

Essaim de drones

Localisation et Navigation collaborative sans GPS



Quentin **LANDON**





Sasha **CONTREPOIS**

Clémence **SABOT**

Maxime **LE CLAIR**

Promotion SEN-2022/2025

*Maintenance & Surveillance pour les **transports du futur***

 Aéronautique	 Naval	 Ferroviaire	 Spatial
Surveillance des Aéroports et Bases Militaires <hr/> Patrouille des périmètres aéroportuaires Renseignement théâtre d'opération militaire	Surveillance des Ports, Docks et Chantiers Navals <hr/> Inspection des cargaisons Surveillance des navires	Surveillance des Tunnels et Chantiers <hr/> Exploration et cartographie des tunnels Inspection des voies Sécurisation des chantiers (Grand Paris)	Robots d'exploration spatiale <hr/> Collecte d'échantillons (Projet Artémis) Cartographie Exploration en essaim

Objectifs

Surveiller les tunnels

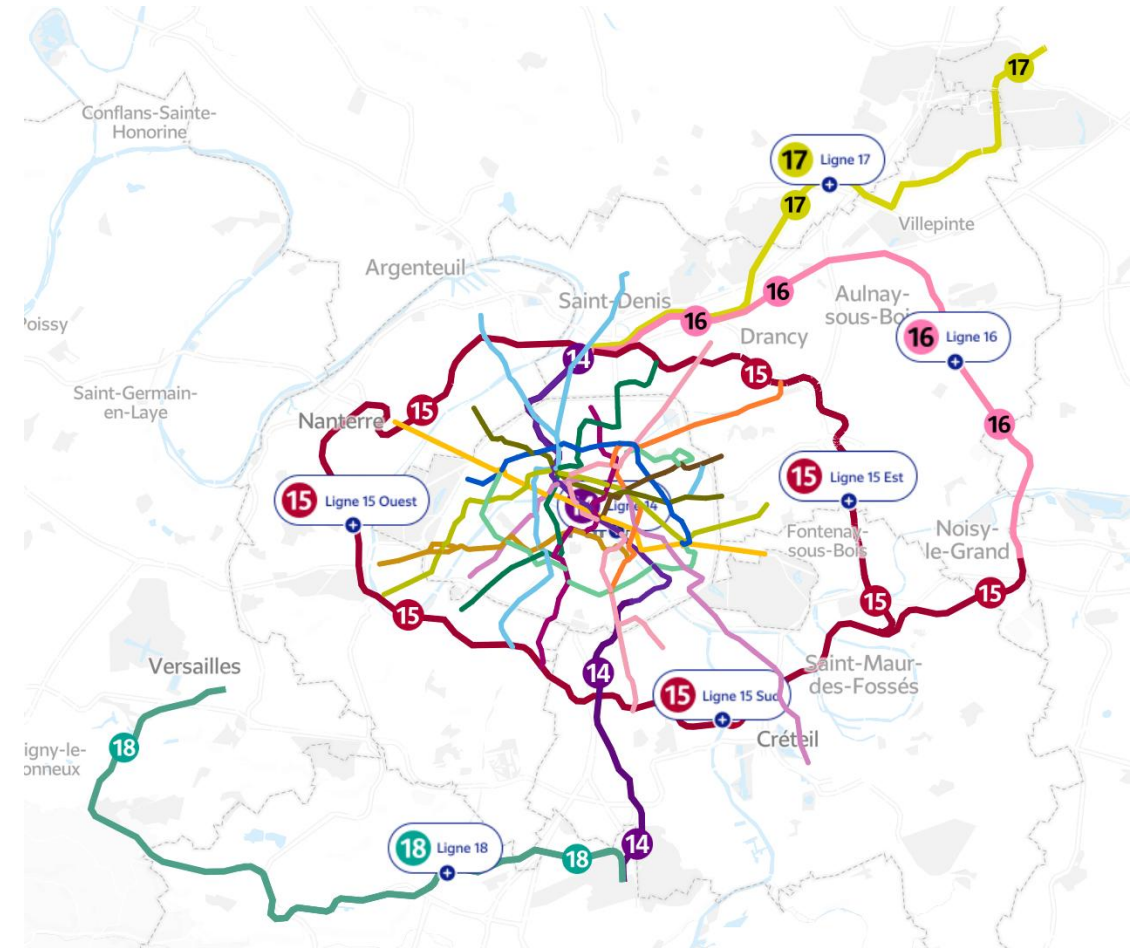
- Cartographie en temps réel
- Détection d'anomalie
- Détection actes malveillants

Inspection des Voies

- Détection de défauts des rails

Sécurisation des Chantiers

- Identification des risques
- Optimisation logistique
- Surveillance structurelle du génie civil




200
km de voie

90%
en souterrain

3M
voyageurs / jour

Pourquoi un essaim ?

 X1 à **10-18**km/h

 X30 à **10-18**km/h

Couverture à 100% en

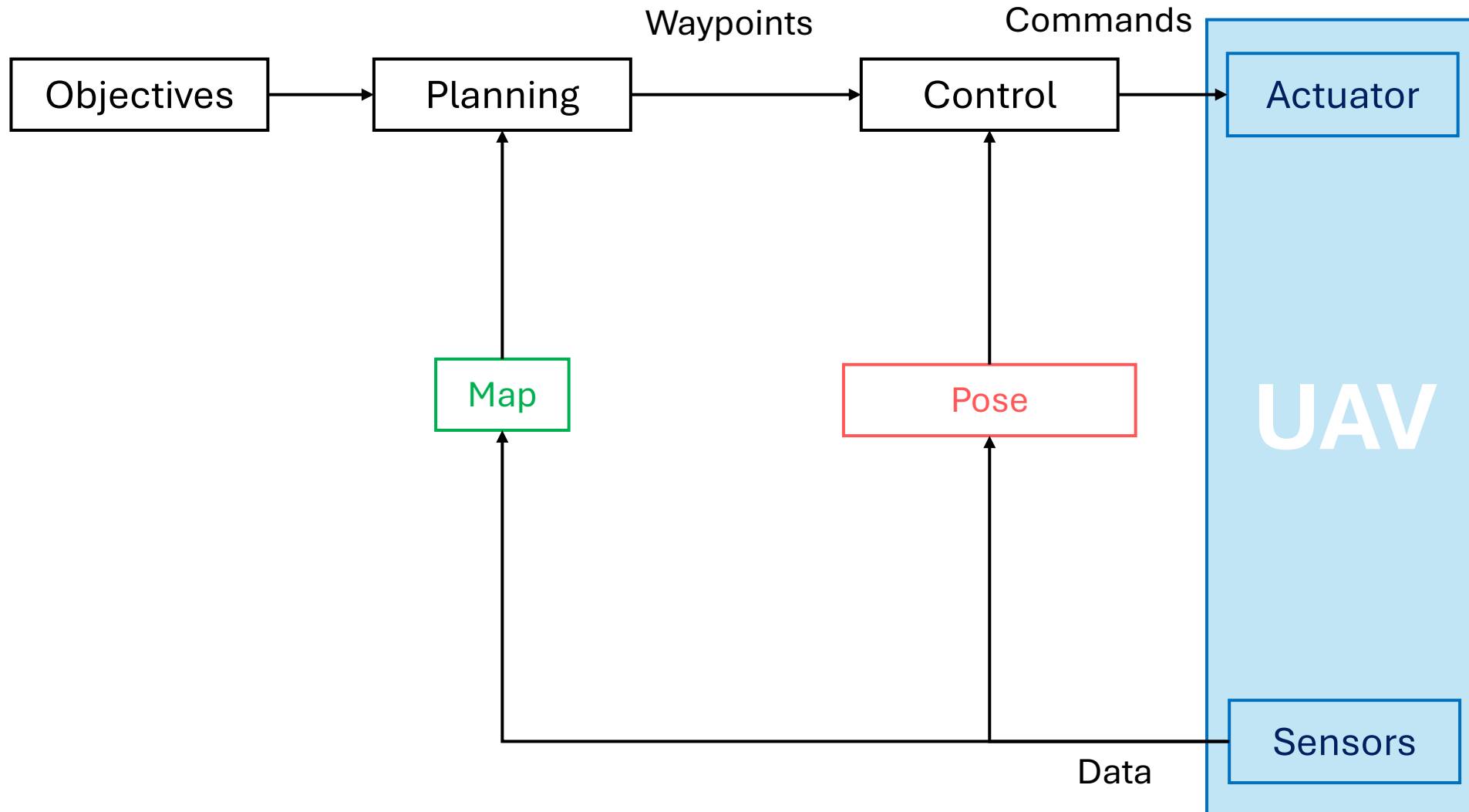
13h20min

Recharge Pause opérateur

Couverture à 100% en

0h27min

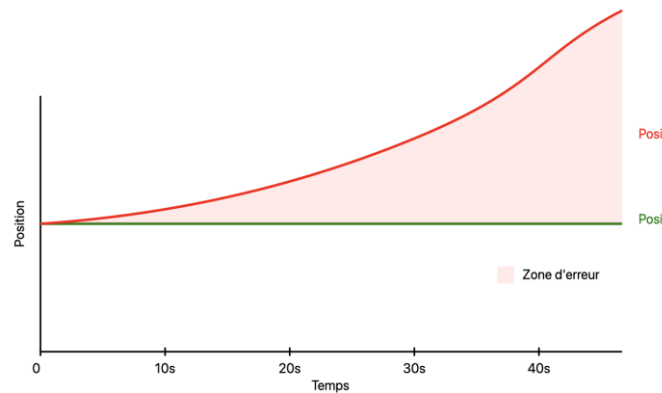
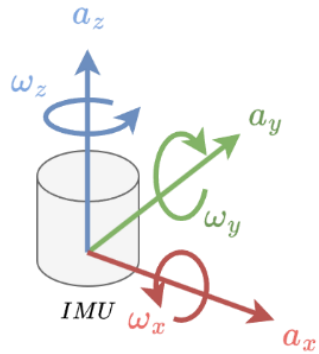
Rapide Couverture étendue



