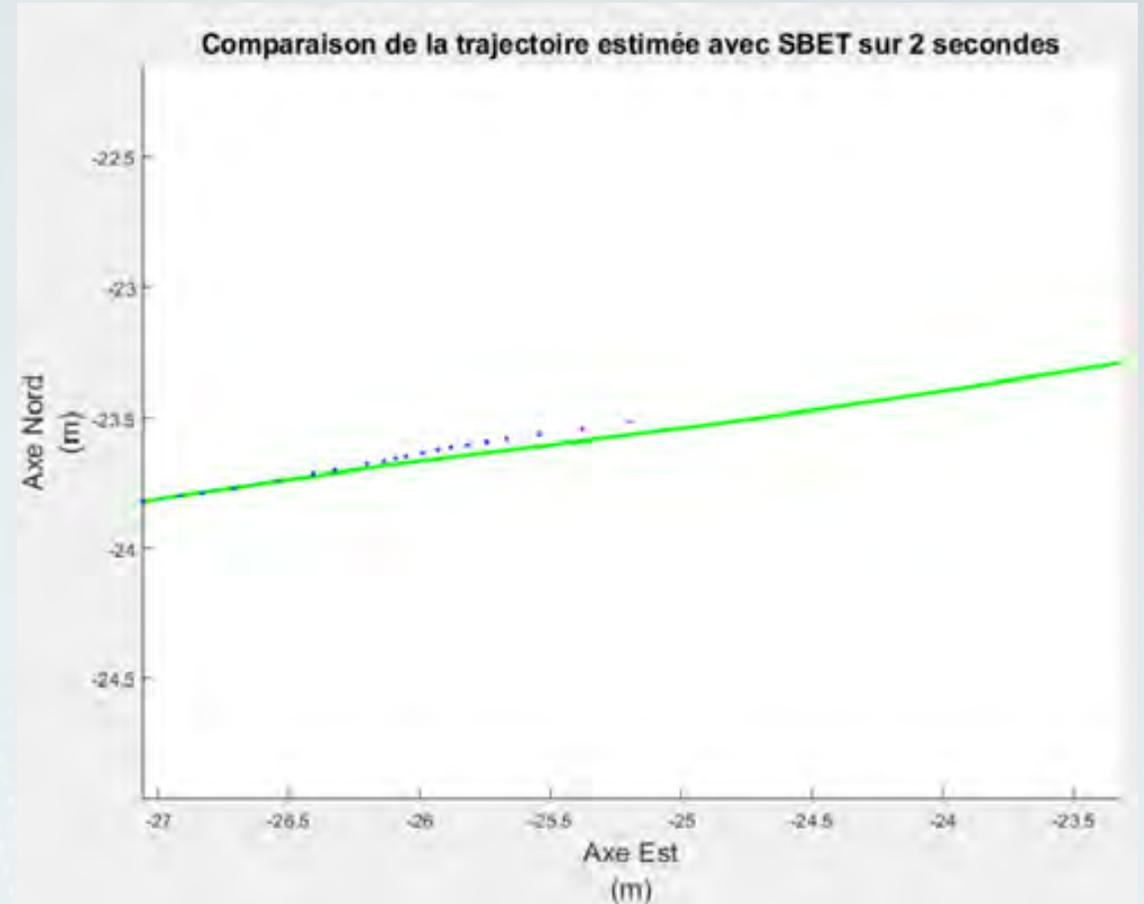
