

# **SLAM pour véhicules terrestres: évaluation des méthodes de l'état de l'art sur un véhicule instrumenté**

**Mohammed CHGHAF**

**Sergio RODRIGUEZ**

-

**co-encadrant de thèse**

**Abdelhafid EL OUARDI**

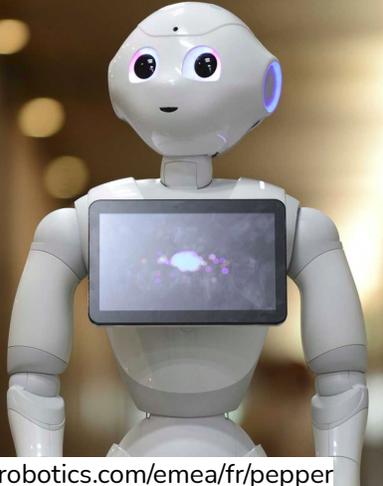
-

**Directeur de thèse**

- Contexte
- Processus SLAM et capteurs associés
- Evaluation du SLAM à base de vision
- Evaluation du SLAM à base de LiDAR
- Evaluation sur véhicule instrumenté du labo SATIE
- Verrous scientifiques
- Perspectives de fusion

# Applications du SLAM

**Intérieur**



Ref: <https://www.softbankrobotics.com/emea/fr/pepper>

**Extérieur**



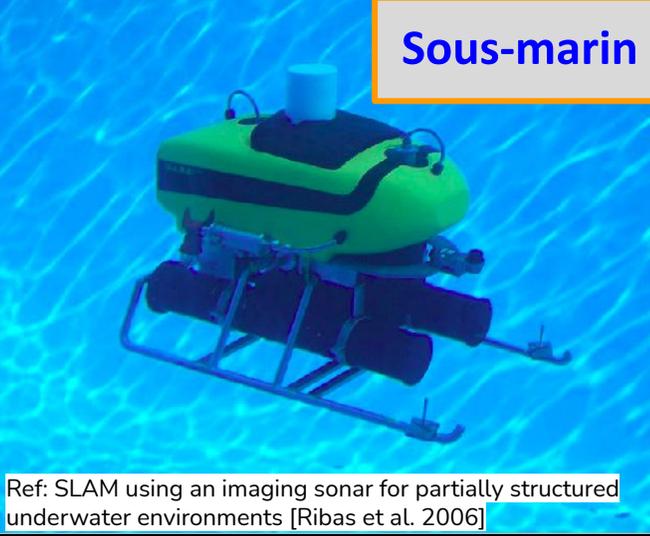
Ref: <https://asia.nikkei.com/Business/Startups/Self-driving-cars-face-long-road-despite-industry-raising-35bn>

**Spatial**



Ref: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Curiosity\\_\(rover\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Curiosity_(rover))

**Sous-marin**



Ref: SLAM using an imaging sonar for partially structured underwater environments [Ribas et al. 2006]

**Sous-terrain**



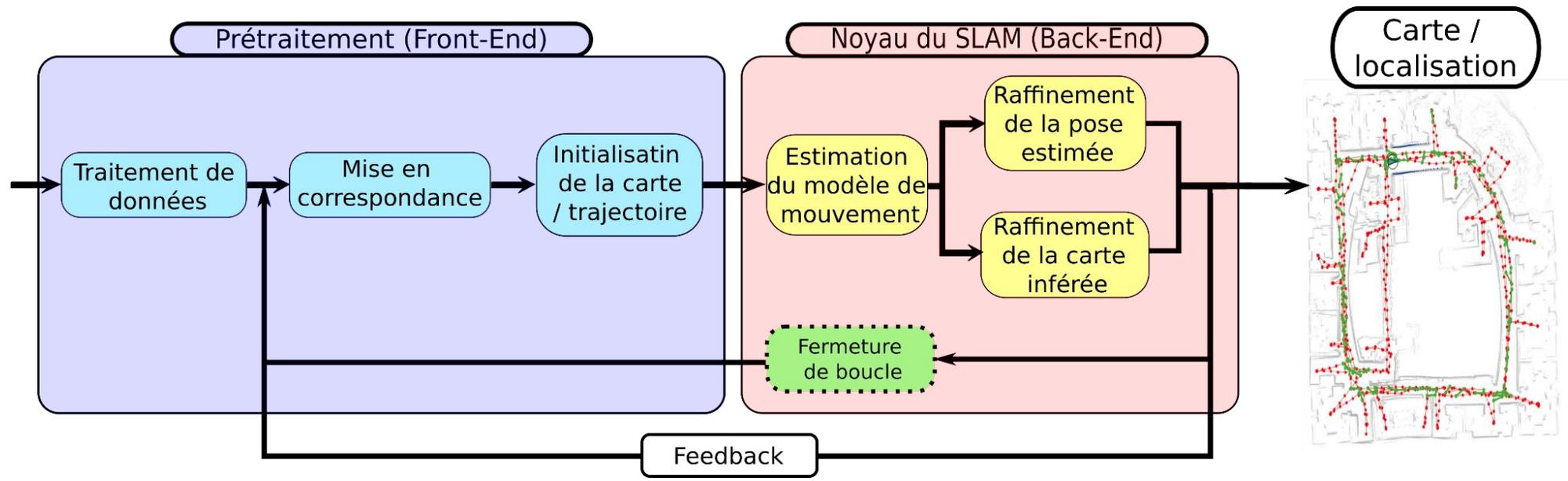
Ref: LAMP: Large-Scale Autonomous Mapping and Positioning for Exploration of Perceptually-Degraded Subterranean Environments [Ebadi et al. 2020]

**Aérien**



Ref: <https://www.euroweeklynews.com/2015/05/22/drones-inspect-power-lines-from-the-air/>

# Processus du SLAM



- Calibration
- Synchronisation
- Flexibilité

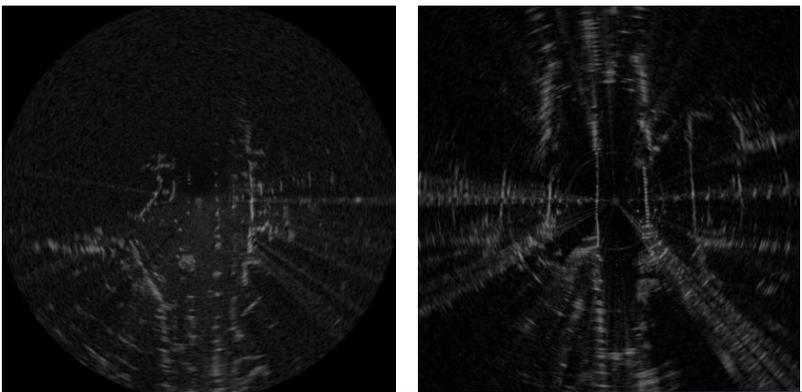
## Capteurs de positionnement actifs

<div style="font-size: 2em; color: green;">+</div> <div style="font-size: 3em; color: green;">}</div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande précision</li> </ul>	 <u>GNSS</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande précision</li> </ul>	 <u>Balises actives</u>
<div style="font-size: 2em; color: red;">-</div> <div style="font-size: 3em; color: red;">}</div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Faible fiabilité en milieu urbain</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé d'installation et de maintenance</li> </ul>	

## Capteurs proprioceptifs

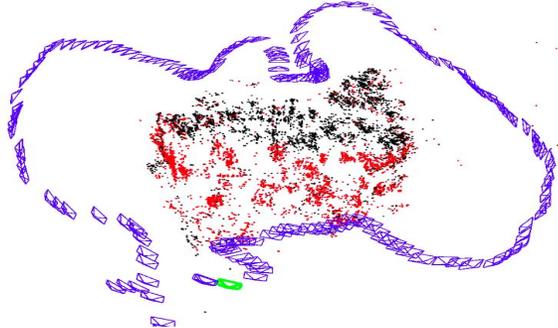
<div style="font-size: 2em; color: green;">+</div> <div style="font-size: 3em; color: green;">}</div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informations sur la position et l'orientation</li> </ul>	 <u>Odomètre</u>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informations sur l'accélération et la vitesse angulaire</li> </ul>	 <u>Capteur Inertiel</u>
<div style="font-size: 2em; color: red;">-</div> <div style="font-size: 3em; color: red;">}</div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dérive liée aux glissements</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dérive liée aux méthodes d'intégration</li> </ul>	