IMU

Inertial Measurement Unit

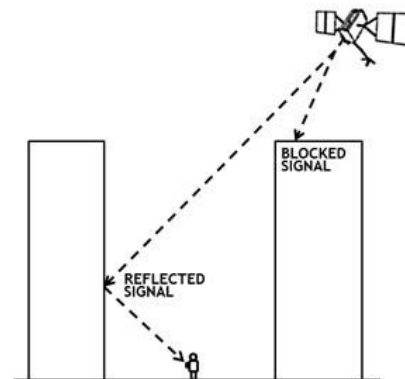
$$x_{estim}(t) = \int \int (a_x(t) + \varepsilon(t))$$



GNSS

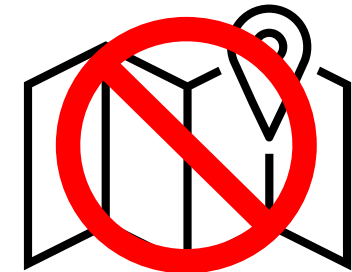
Global Navigation Satellite System

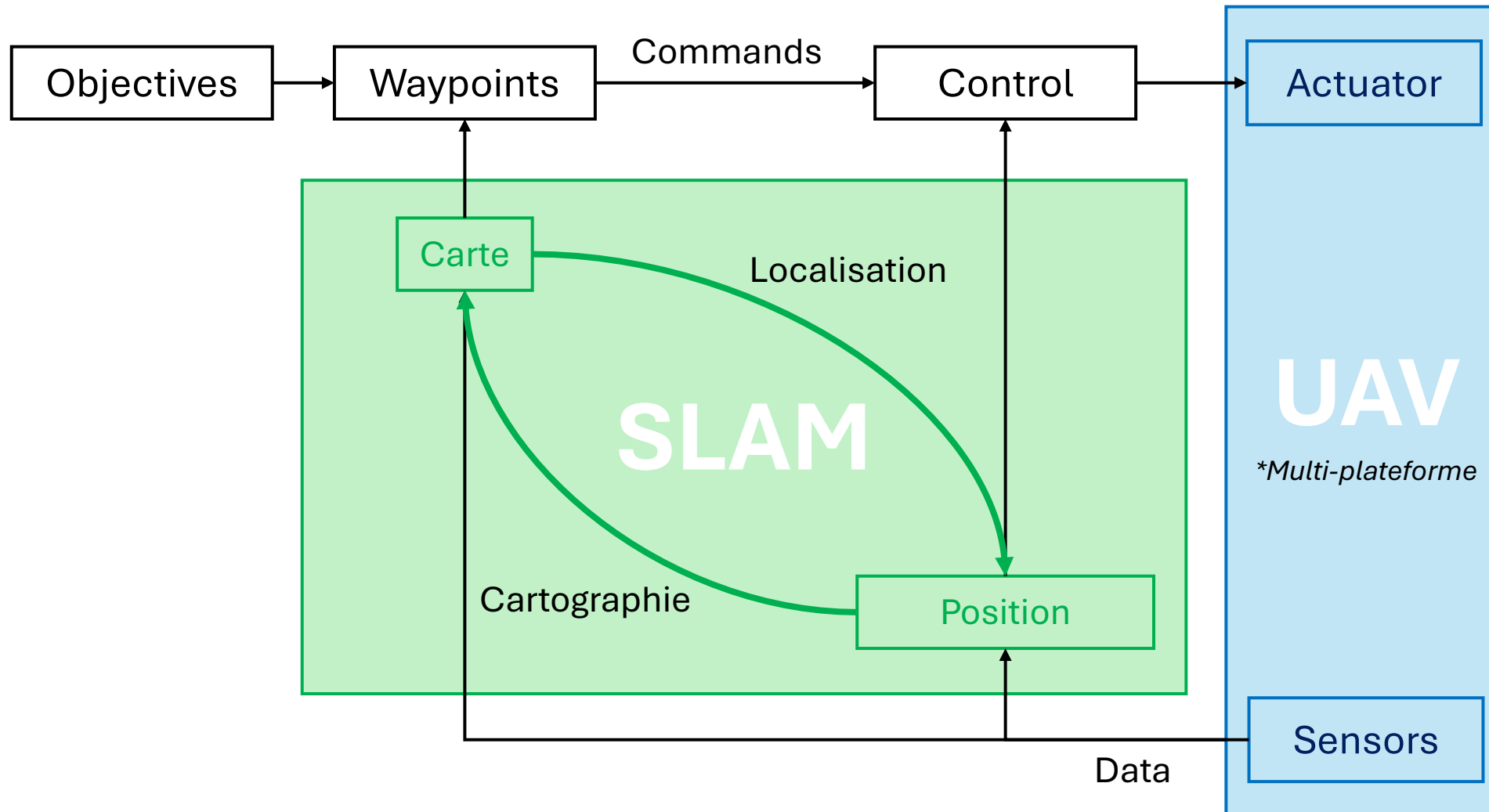
Tunnels, souterrains



HITL

Human In The Loop





SLAM

Simultaneous Localization and Mapping

Localisation collaborative sans GPS

Fusion de capteurs
Correction mutuelle
Navigation robuste
Objectif erreur $\leq 40\text{cm}$

Construction de la carte

Détection des obstacles
Utilisation des caméras
Cartographie partagée

Localisation en temps réel

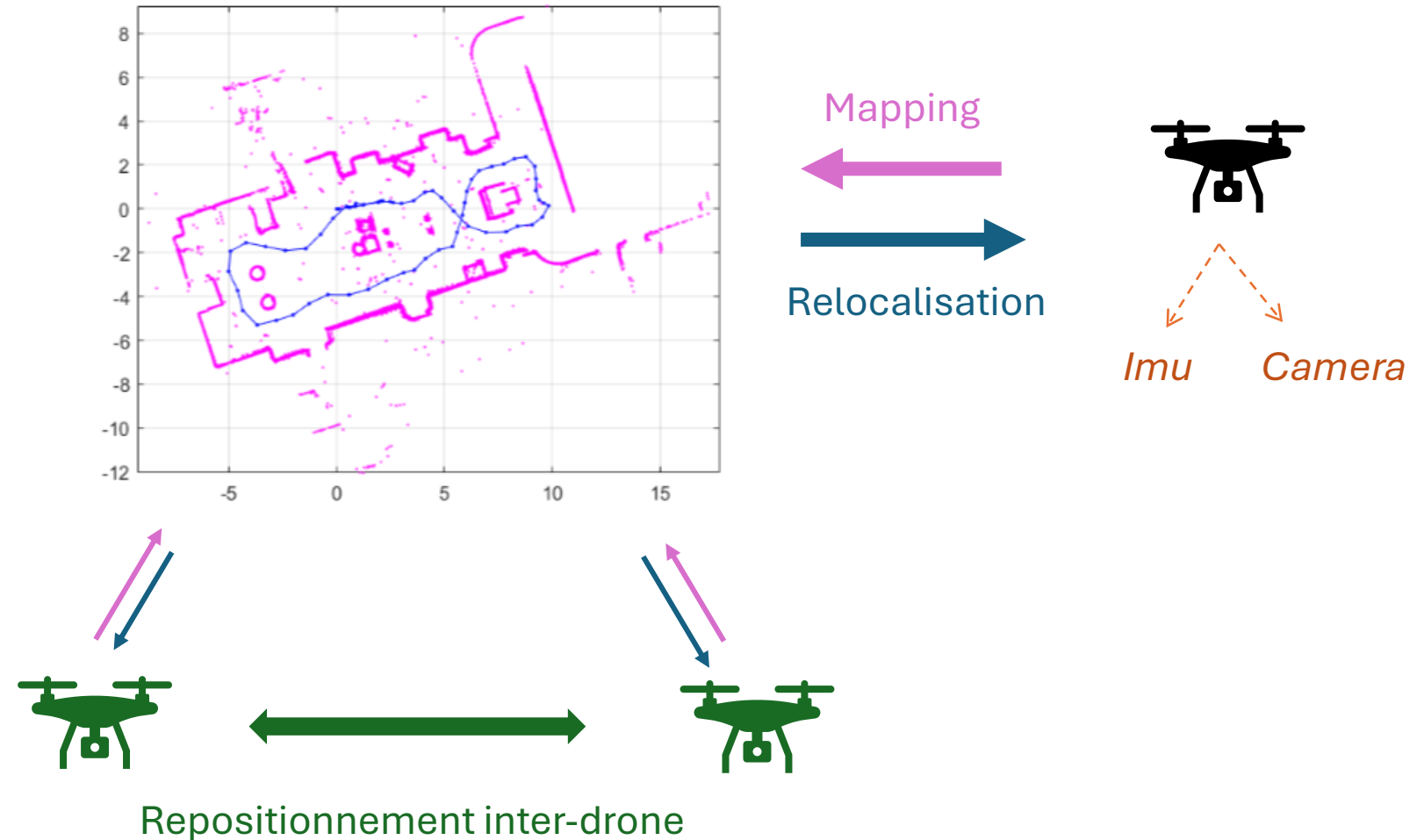
Comparaison continue
Suivi des déplacements
Évitement des obstacles

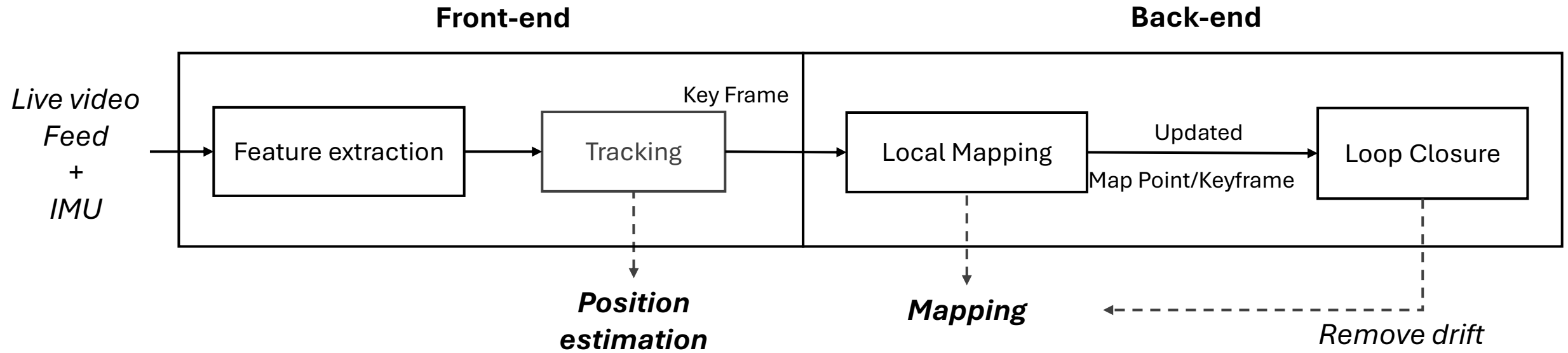
Objectif final

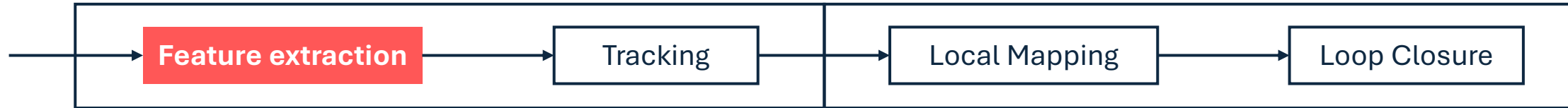
Génération et relocalisation en temps réel dans la carte

