

Bienvenue

Dans ma présentation





Mémoire de Recherche pour le Master de Recherche en microsystèmes et systèmes électroniques embarqués

IMPLÉMENTATION D'UN PIPELINE LIDAR SLAM POUR NAVIGATION ROBOTIQUE

Projet réalisé au Laboratoire des Technologies Avancées et des Systèmes Intelligents, École Nationale d'Ingénieurs de Sousse

Présentée par :Mechi Ilhem

Encadrant du mémoire :

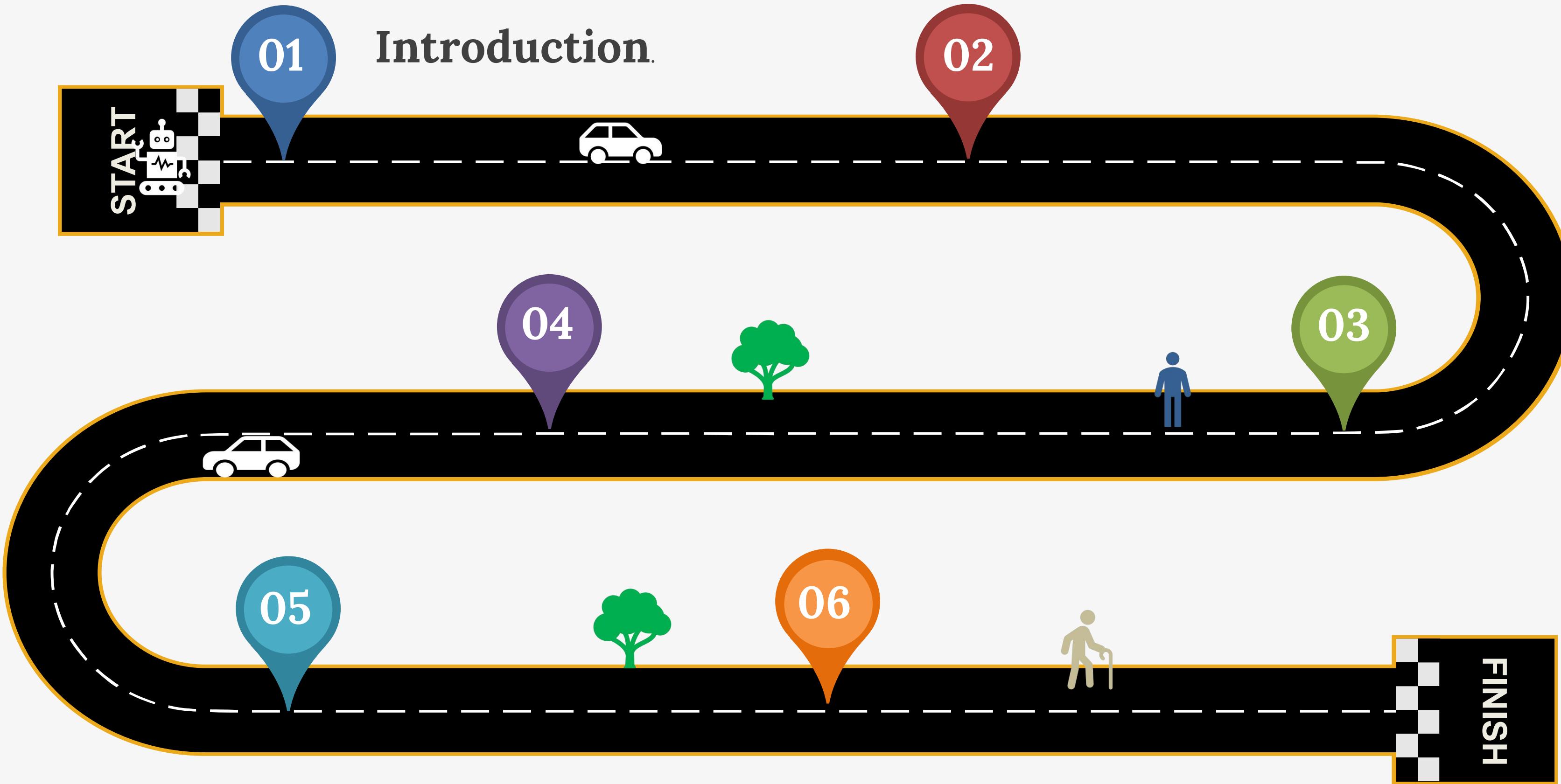
Dr Rzouga Lamia

Année universitaire 2024 / 2025