## Capteurs extéroceptifs

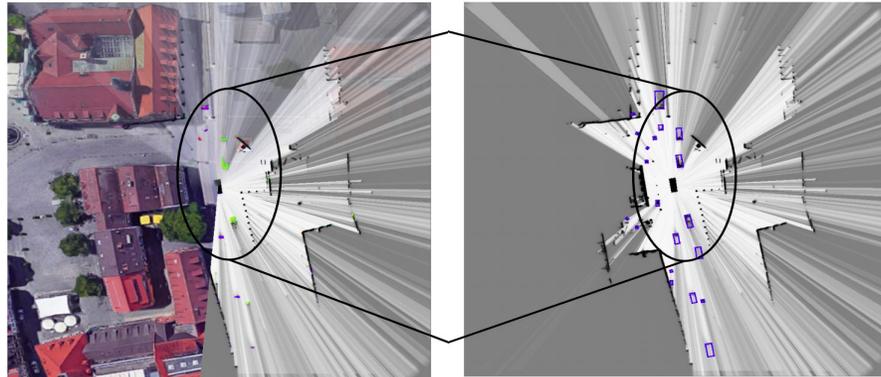
+	<p style="text-align: center;"><b>LiDAR</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grande précision de la télémétrie</li> <li>- Efficacité en absence de lumière</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Radar</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Robuste face aux changements météorologiques</li> <li>- Grande portée</li> </ul>	<p style="text-align: center;"><b>Caméra</b> </p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût faible</li> <li>- Grande quantité d'information</li> </ul>
-	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé</li> <li>- Densité de la carte reconstruite</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Données bruitées</li> <li>- Faible résolution</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mauvaise estimation de la profondeur</li> <li>- Portée de détection petite (Stéréo)</li> <li>- Parcimonie de la carte reconstruite</li> </ul> 

# Types de cartes

## Cartes métriques

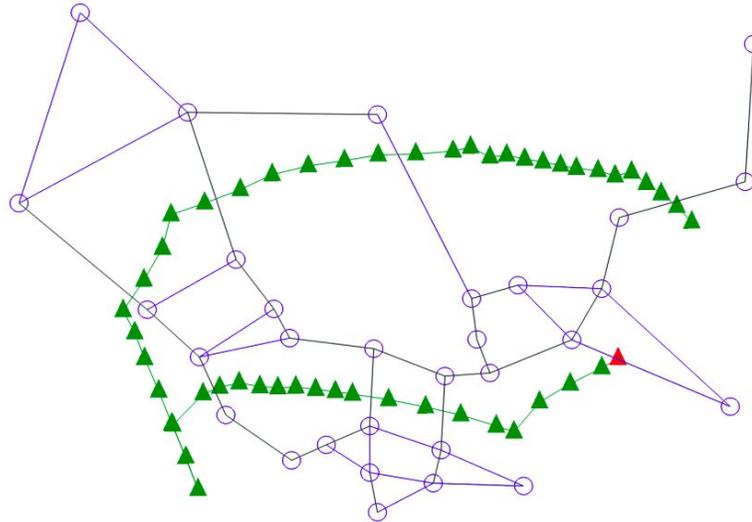


«ORB-SLAM2: An open-source SLAM system for monocular, stereo, and rgb-d cameras.» [Mur-Artal et al., 2017]



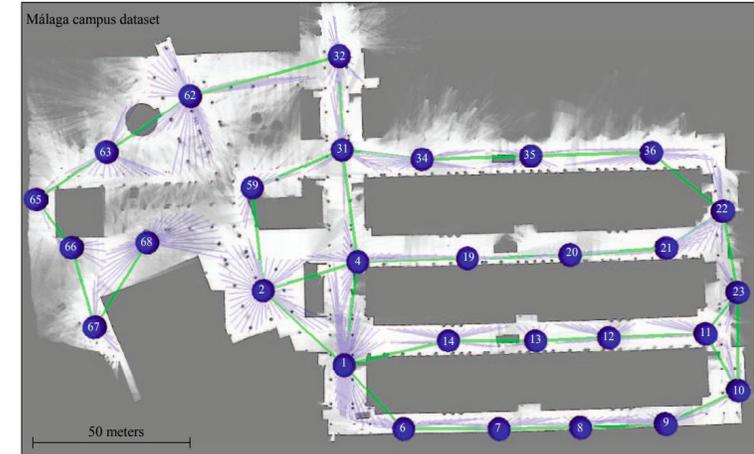
«Object detection on dynamic occupancy grid maps using deep learning and automatic label generation.» [Hoermann et al., 2018]

## Cartes qualitatives



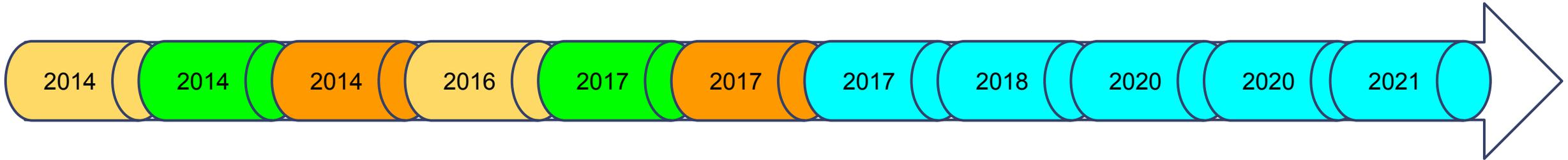
«Qualitative relational mapping and navigation for planetary rovers.» [McClelland et al., 2016]

## Cartes hybrides



«Toward a unified Bayesian approach to hybrid metric-topological SLAM.» [Blanco et al., 2008]