Essaim

- Couverture de zone plus large
- Gain en vitesse de création de la carte
- Gain en précision (redondance)







Feature extraction

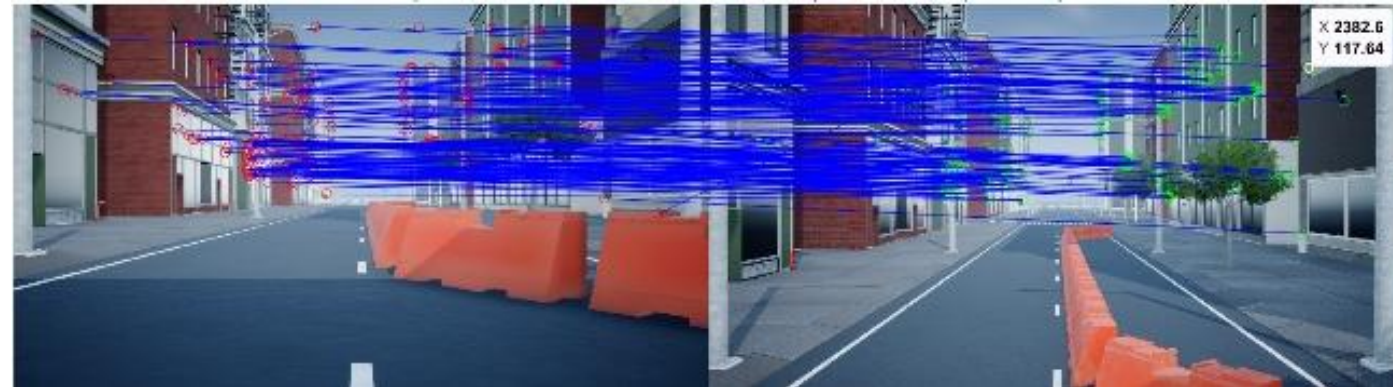
+ *Features descriptors*



Descripteur ORB (Oriented FAST and Rotated BRIEF)

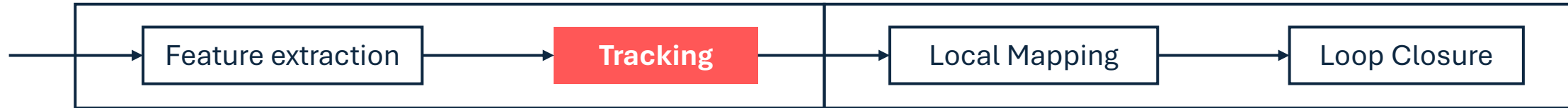
- *Real time*
- *Robuste à la rotation*
- *Non breveté*

Feature matching

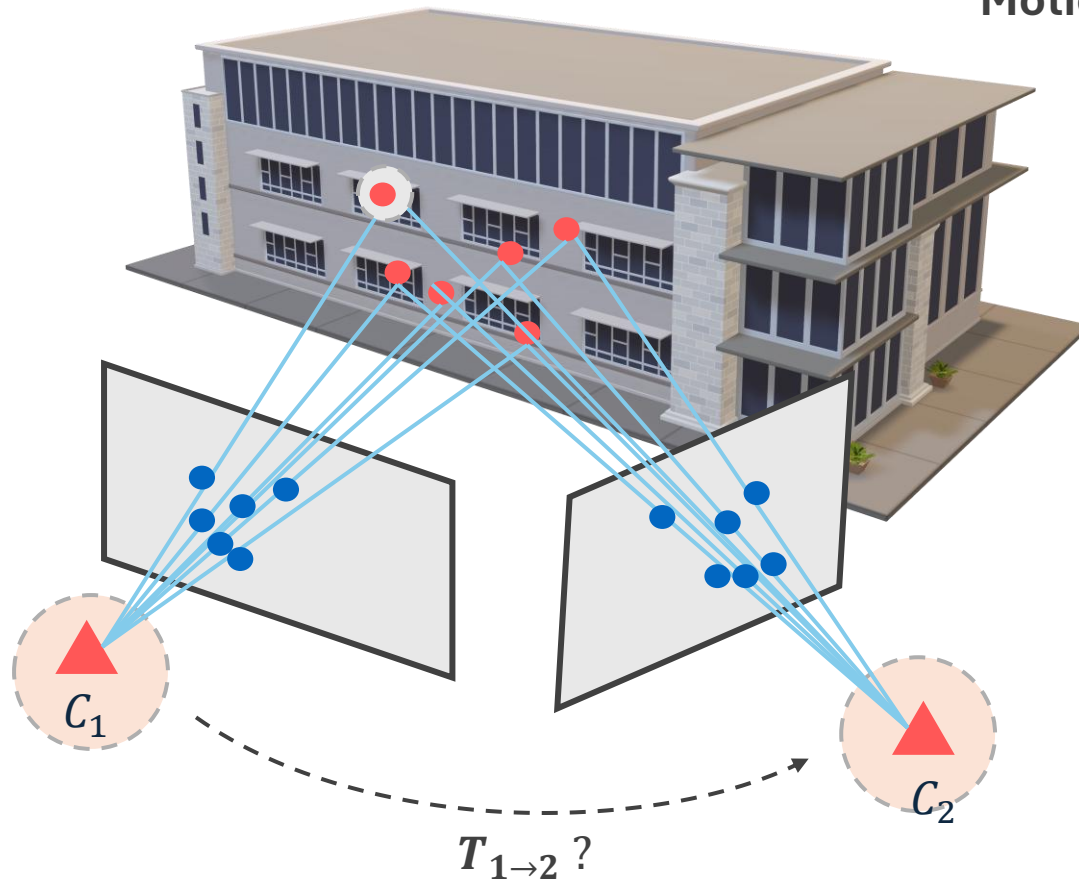


Correspondance entre frame 1 et 2





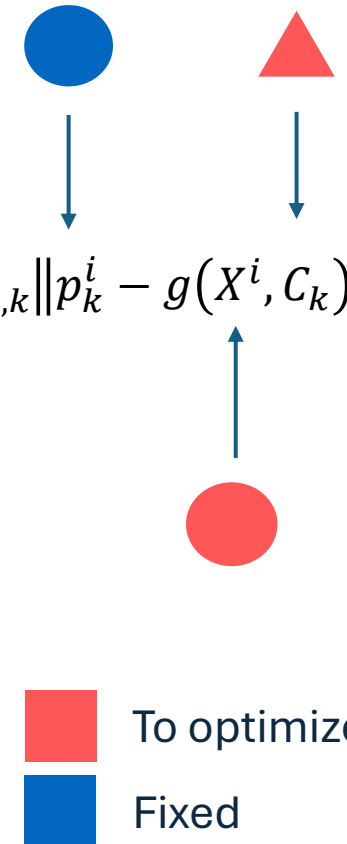
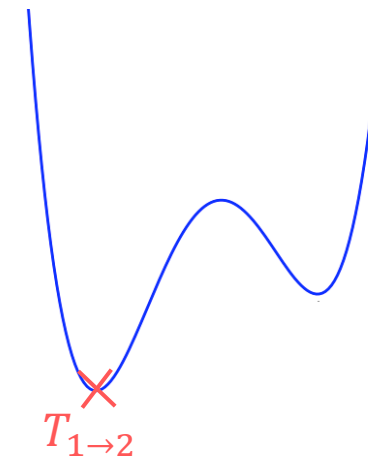
Motion estimation



Perspective-n-point & RANSAC

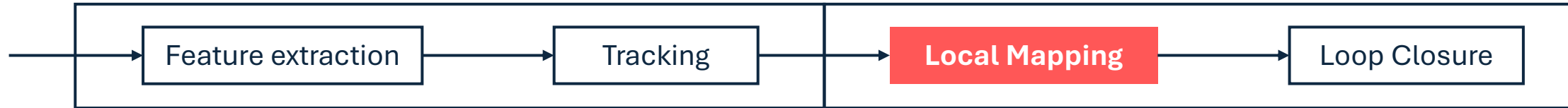
Bundle Adjustment

$$T_{1 \rightarrow 2} = \begin{bmatrix} R_{1 \rightarrow 2} & t_{1 \rightarrow 2} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \arg \min_{X^i, C_k} \sum_{i,k} \|p_k^i - g(X^i, C_k)\|^2$$