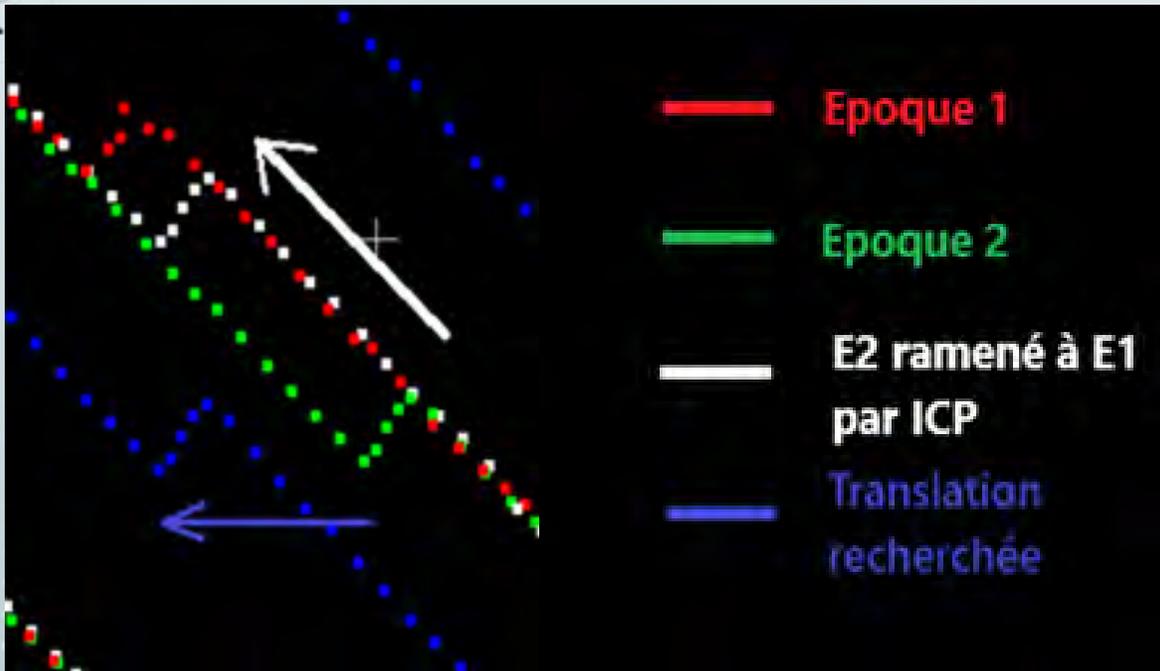
Avec données réelles (ICP)