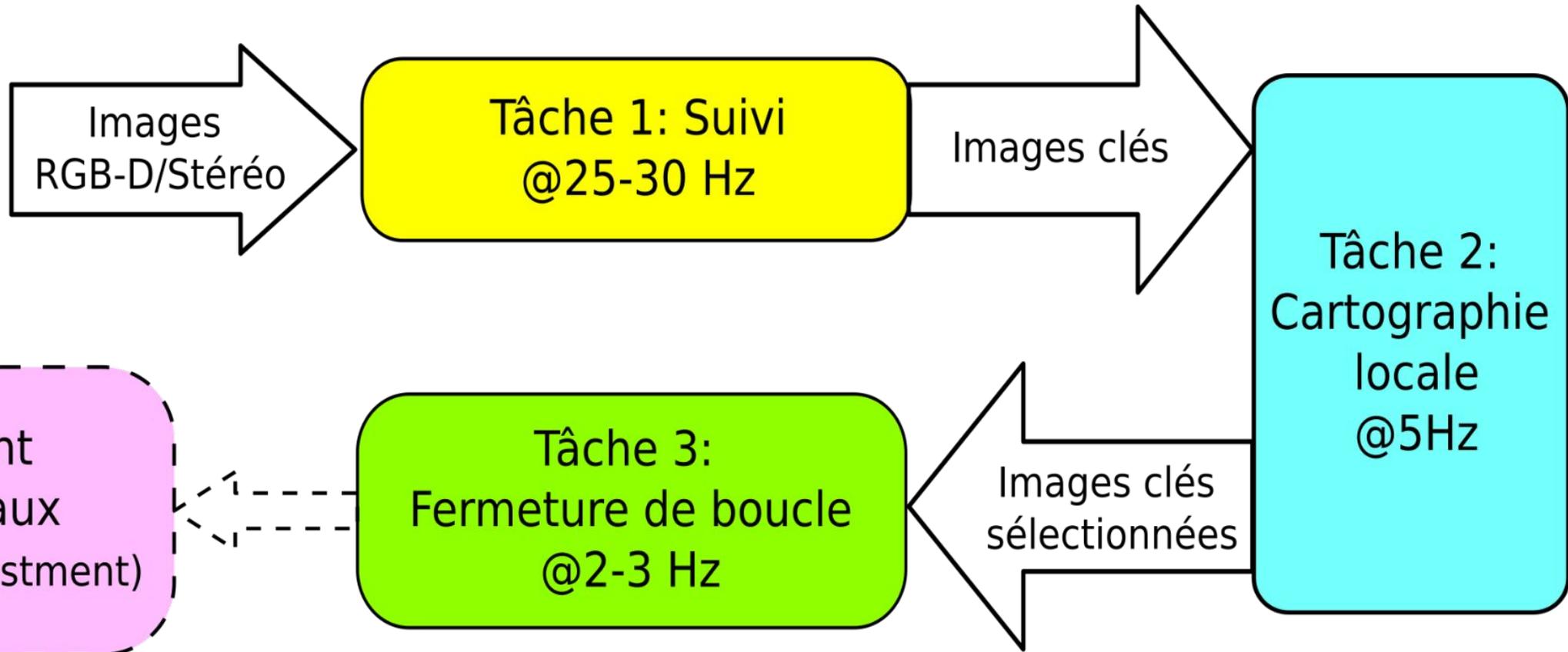
# SLAM à base de Vision



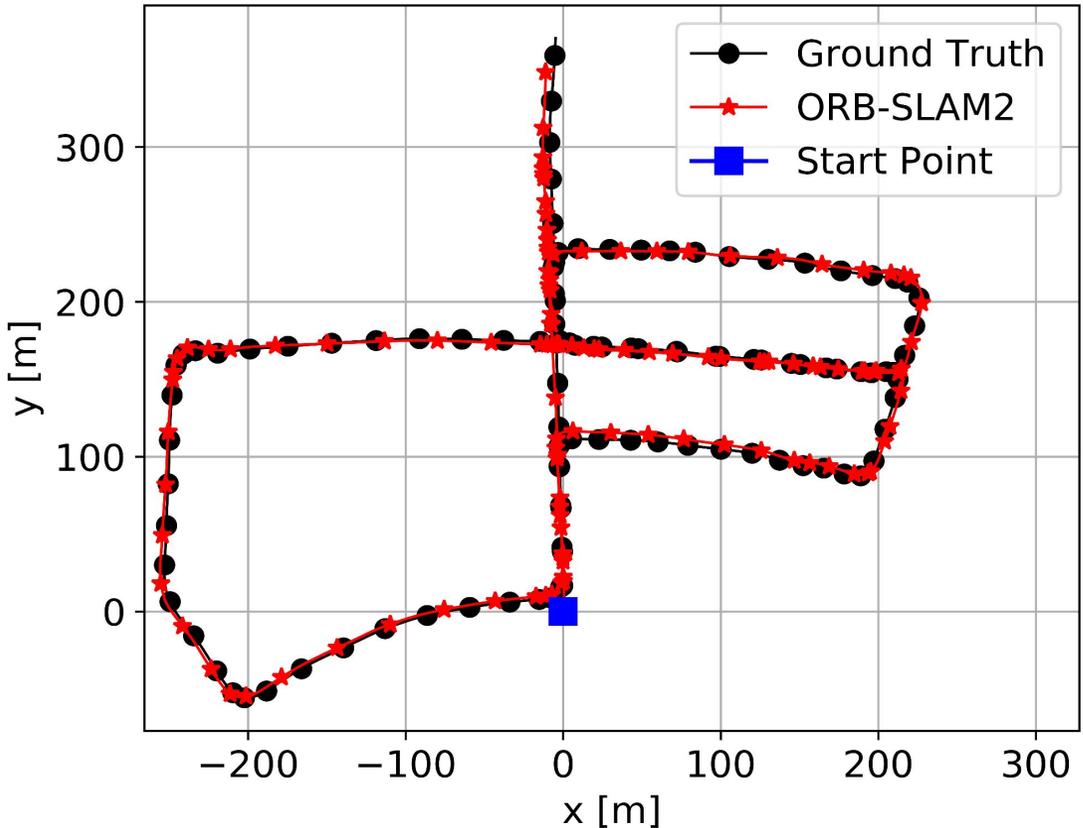
Approches	Références	Avantages	Inconvénients
<b>À base de points d'intérêt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ORB-SLAM3 [Campos et al., 2021]</li> <li>DM-SLAM [Cheng et al., 2020]</li> <li>D3VO [Yang et al., 2020]</li> <li>SOFT-SLAM [Cvisic et al., 2018]</li> <li>ORB-SLAM2 [Mur-Artal et al., 2017]</li> </ul>	Taille, poids, consommation et coût faibles	Sensibilité à la lumière et aux textures
<b>Directe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>DSO [Engel et al., 2017]</li> <li>SVO [Forster et al., 2014]</li> </ul>	Carte semi-dense, pas besoin de détection de points d'intérêt	Coût de calcul élevé, étalonnage photométrique
<b>RGB-D</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>RGB-D SLAM [Li et al., 2017]</li> <li>Autonomous flight using RGB-D camera [Huang et al., 2014]</li> </ul>	Carte dense, détection de la profondeur directe	Adaptée aux environnements intérieurs, faible portée, sensible à la lumière
<b>Événementielle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reconstruction and tracking with event camera [Kim et al., 2016]</li> <li>Event-based 3D SLAM [Weikersdorfer et al. 2014]</li> </ul>	Fréquence d'images "infinie"	Capteur cher, détecte uniquement les changements

«Camera, LiDAR and Multi-modal SLAM Systems for Autonomous Ground Vehicles: a Survey» [Chghaf et al., en cours de révision]