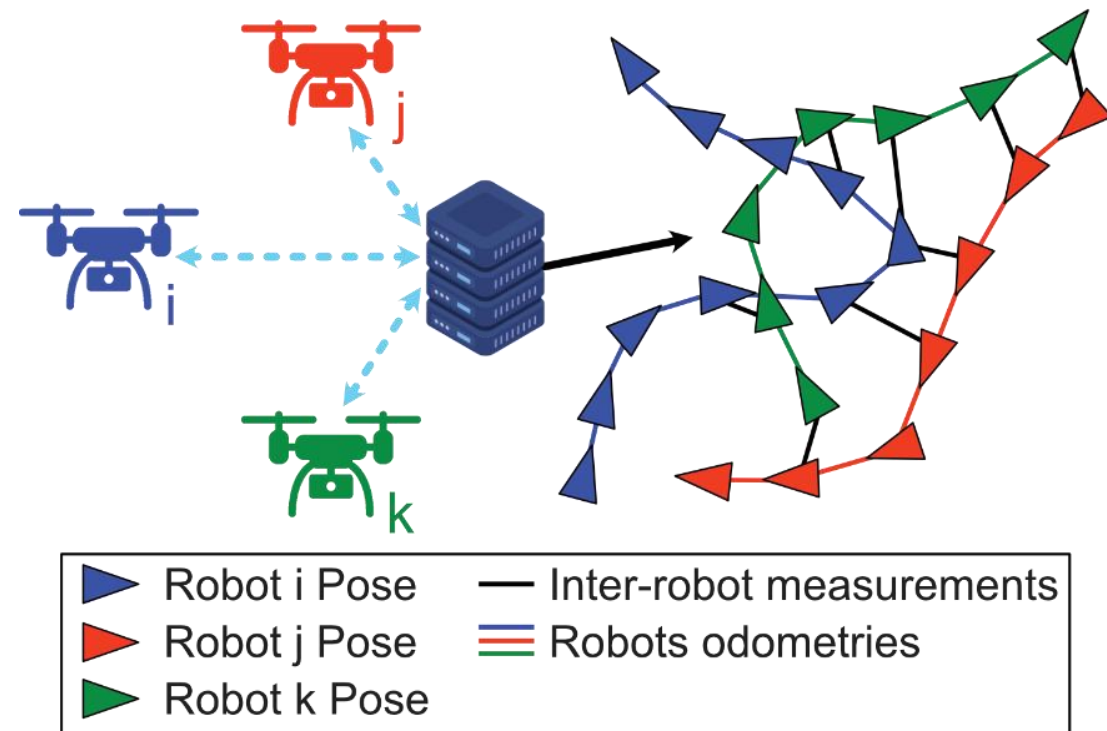
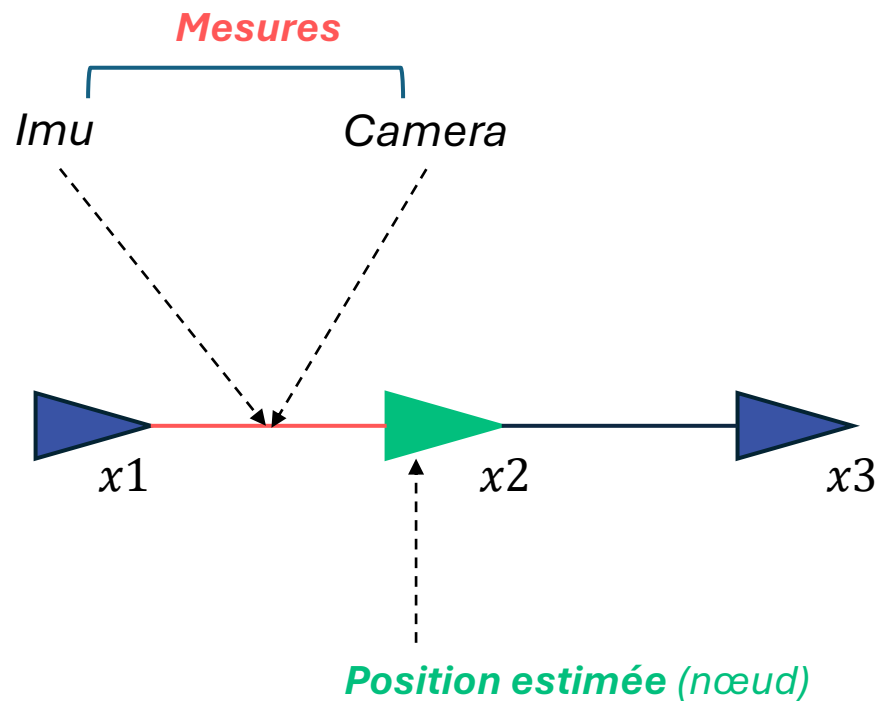


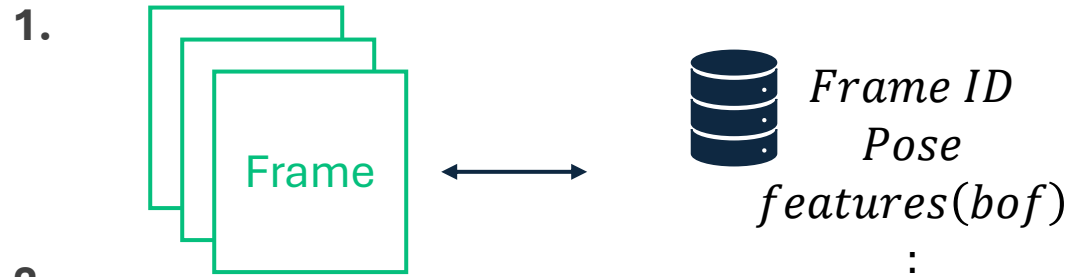
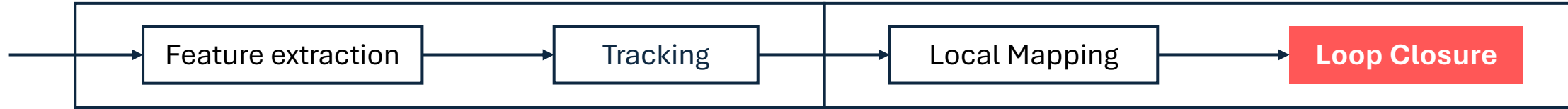
■ To optimize
■ Fixed

$g(X^i, C_k)$ = Projection of 3D-point X^i on the drone frame at position C_k



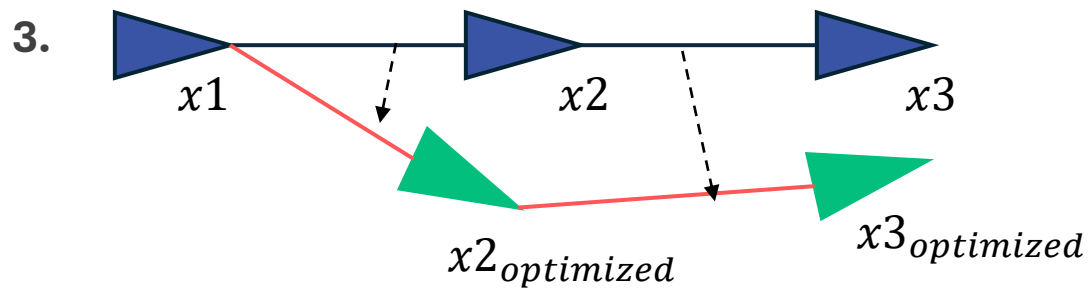
Local mapping & Factor Graph



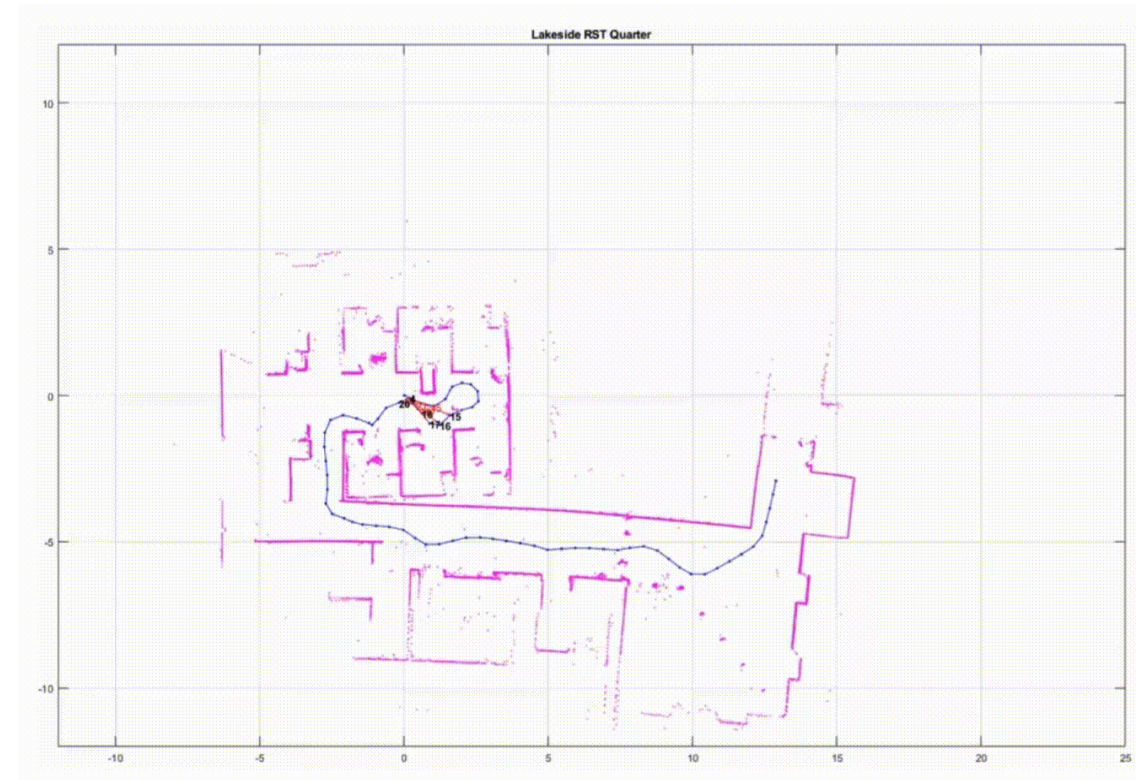


2.

$Correspondances\ Frame_{actuel} \& Frame_{Database} > Seuil$



Factor graph optimisé



Process

1

Agent Master

Cartographie de la zone avec un opérateur.

2

Server

Génération de la map via Visual inertial SLAM (**offline**).