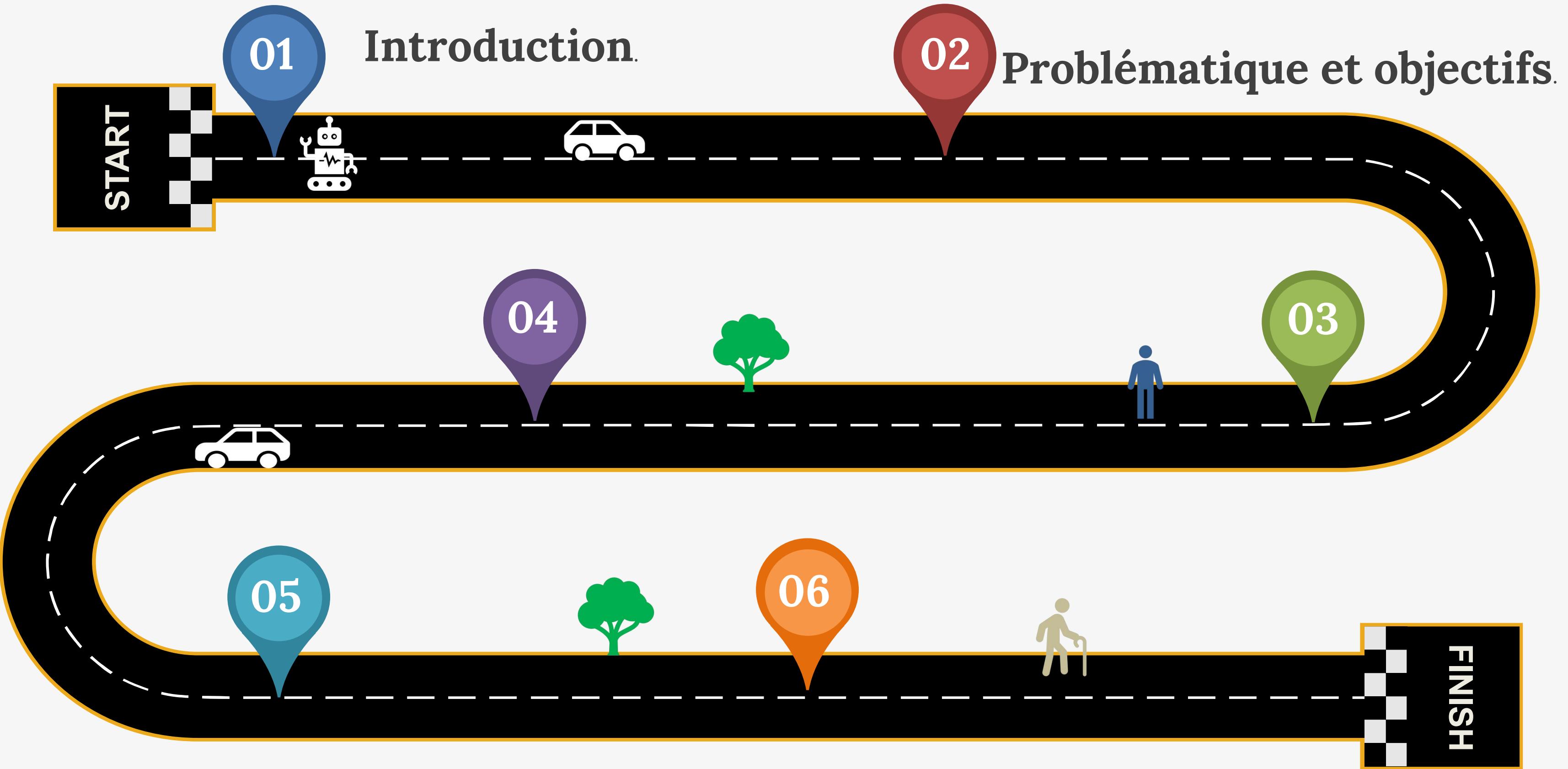




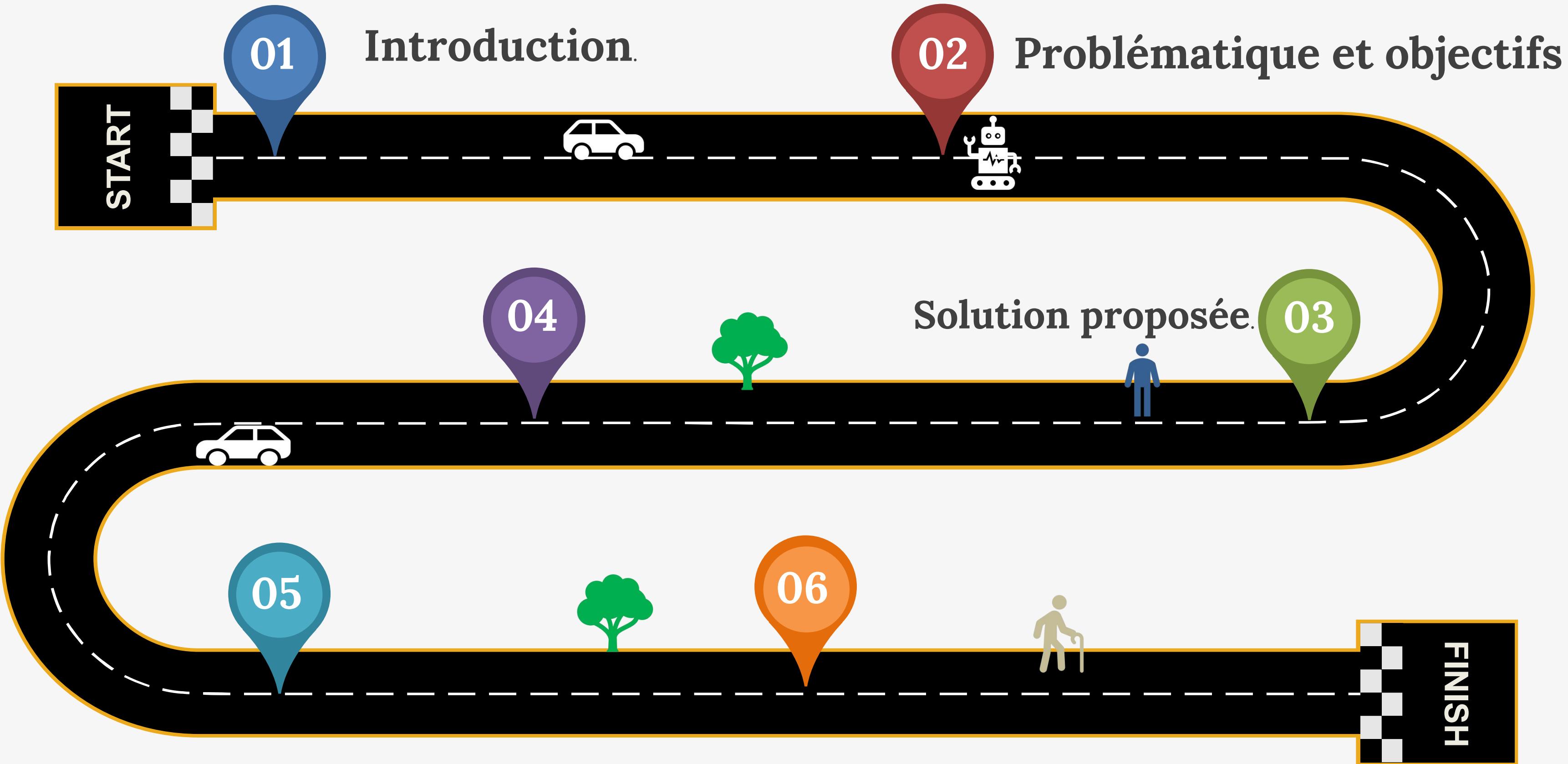
Plan



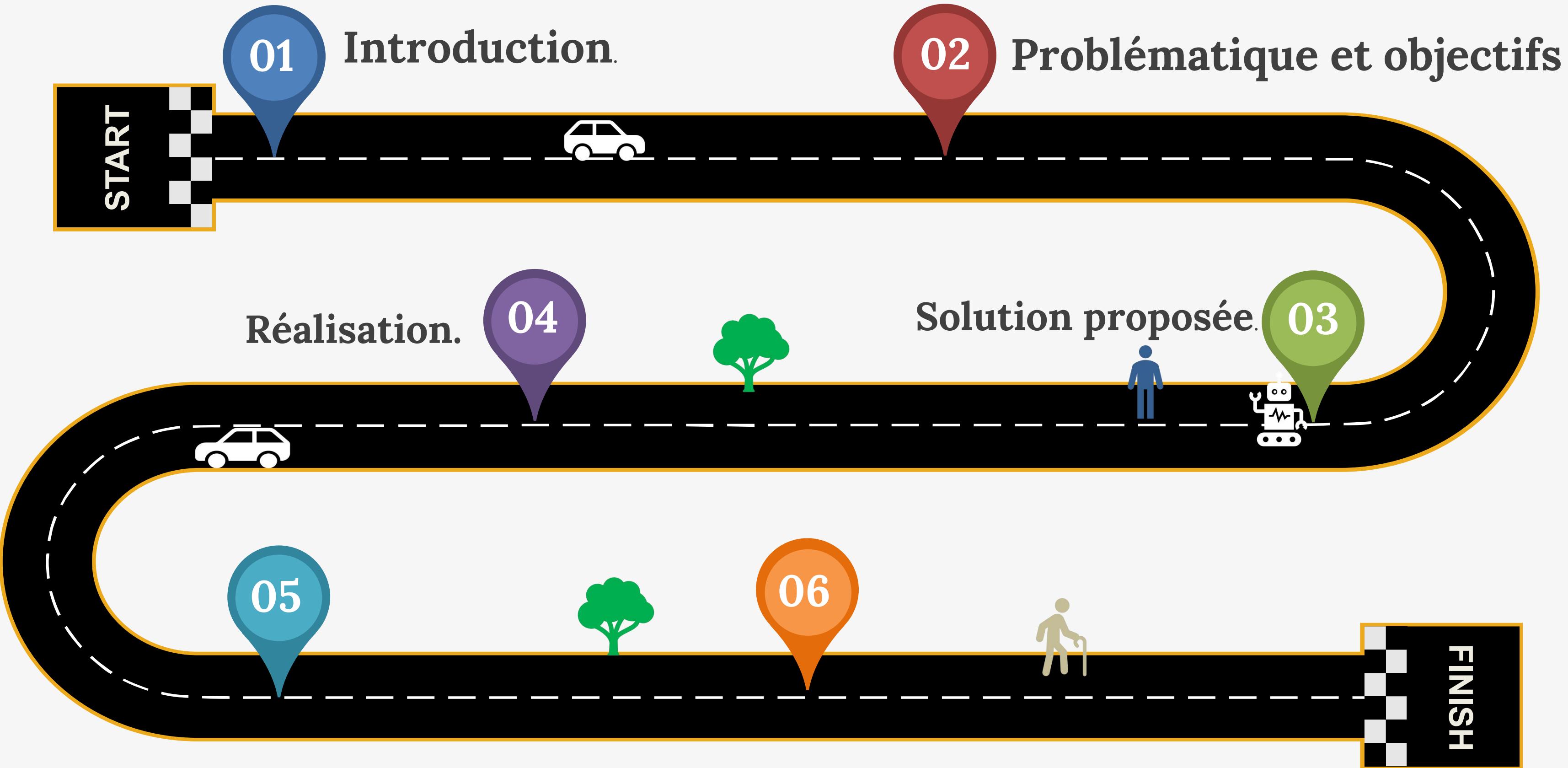