## Processus ORB-SLAM2

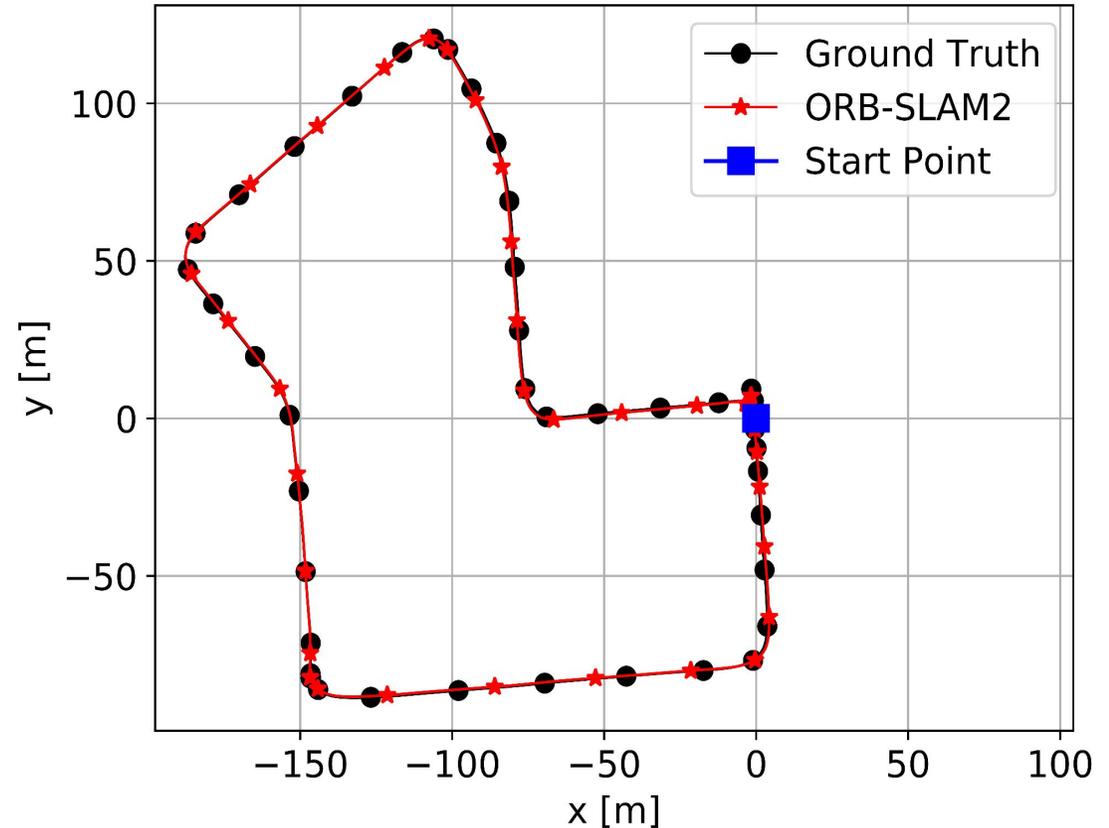


## KITTI - Séquence 05



**ATE RMSE = 4,59m**  
**Distance globale: 2223m**

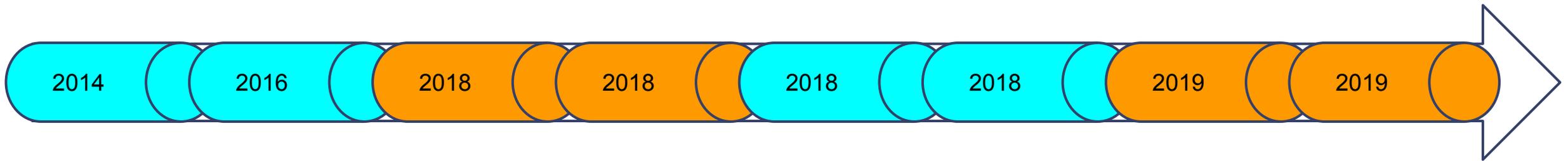
## KITTI - Séquence 07



**ATE RMSE = 0,95m**  
**Distance globale: 695m**

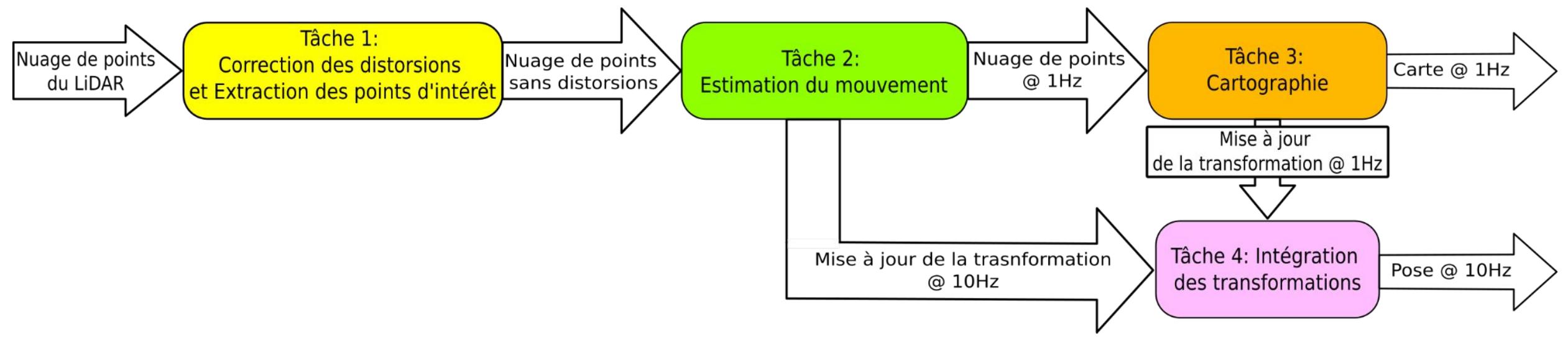
«Vision meets robotics: The KITTI dataset» [Geiger et al., 2013]

## SLAM à base de LiDAR



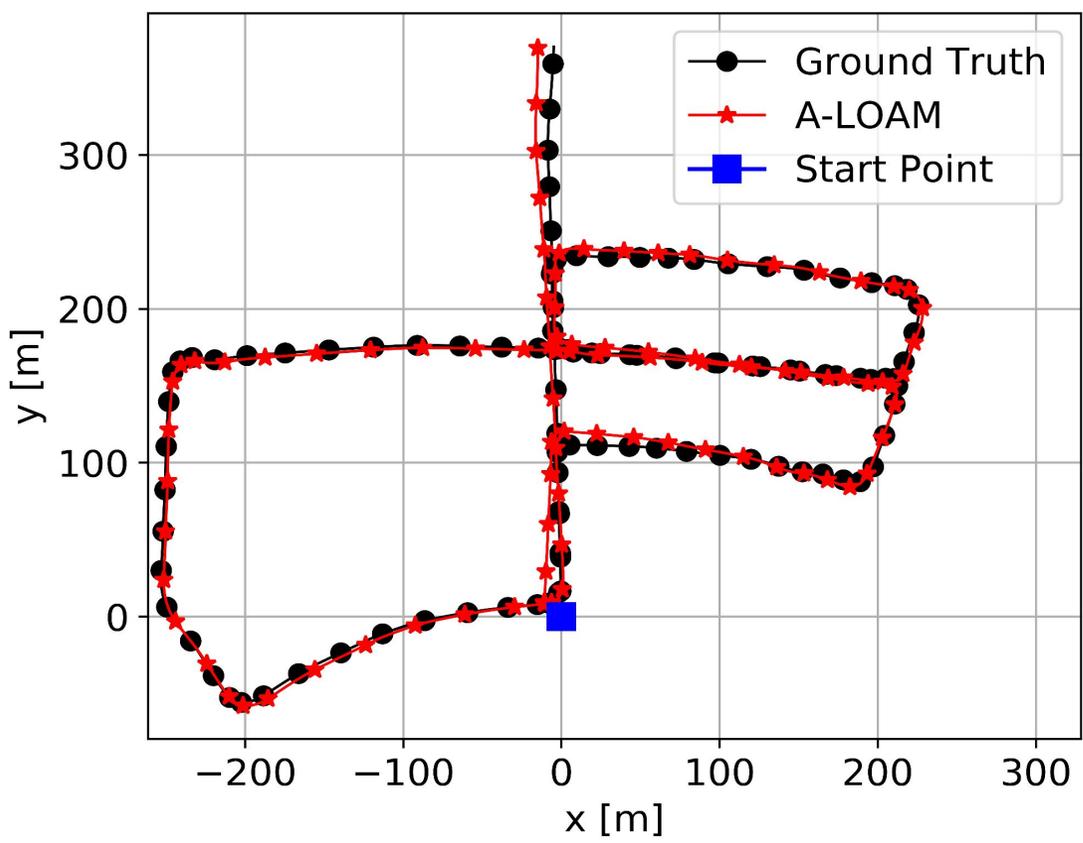
Approches	Références	Avantages	Inconvénients
<b>À base de points d'intérêt</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LeGO-LOAM [Shan et al., 2018]</li> <li>• SegMap [Dubé et al., 2018]</li> <li>• Google Cartographer [Hess et al., 2016]</li> <li>• LOAM [Zhang et al., 2014]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Processus de fermeture de boucle simple</li> <li>+ Efficacité en termes de calculs</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Performance réduite en milieux non-texturés</li> <li>- Utilisation limitée des données</li> </ul>
<b>Approche directe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SuMa++ [Chen et al., 2019]</li> <li>• LO-Net [Li et al., 2019]</li> <li>• SuMa [Behley et al., 2018]</li> <li>• IMLS-SLAM [Deschaud et al., 2018]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Utilisation de toutes les données LiDAR</li> <li>+ Processus d'association de données plus simple</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Consommation importante de mémoire et de temps de calculs</li> <li>- Sensibilité aux désalignements et aux distorsions</li> </ul>

# Processus A-LOAM



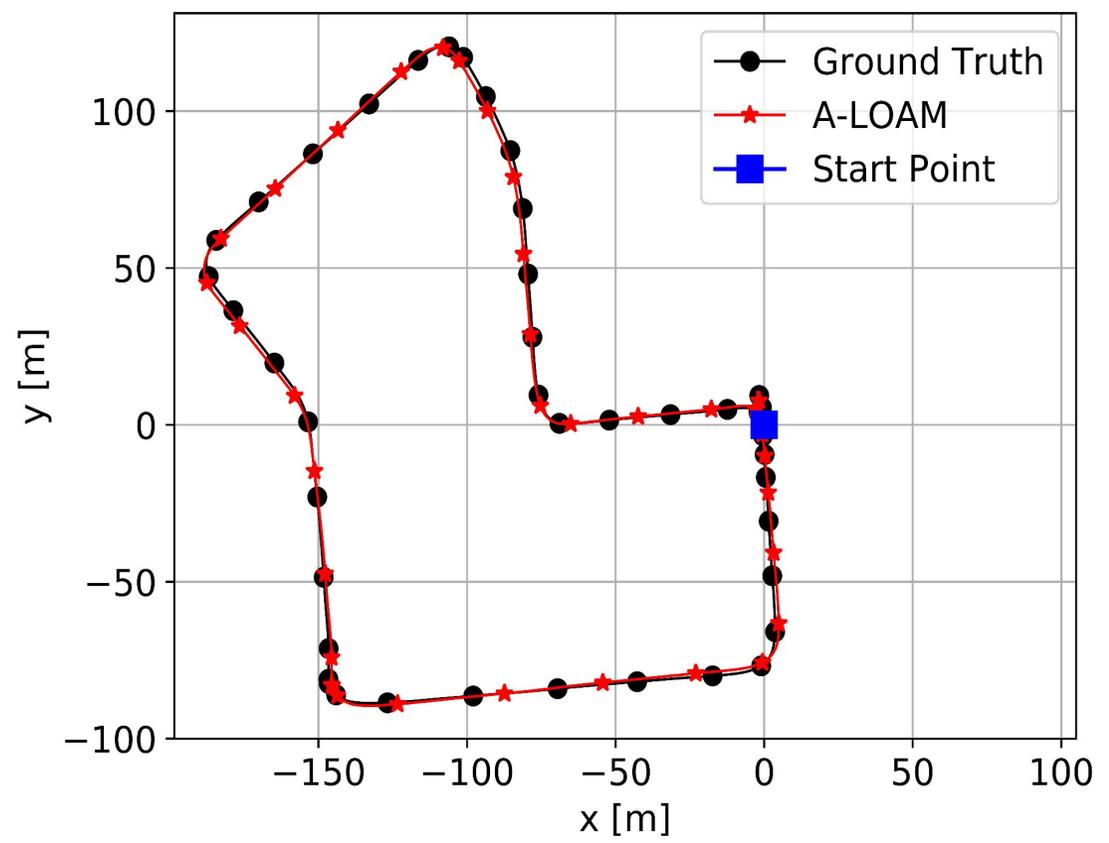
«LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time.» [Zhang et al., 2014]