Bergström, P. and Edlund, O. 2014, 'Robust registration of point sets using iteratively reweighted least squares'

# 4. Correction de la trajectoire erronée

Avec données réelles (ICP)

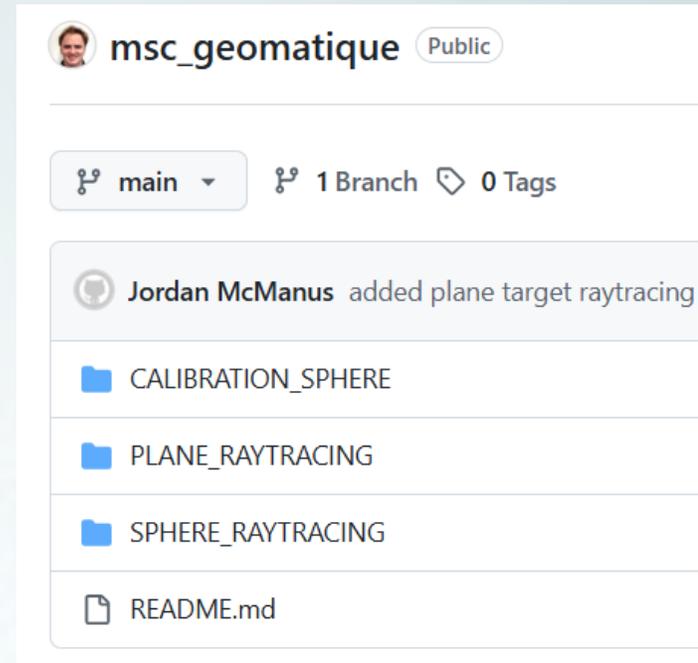
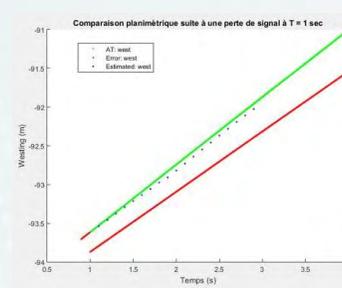
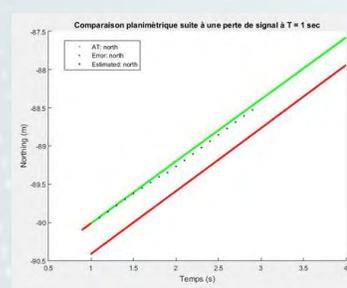
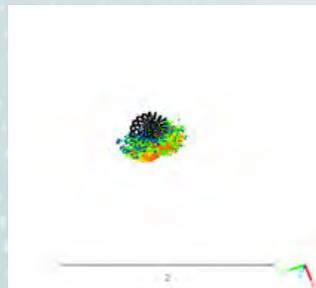
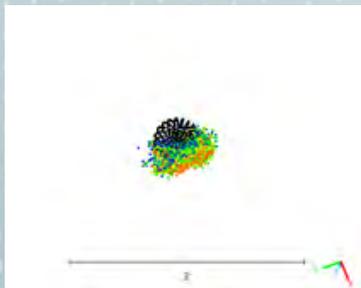
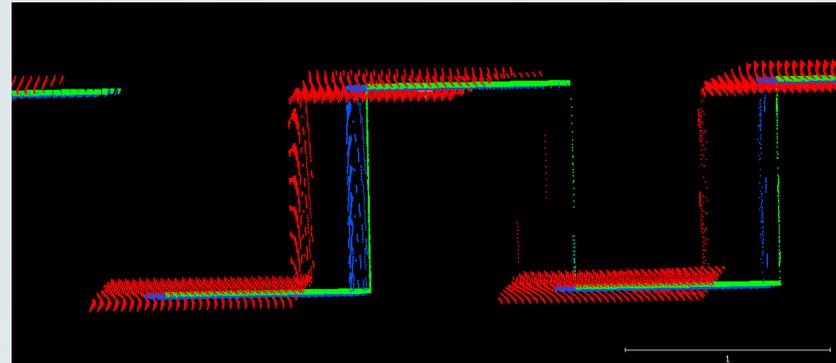
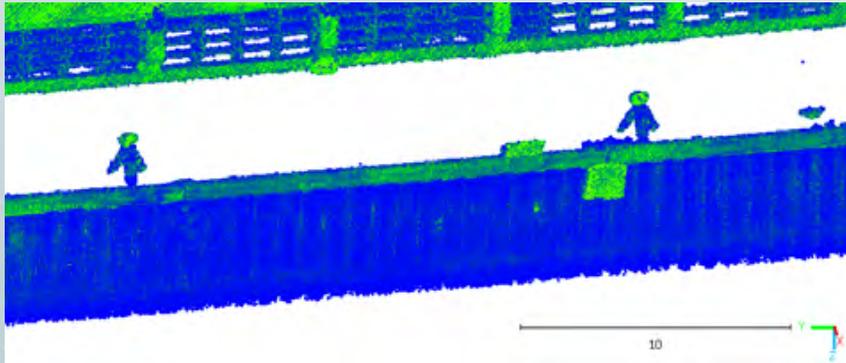


Les translations sont sous-estimées en raison de l'inclinaison du scanneur

# 5. Conclusions

## Principales contributions

- Estimation simultanée d'un ensemble complet des 6 paramètres d'installation avec cibles sphériques
- Démonstration du potentiel d'un LiDAR 3D pour la correction de la trajectoire en cas de perte de signal GNSS
- Développement des codes en logiciel libre ([https://github.com/JordanMcManus/msc\\_geomatique](https://github.com/JordanMcManus/msc_geomatique))



GitHub repository page for `msc_geomatique` (Public). The repository contains the following files and folders:

- main (selected)
- 1 Branch
- 0 Tags
- Jordan McManus added plane target raytracing
- CALIBRATION\_SPHERE
- PLANE\_RAYTRACING
- SPHERE\_RAYTRACING
- README.md