3

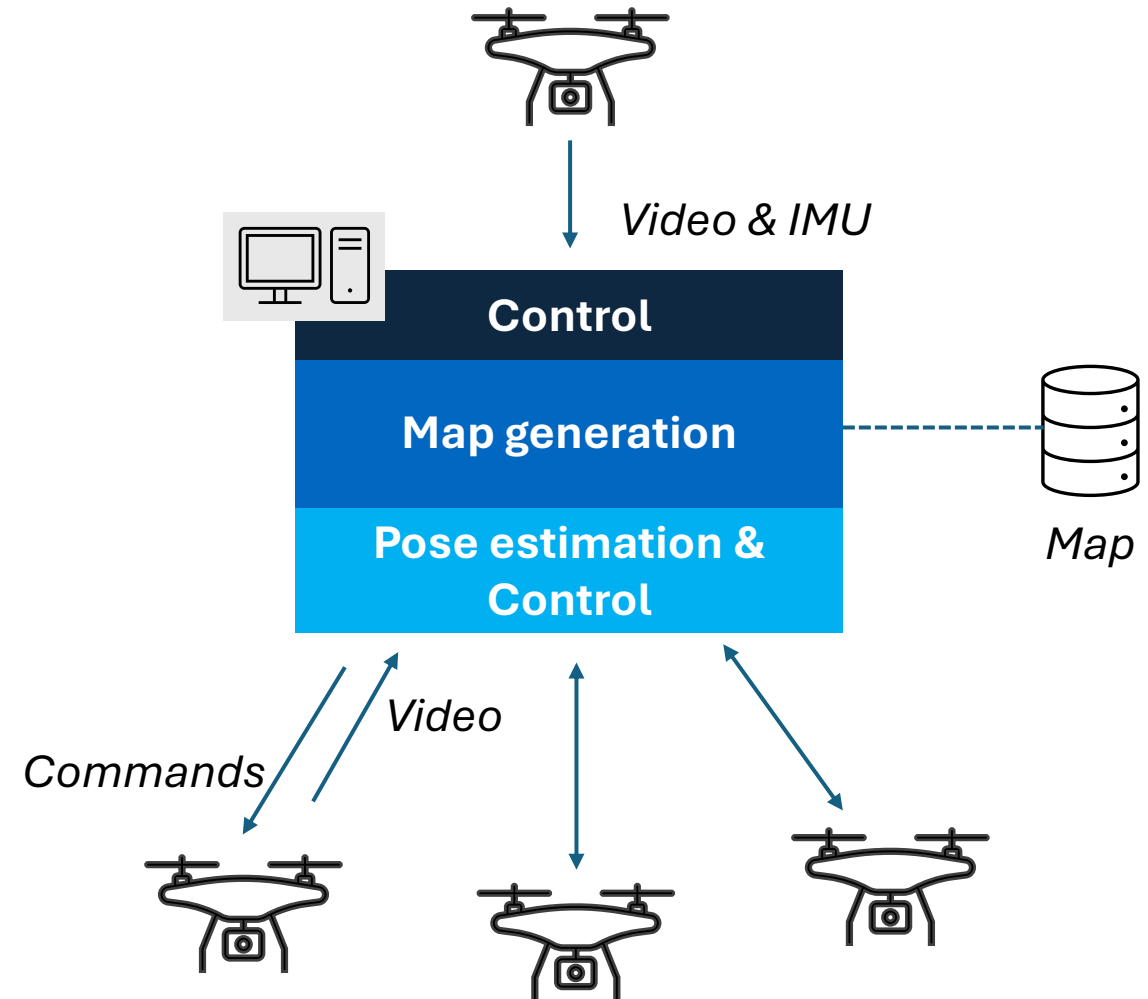
Secondary Agents (Multiple drones)

Navigation avec relocalisation en se basant sur la carte générée (**real time**).

Validation de la solution (*différents scénarios*),
vérifier la précision

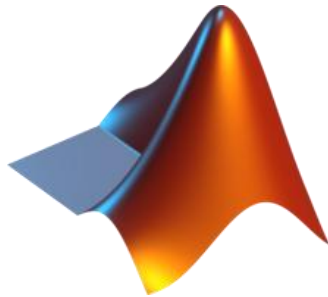
Erreur localisation $\leq 40\text{cm}$

* Spécifications Galileo High Accuracy Service



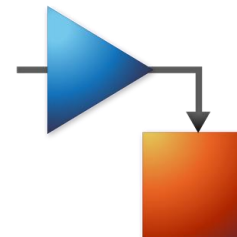
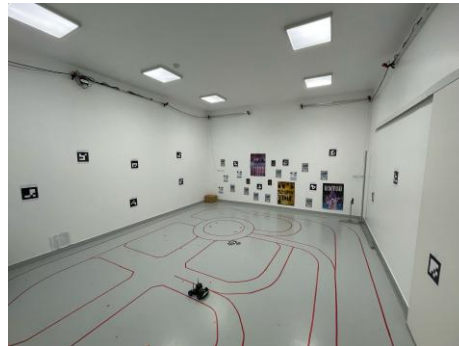
Conception

- Jumeau numérique
- Algorithme de contrôle
- Algorithmes de SLAM



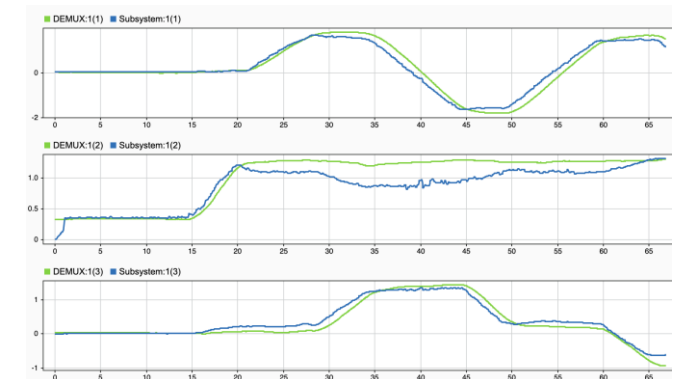
Expérimentation

- Test en simulation
- Tests en conditions réelles



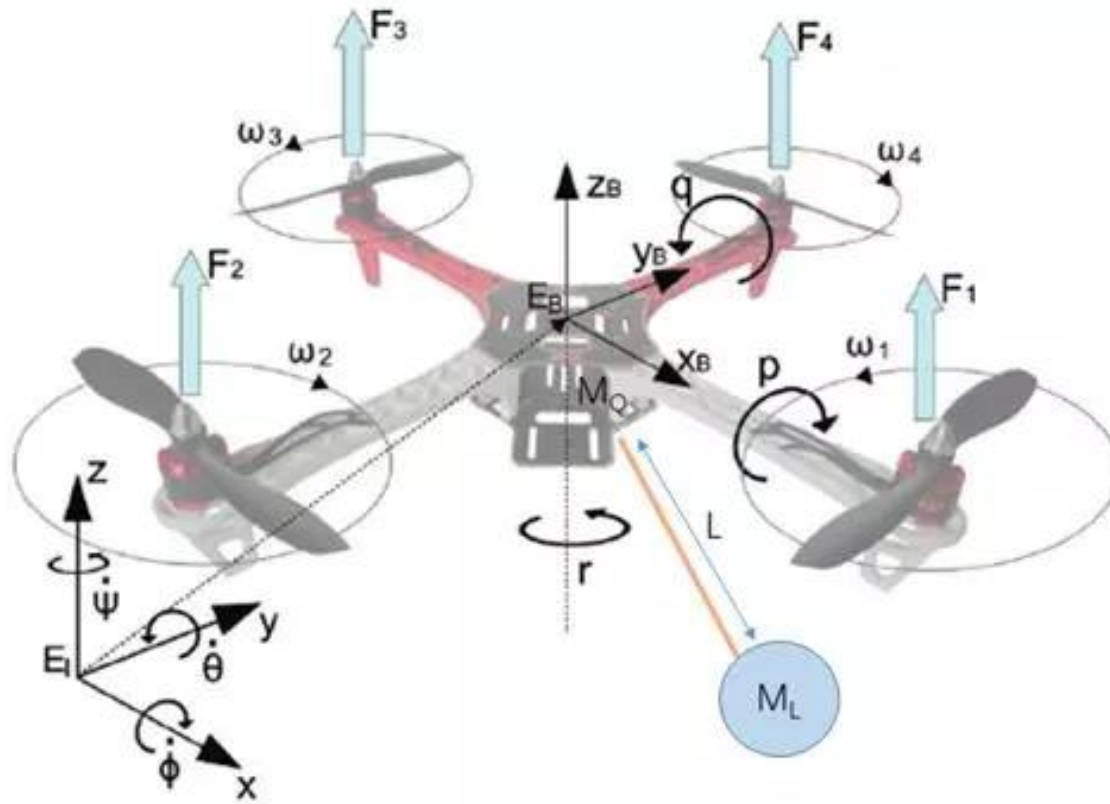
Validation

- Analyse des courbes
- Calcul de l'erreur
- Optimisation



Modélisation & Simulation

UAV virtuel, Algorithme de contrôle et de fusion des capteurs



- Aéronef à quatre rotors
- Manœuvrabilité élevée
- Capacité de vol stationnaire

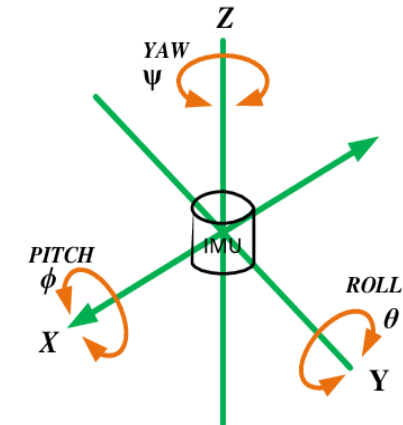
6 degrés de liberté

Translations linéaires :

$X Y Z$

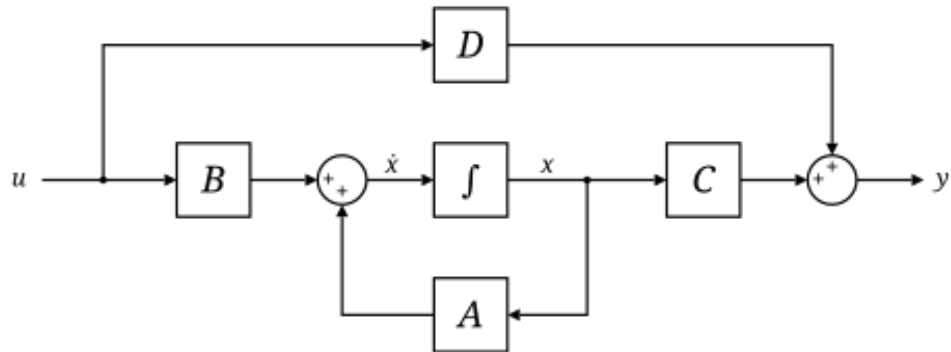
Rotations autour des axes :

- Roulis ϕ
- Tangage θ
- Lacet ψ



Son manque d'aérodynamisme le rend **intrinsèquement instable**, nécessitant un **contrôle actif**