## KITTI - Séquence 05



**ATE RMSE = 4,9m**  
**Distance globale: 2223m**

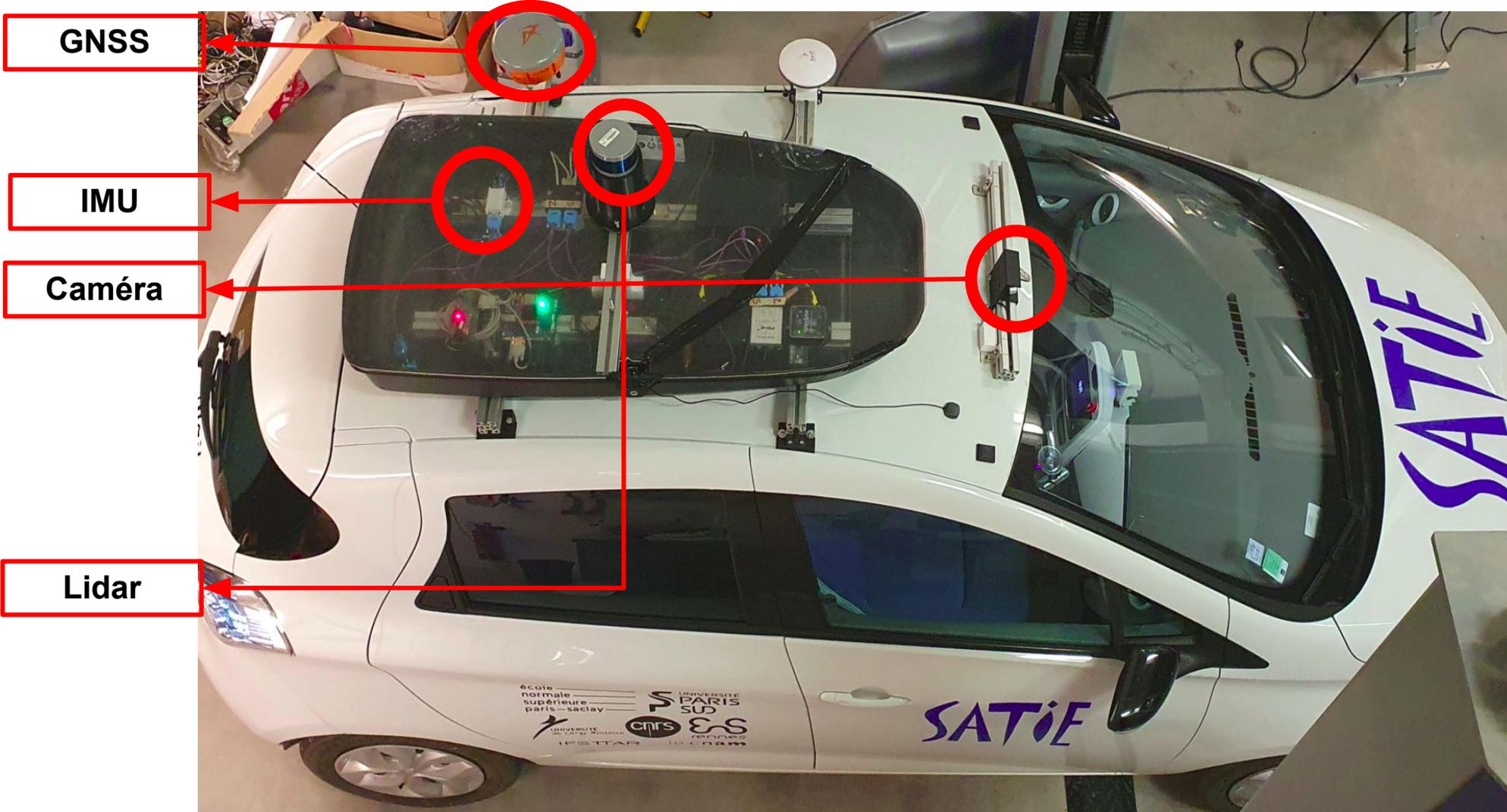
## KITTI - Séquence 07



**ATE RMSE = 1,75m**  
**Distance globale: 695m**

«Vision meets robotics: The kitti dataset» [Geiger et al., 2213]