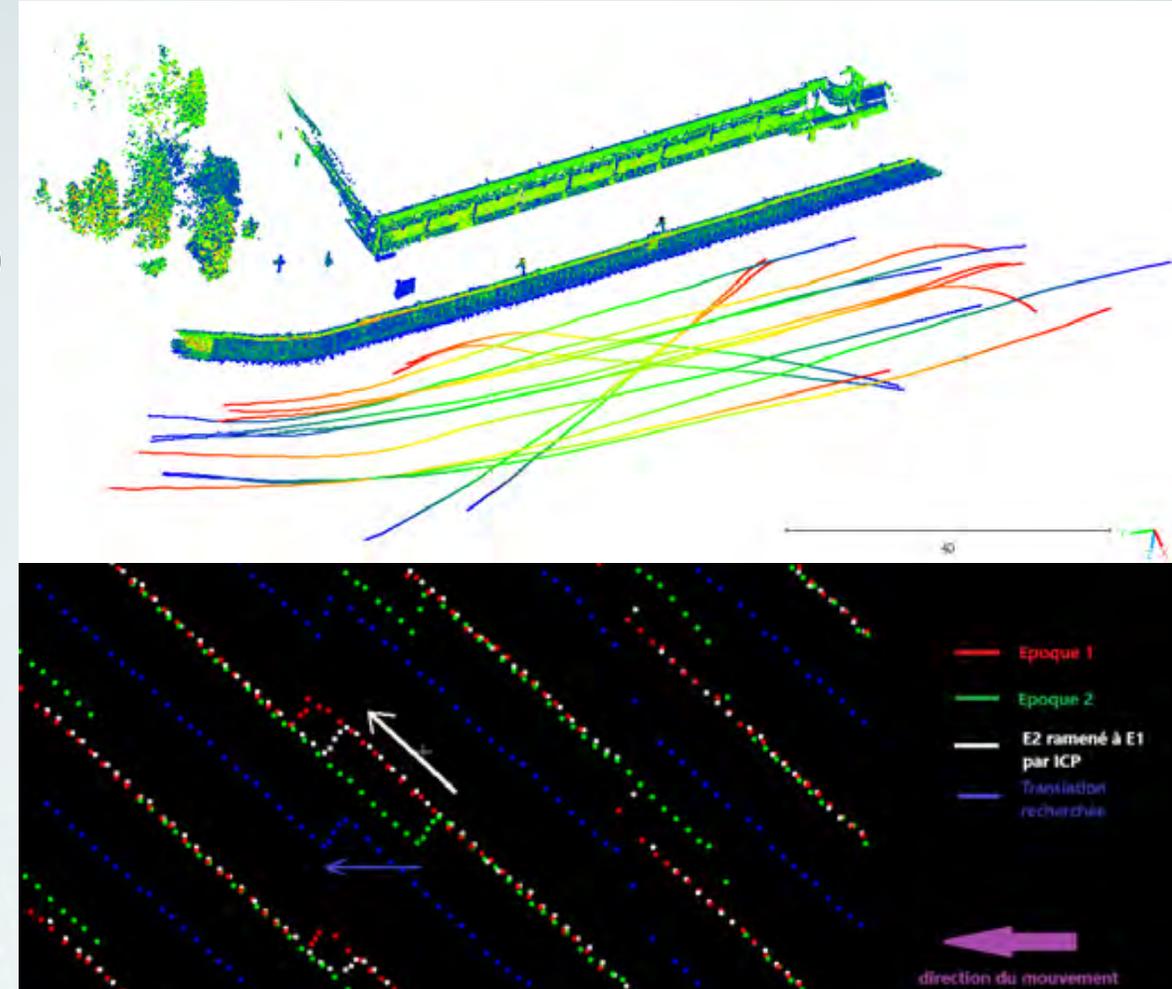
# 6. Recommandations

## Calibrage

- Déterminer le patron de ligne minimale
- Estimer les erreurs internes VLP-16 (angles d'élévations)
- Valider sur d'autres plateformes
- Valider avec d'autres modèles de scanner LiDAR 3D
- Les données brutes sont nécessaires au calibrage !