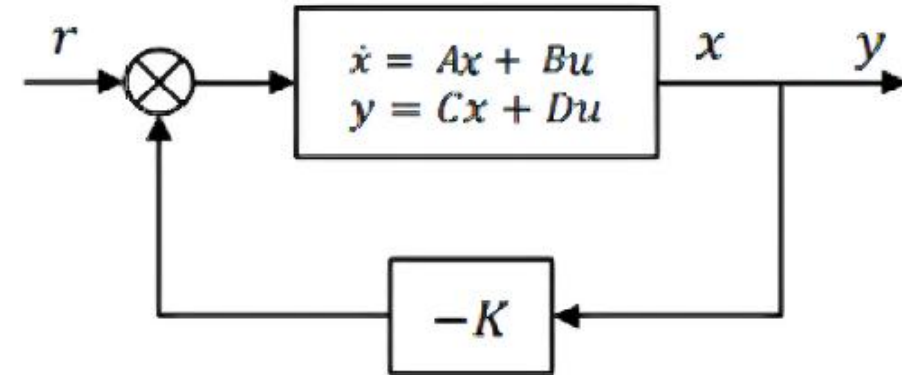
Représentation d'état



$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

- Modélisation de l'évolution des états
- Gestion des perturbations et entrées
- Adapté aux systèmes MIMO

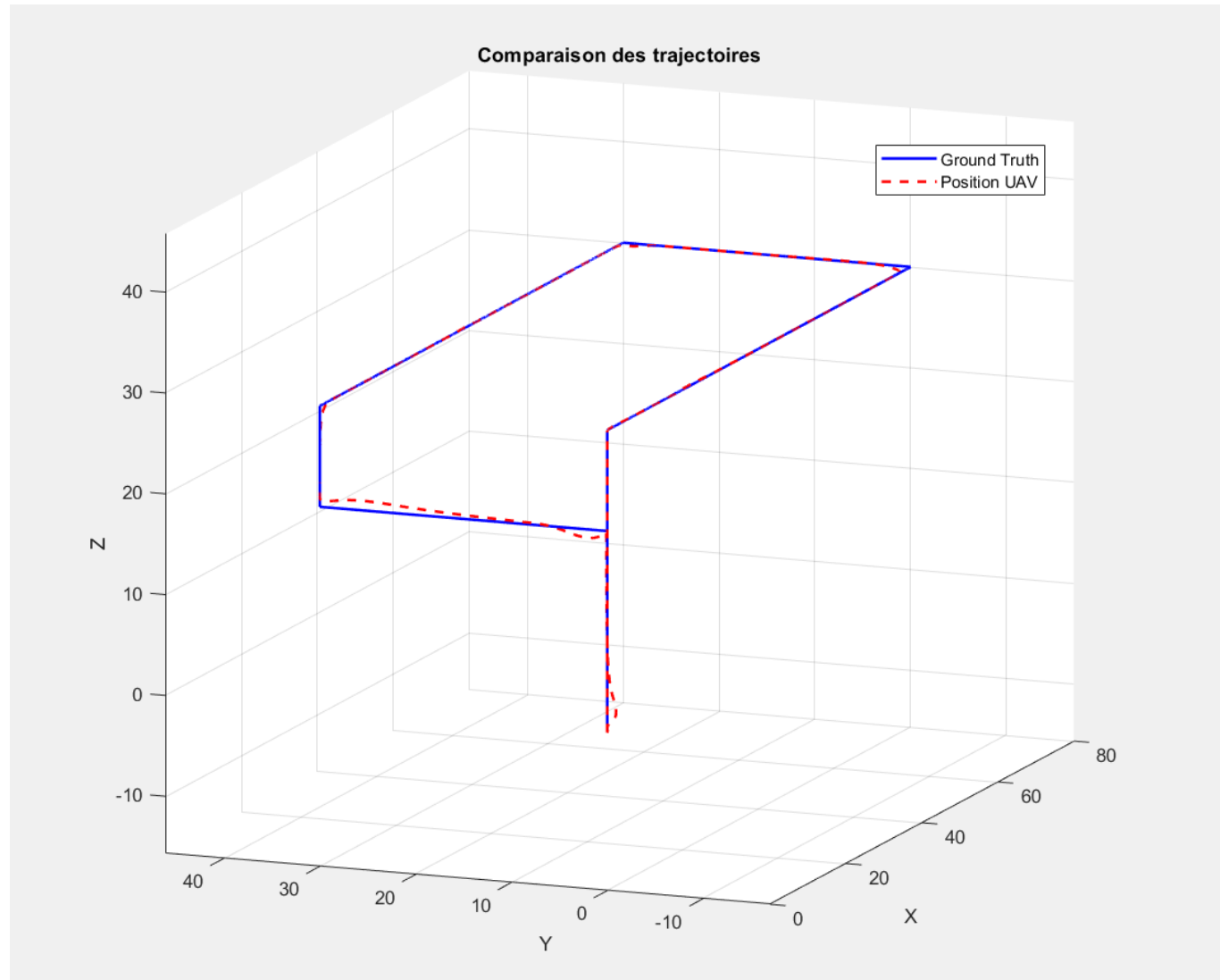
Régulateur Quadratique Linéaire



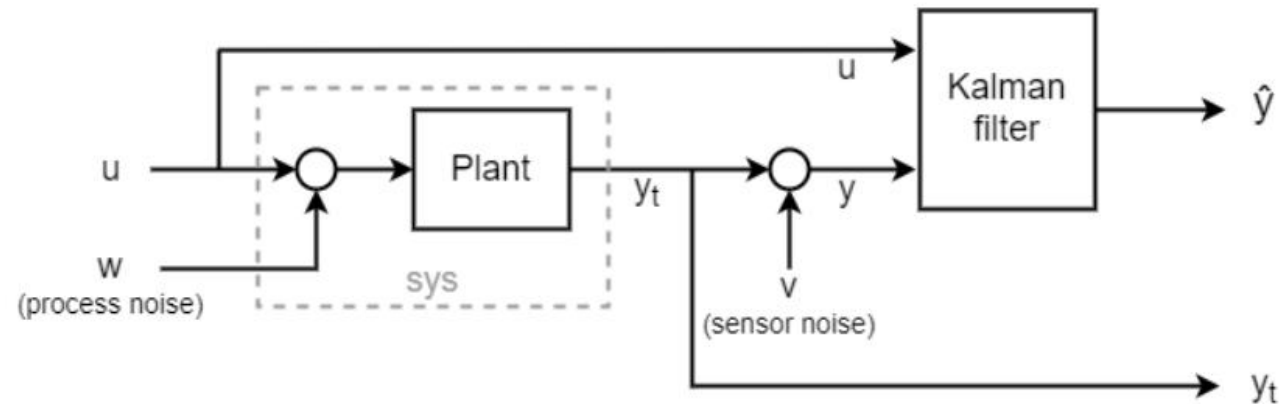
$$u = -Kx$$

K est la matrice de gain de retour d'état

- Optimisation de la stabilité
- Gestion des systèmes linéarisés
- Robuste aux perturbations



Filtre de Kalman



$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-)$$

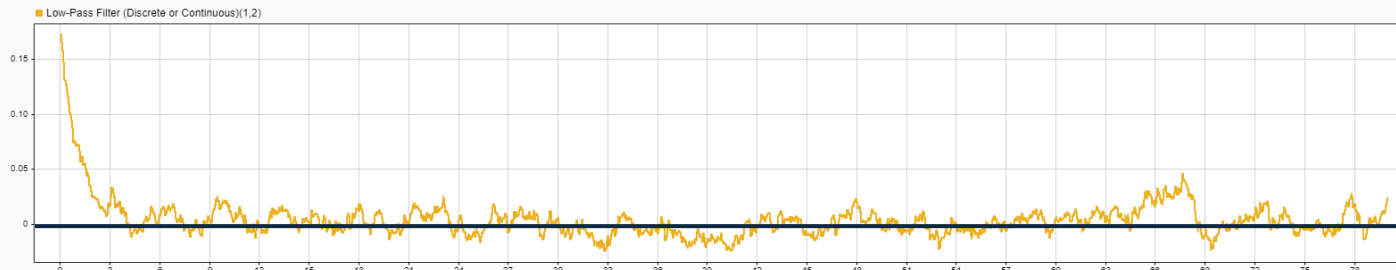
$$P_k = (I - K_k H) P_k^-$$

- **Fusion des données bruitées de l'IMU et du SLAM et du modèle mathématique** pour une estimation optimale.

Axe X
(m)



Axe Y
(m)



Axe Z
(m)



Validation

RMSE global < 15cm

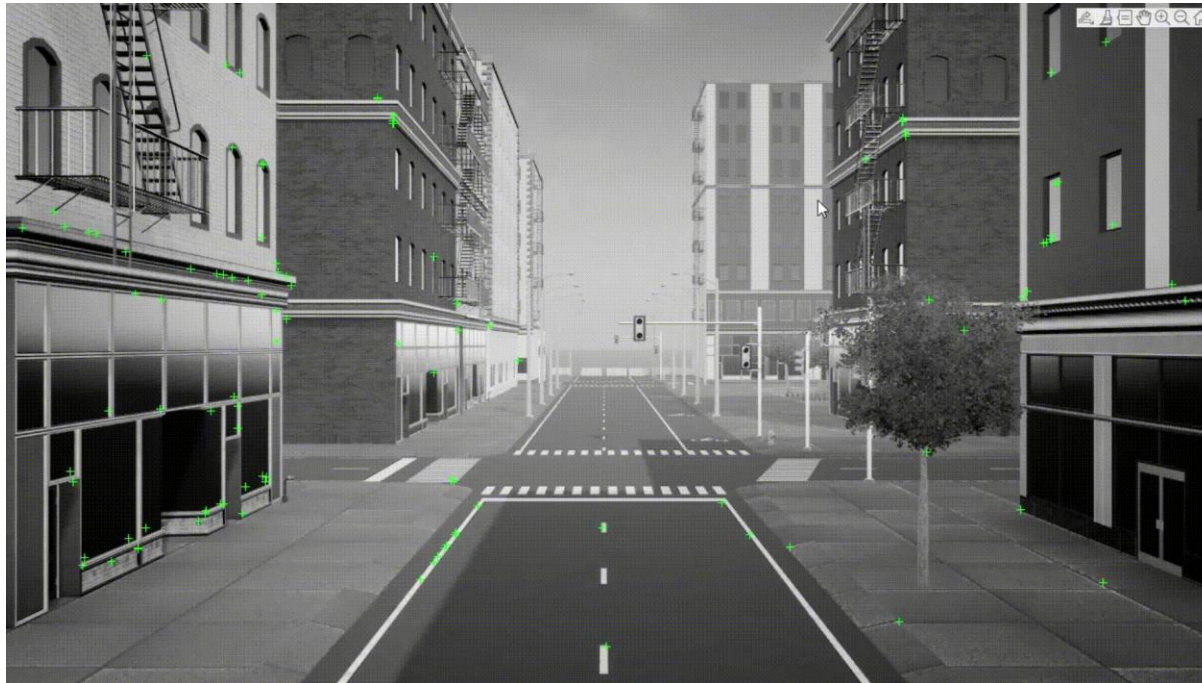
Métrique	Global	X	Y	Z
RMSE (m)	0.15	0.17	0.17	0.18
MAE (m)	0.17	0.17	0.17	0.17