# Véhicule instrumenté du Laboratoire SATIE

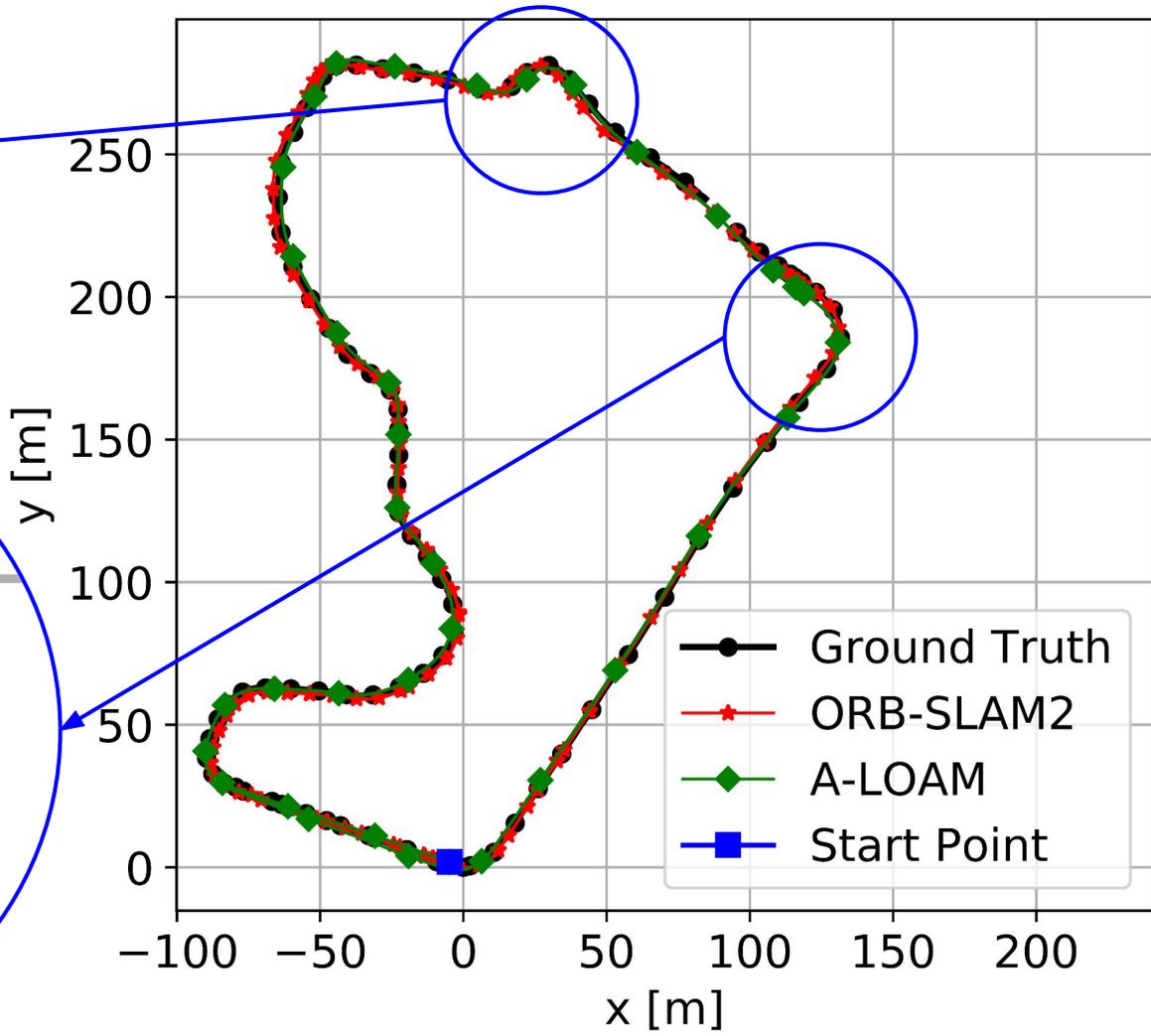
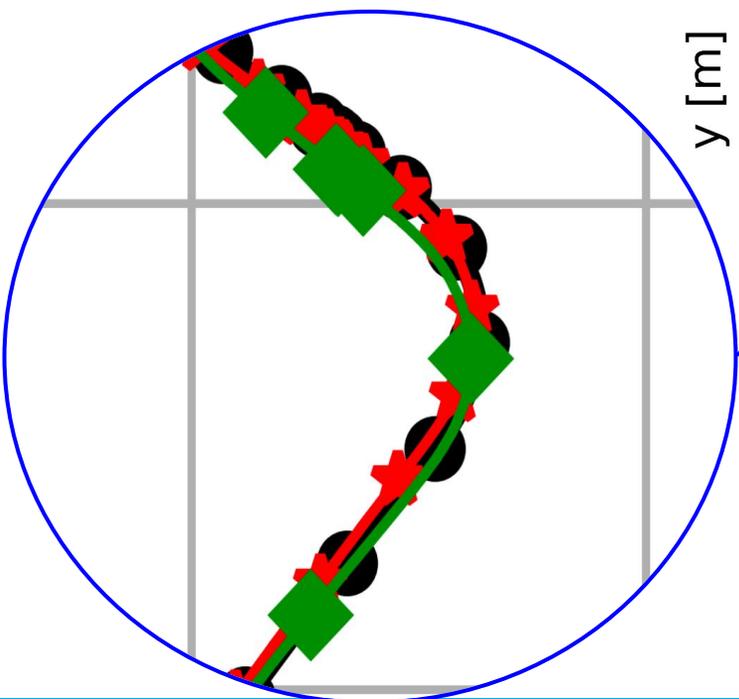
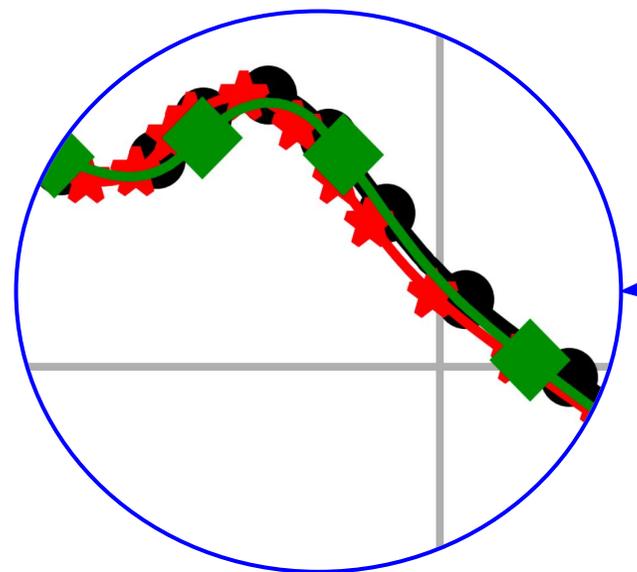


Images Stéréo: 30 FPS  
Données LiDAR: 10 FPS  
GNSS : 25 FPS

Boucle 1: 979m  
Boucle 2: 2242m

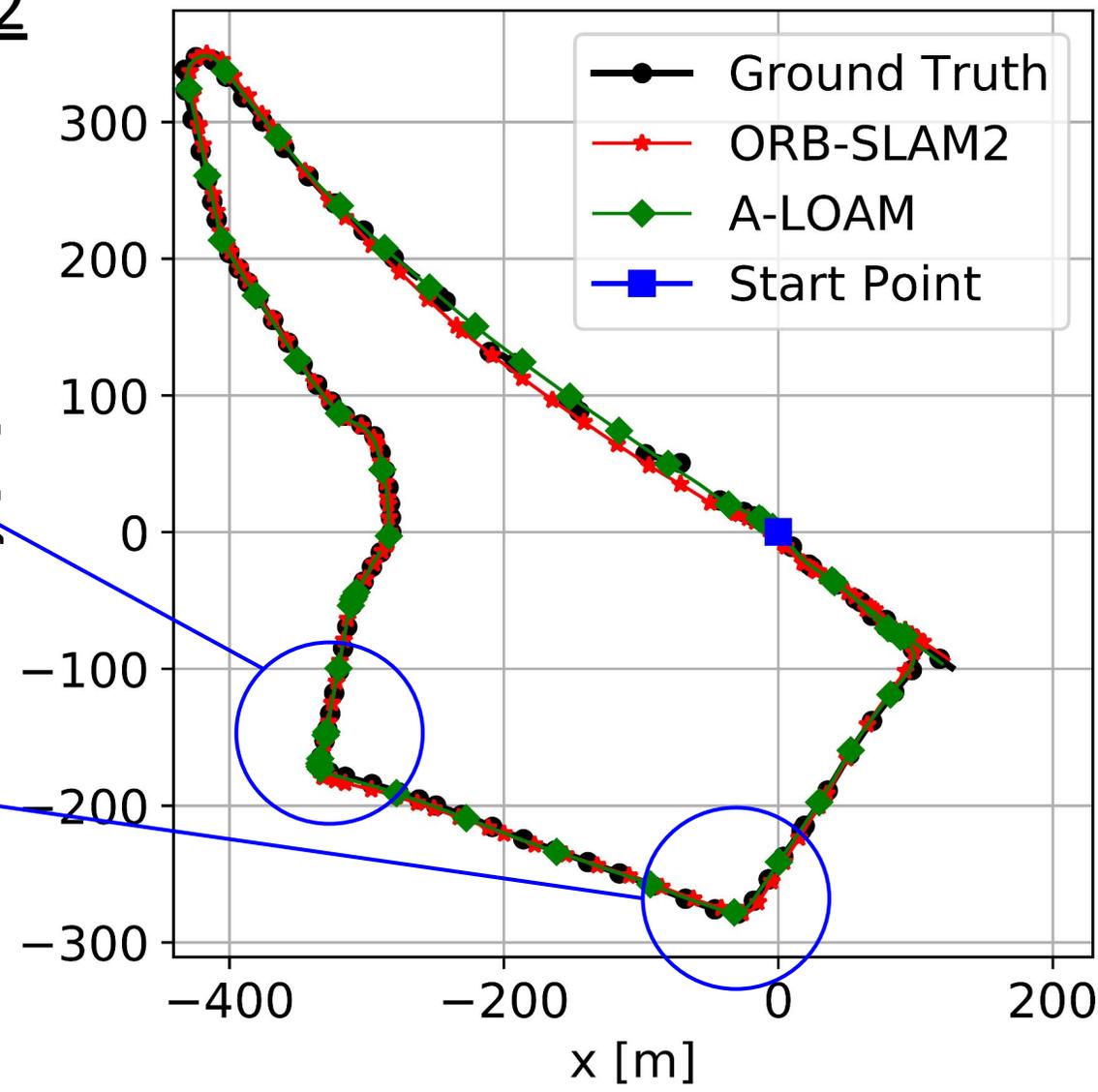
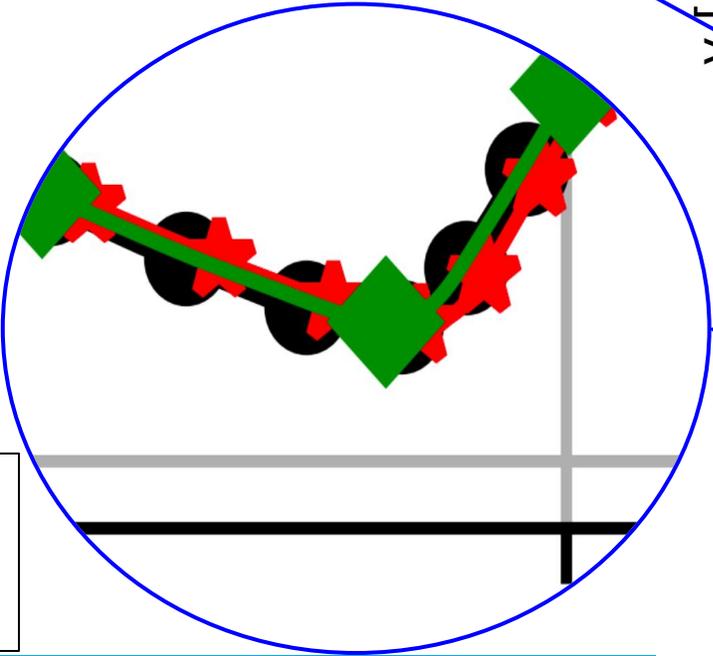
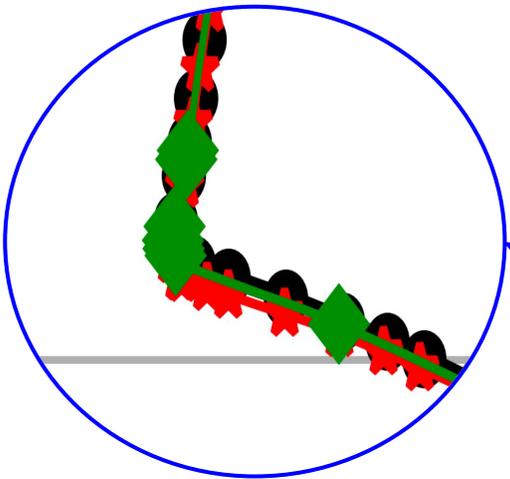