## Correction de trajectoire

- Installer le VLP-16 sur un support stable
- Analyser l'impact des vibrations
- Tester d'autres approche que ICP



**Merci pour votre attention !**

**Questions?**

**Merci à nos partenaires**

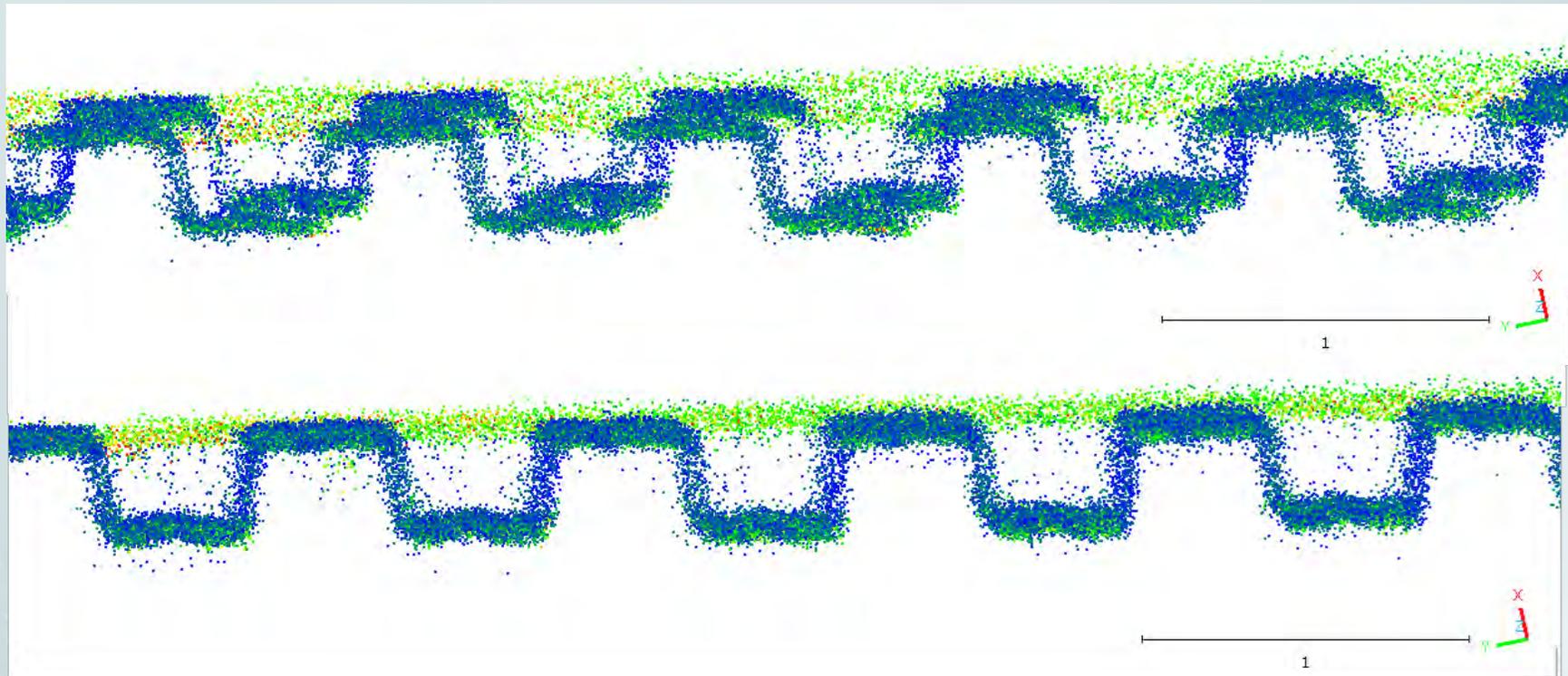


***NSERC***  
***CRSNG***





# Translation finale



Passage_HHMMSS	Erreur (m)	Erreur (m)
Passage_132717	0.126	0.142
Passage_134204	0.018	0.027
<b>EMQ</b>	<b>0.037</b>	<b>0.034</b>
	Sphere 1	Sphere 2