Expérimentation et validation

Simulation et conditions réelles

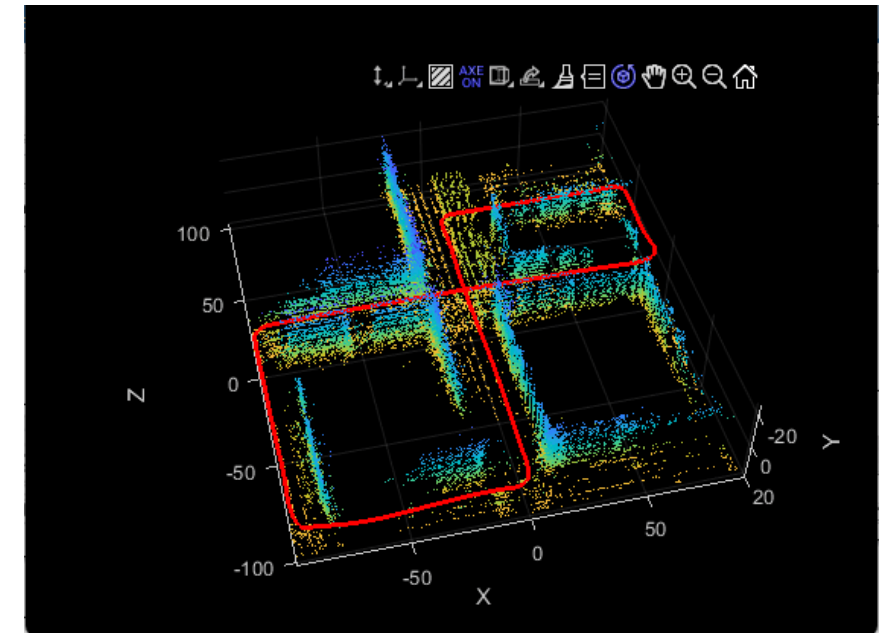
1

Master Agent



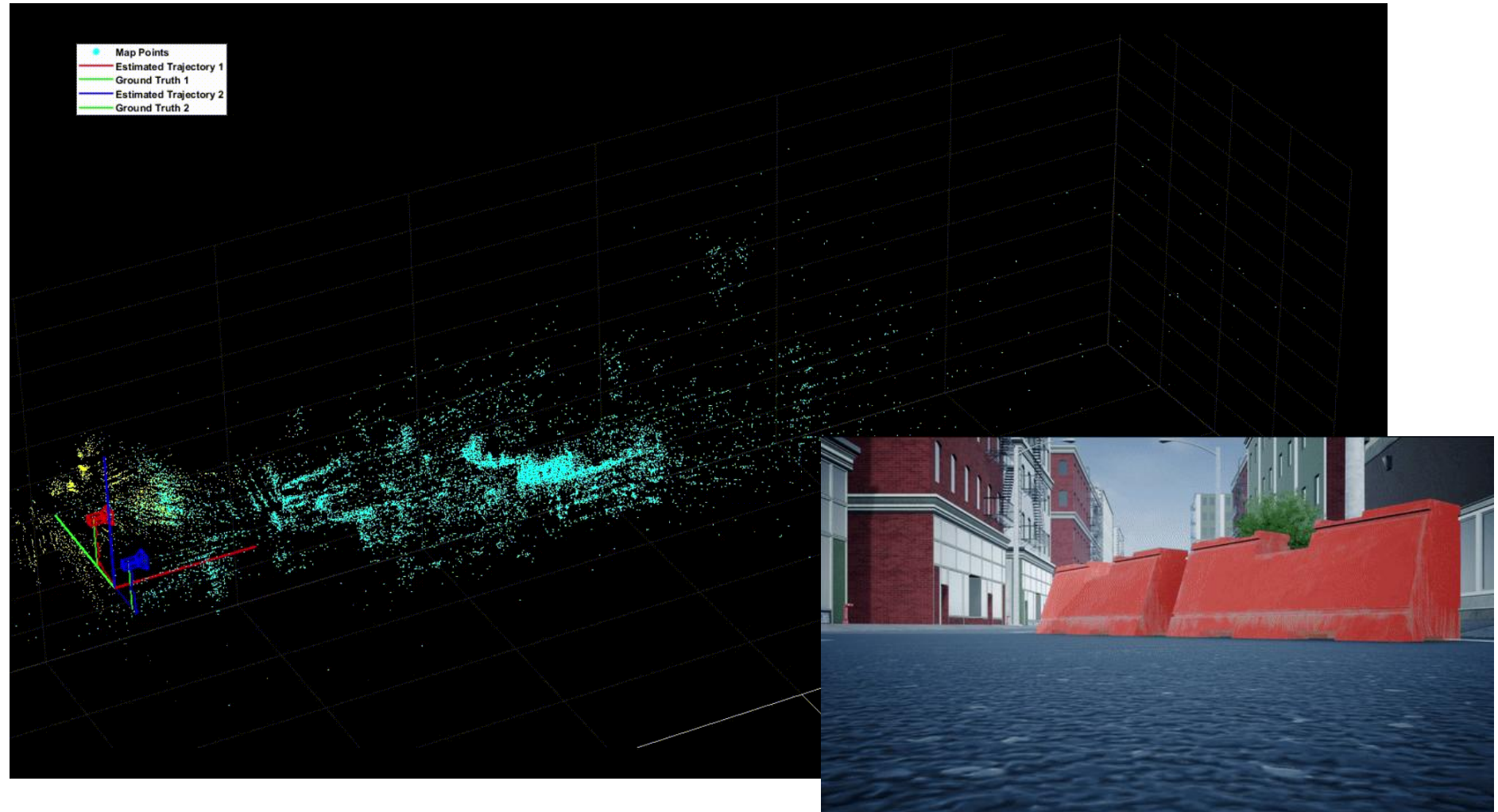
2

Map generation

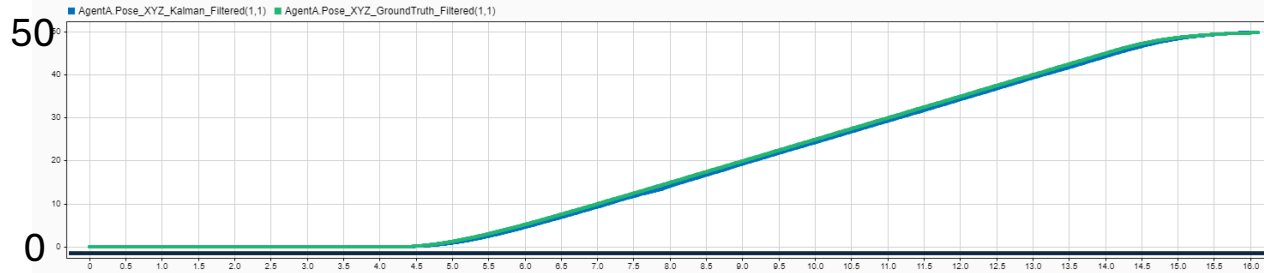


3

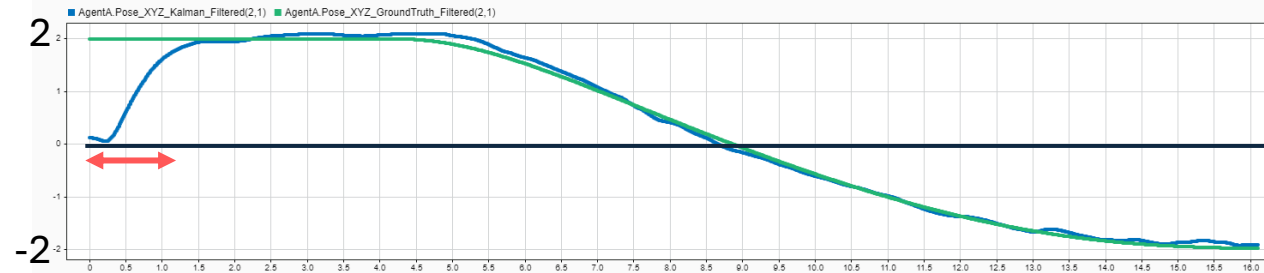
Vol de 2 drones (A et B) sans GPS et relocalisation temps réel



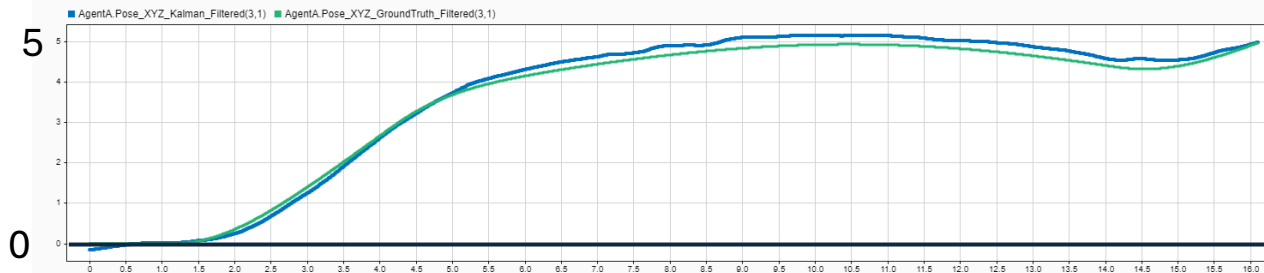
Axe X
(m)





Axe Y
(m)



Axe Z
(m)