# Boucle 1



ORB\_SLAM2: ATE RMSE = 2,2m  
 A-LOAM: ATE RMSE = 2,6m  
 Distance globale: 979m

## Boucle 2



ORB\_SLAM2: ATE RMSE = 2,5m  
 A-LOAM: ATE RMSE = 2,3m  
 Distance globale: 2242m

## SLAM multimodal

Approches	Méthodes	Références	Avantages	Inconvénients
Couplage fort	Hybride	<ul style="list-style-type: none"> <li>A multi-sensorial SLAM for low-cost micro aerial vehicles in GPS-denied environments [López et al., 2019]</li> <li>SLAM of Robot based on the Fusion of Vision and LIDAR [Xu et al., 2018]</li> </ul>	Réduction les erreurs d'estimation	Problèmes en cas d'absence d'une modalité
	Vision et LiDAR parallèles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Visual-lidar Odometry and Mapping: Low-drift, Robust, and Fast [Zhang et al. 2015]</li> <li>A Tight Coupling of Vision-Lidar Measurements for an Effective Odometry [Seo et al., 2019]</li> </ul>	Robustesse et précision	Coût de calcul élevé
Couplage faible	Vision améliorée (par données Lidar)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Limo: Lidar-monocular visual odometry [Graeter et al., 2018]</li> <li>Direct visual SLAM using sparse depth for camera-lidar system [Shin et al., 2018]</li> </ul>	Coût de calcul réduit	Difficulté pour la relocalisation
	LiDAR amélioré (par données Vision)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Visual laser-SLAM in large-scale indoor environments [Liang et al., 2016]</li> <li>Loop detection and correction of 3d laser-based slam with visual information [Zhu et al. 2018]</li> </ul>	Fermeture de boucle et relocalisation facile	Sensibilité aux environnements sans texture

«Camera, LiDAR and Multi-modal SLAM Systems for Autonomous Ground Vehicles: a Survey» [Chghaf et al., en cours de révision]

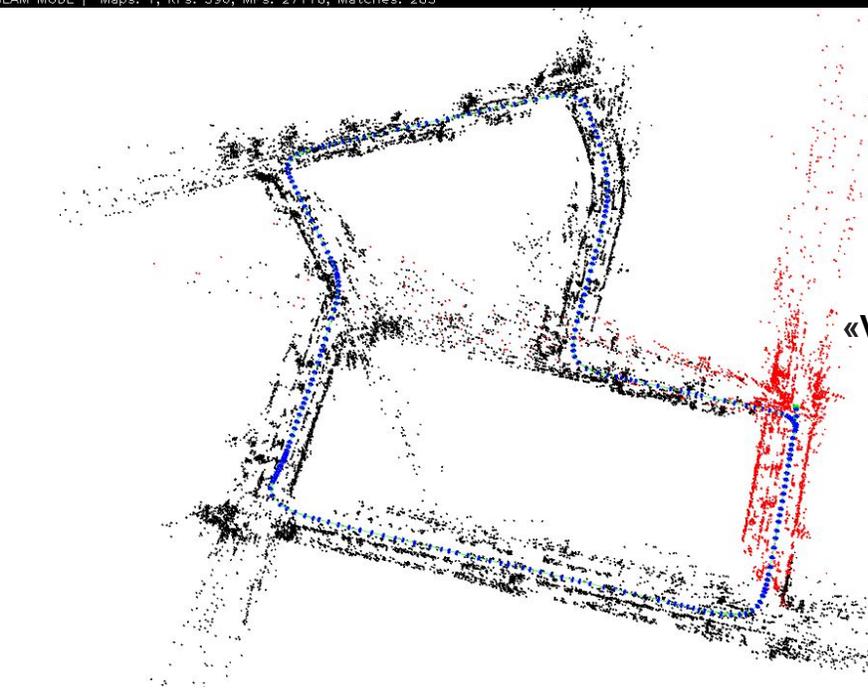
## Architectures hétérogènes pour SLAM

Approches	Auteur	Carte	Fréquence d'images	Puissance	Commentaire
<b>CPU - FPGA</b>	Semi-dense SLAM on an FPGA SoC [Boikos et al., 2016]	Xilinx Zynq 7022 SoC	4,5 fps	2,5 W	- Semi-dense - Environnement intérieur
	eslam: An energy-efficient accelerator for real-time orb-slam on fpga platform [Liu et al., 2019]	Xilinx Zynq 7000 SoC	31 fps	1,9 W	- À base de descripteurs ORB - Environnement intérieur
	An fpga-based real-time simultaneous localization and mapping system [Gu et al., 2015]	Altera Stratix III	31 fps	5,9 W	- Odométrie visuelle - Environnement intérieur
<b>CPU - GPU</b>	A Multisensor Data Fusion Approach for SLAM [Jin et al., 2019]	Nvidia Jetson TX2	15 fps	15 W	- Vision et Lidar Simultanés - Environnement intérieur
	GPU based real-time SLAM of six-legged robot [Xuehe et al., 2016]	NVIDIA GeForce GTX 430	30 fps	250 W	- Stéréo SLAM - Environnement intérieur

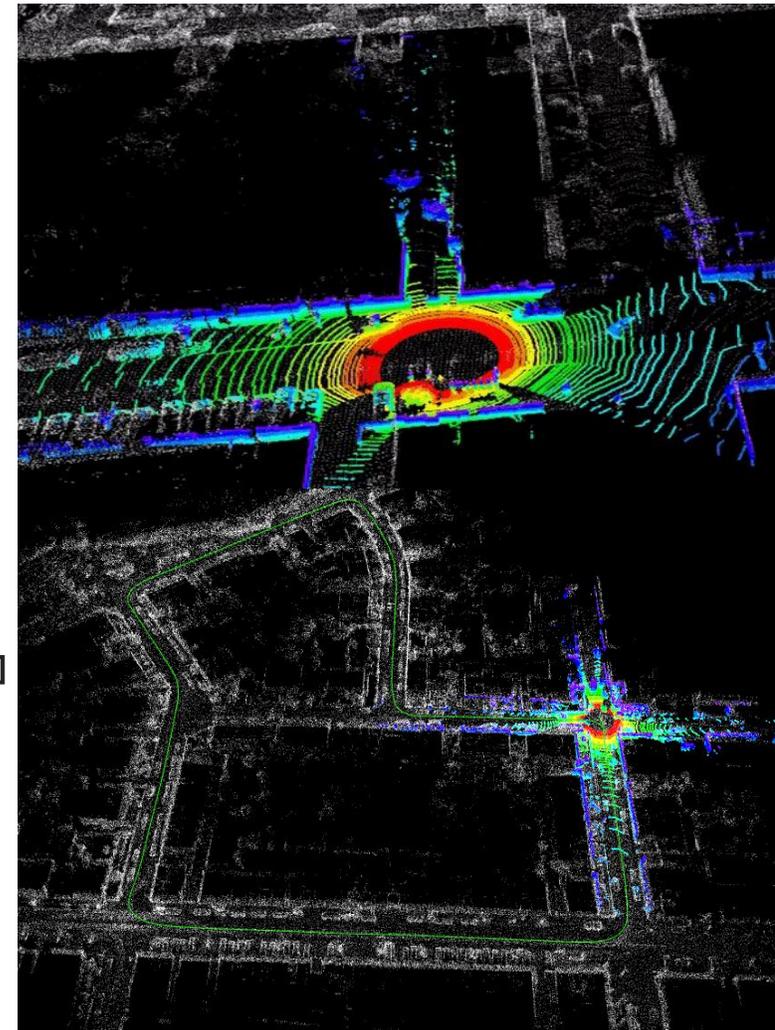
# Densité ? Échelle ? Dynamique ?