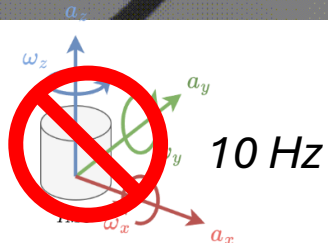
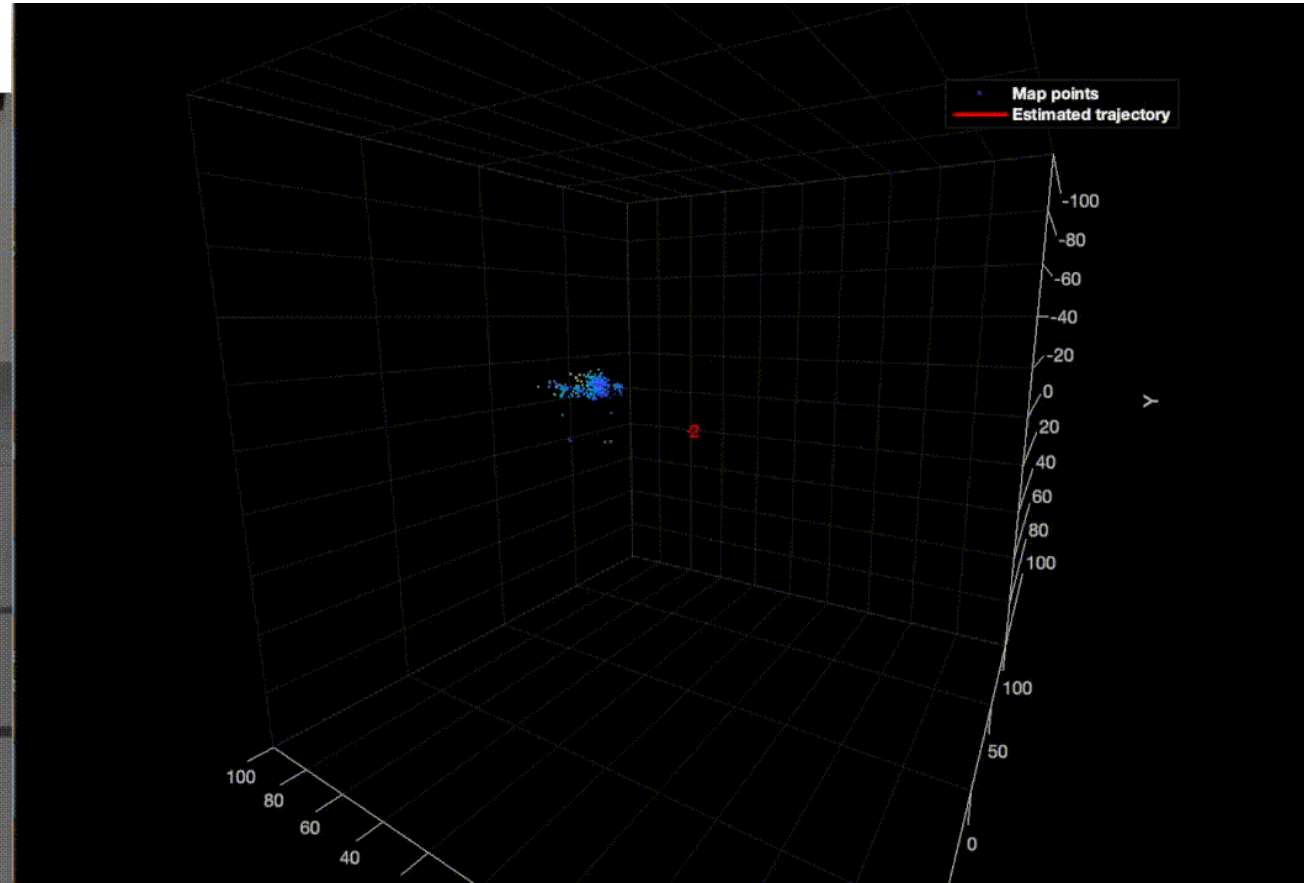
 **Ground truth**
 **Position Estimation**
 (Fusion of SLAM and IMU)

Validation

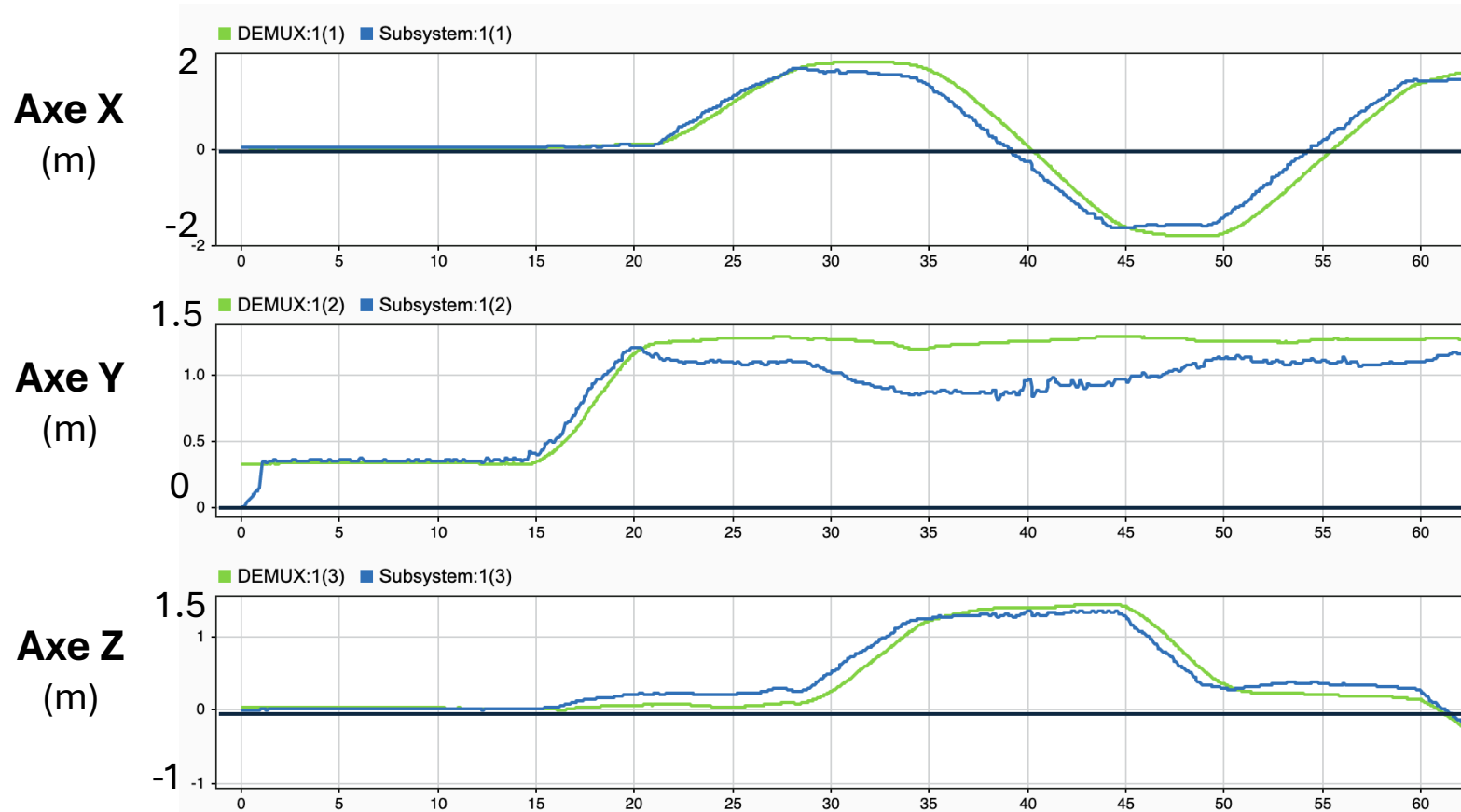
RMSE global < 40cm

50 meters path

Métrique	Global	X	Y	Z
RMSE (m)	0.34	0.56	0.08	0.18
MAE (m)	0.24	0.50	0.07	0.17
Max (m)	0.42	0.32	0.35	0.28
σ (m)	-	0.17	0.09	0.12



~1600 features (volière) \neq +6000 features (simulation)



— Ground truth

— Position Estimation
(Fusion of SLAM and IMU)

Validation

RMSE global < 40cm

7 meters path

Métrique	Global	X	Y	Z
RMSE (m)	0.20	0.20	0.24	0.16
MAE (m)	0.18	0.18	0.21	0.14
Max (m)	0.58	0.39	0.43	0.32
σ (m)	-	0.20	0.11	0.14

Conclusion

Bilan, objectifs courts et longs termes

Objectifs atteints

Collaboration asynchrone

- Cartographie offline
- Relocalisation temps réel
- Erreur en simulation et expérimentation correspond aux spécifications

Modélisation du drone

Contrôle temps réel avec LQR

Améliorations

Cartographie

→ Construction lente, manque de loop closures

Relocalisation inter-drone non finalisée

→ Premiers résultats prometteurs

Amélioration cartographie de la salle drone

→ Manque d'informations visuelles dans la volière de l'ESTACA Lab

Court terme

Collaboration **asynchrone** en conditions dégradées

- Luminosité restreinte
- Carte très changeante

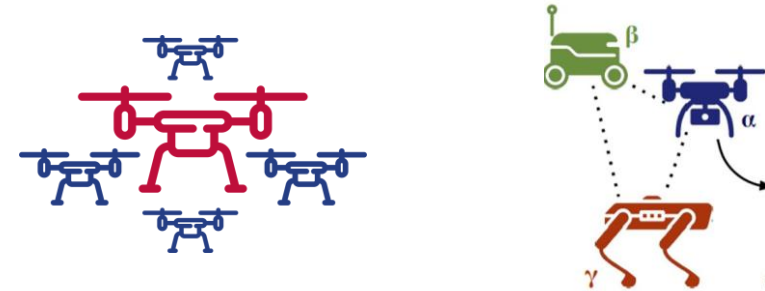
Fusion de plusieurs cartes



Embarquer l'algorithme de relocalisation dans le drone

Long terme

Collaboration **synchrone** en temps réel



Comportement d'essaim autonome

Portabilité pour essaim hétérogène

Contrôle plus robuste avec nMPC

Migrer/Expérimenter sur ROS2

Annexes

- Animations et illustrations : *Daniele Sportillo (Mathworks)*