SLAM MODE | Maps: 1, KFs: 396, MPs: 27118, Matches: 283

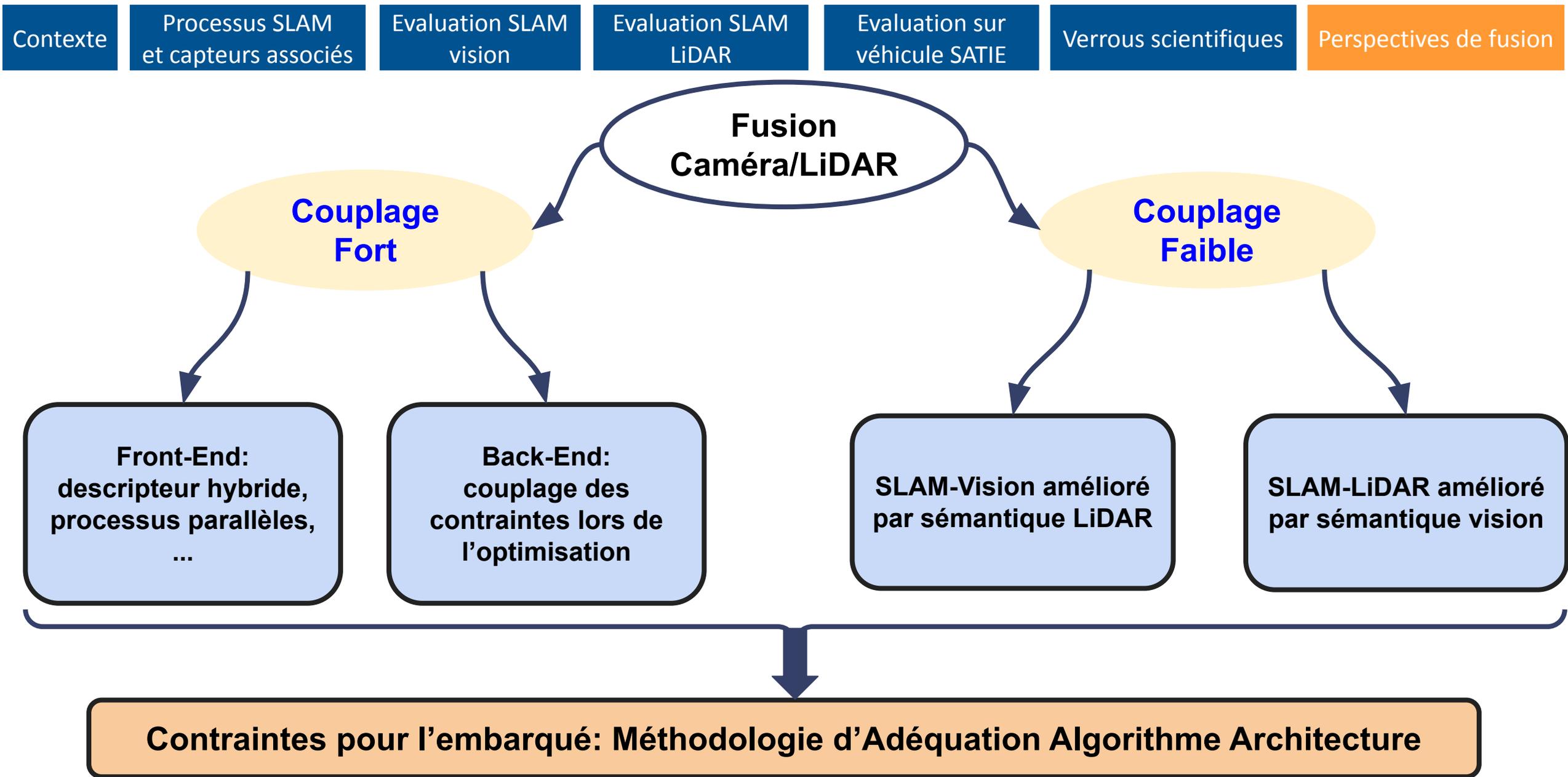


«Vision meets robotics: The kitti dataset» [Geiger et al., 2013]

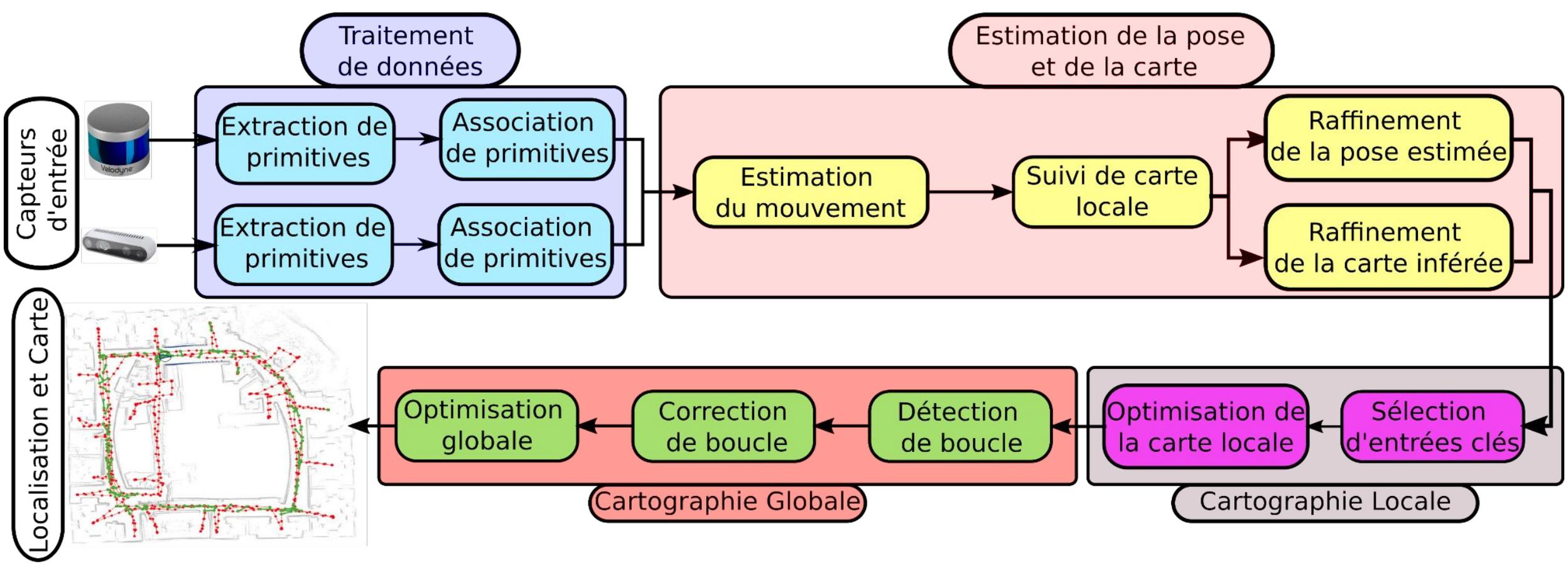


## Verrous scientifiques

- ❑ Les approches visuelles restent limitées par la dérive de l'estimation et le manque de caractéristiques saillantes de l'environnement ;
- ❑ Les approches basées LiDAR sont coûteuses en temps de calculs et peu performantes en espaces ouverts avec peu de structures ;
- ❑ Les approches Caméra-LiDAR sont prometteuses, mais ne sont pas assez investiguées.



«Camera, LiDAR and Multi-modal SLAM Systems for Autonomous Ground Vehicles: a Survey» [Chghaf et al., en cours de révision]



Merci de votre attention