Plan



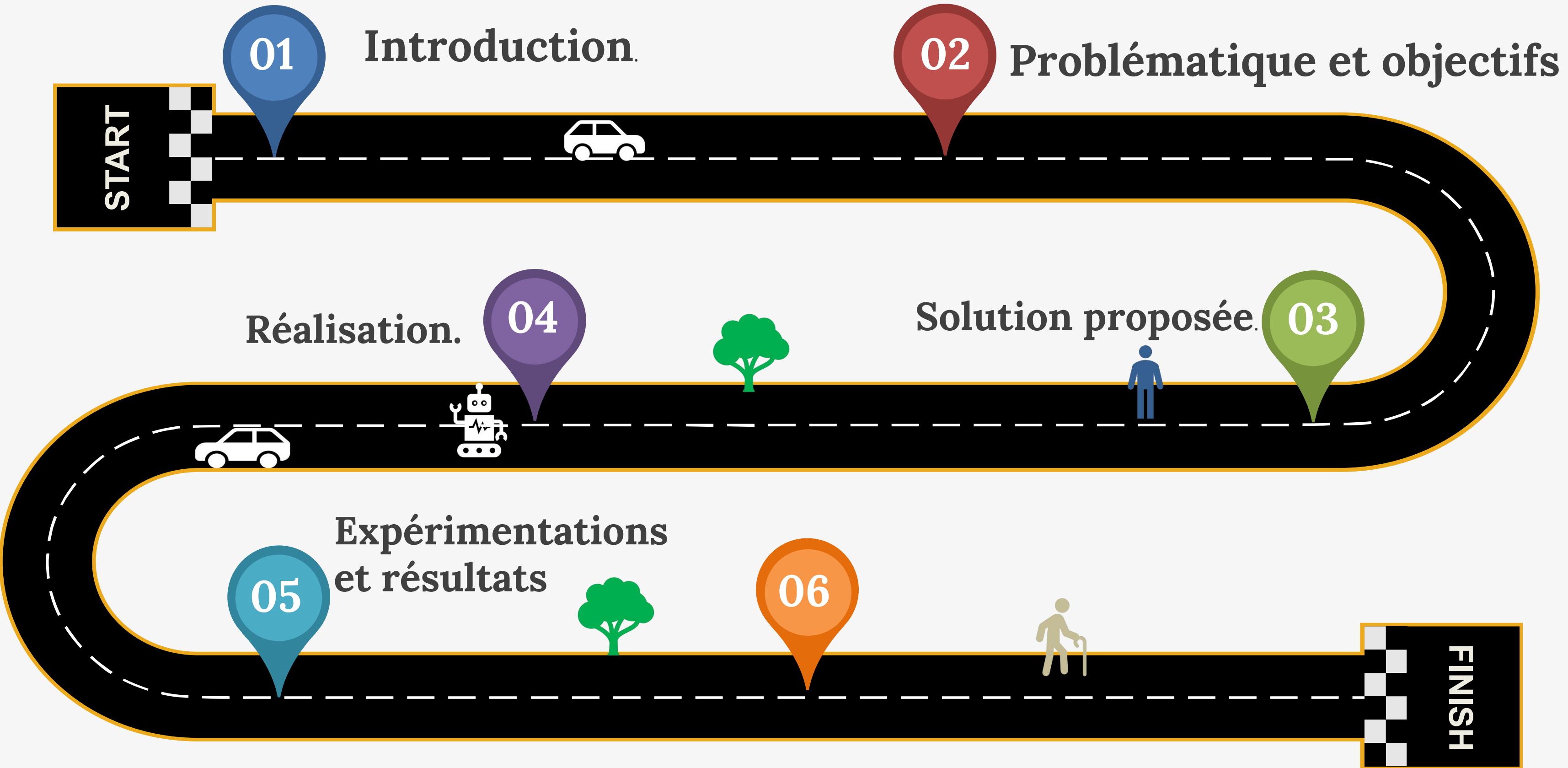
Plan



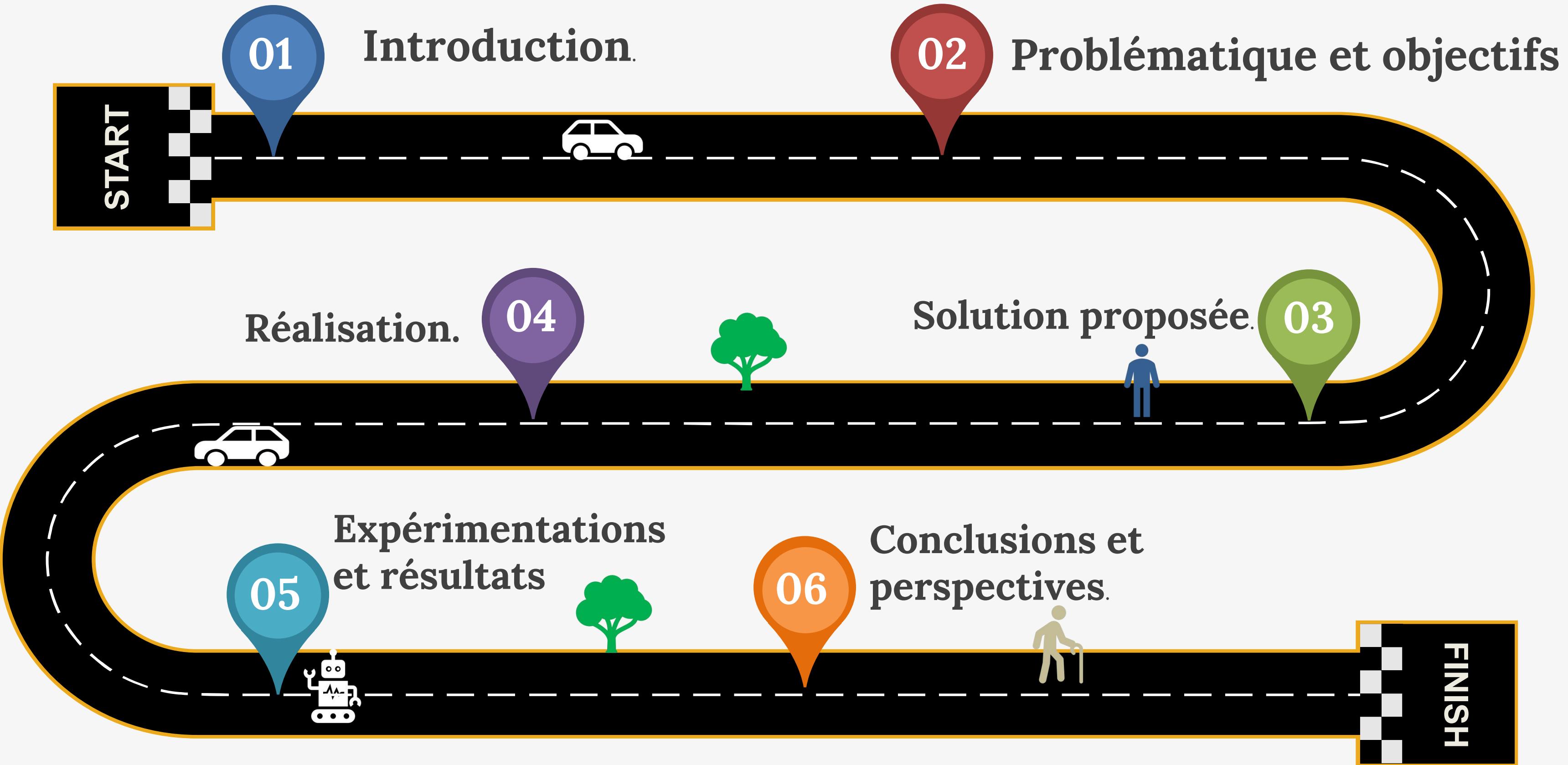
Plan



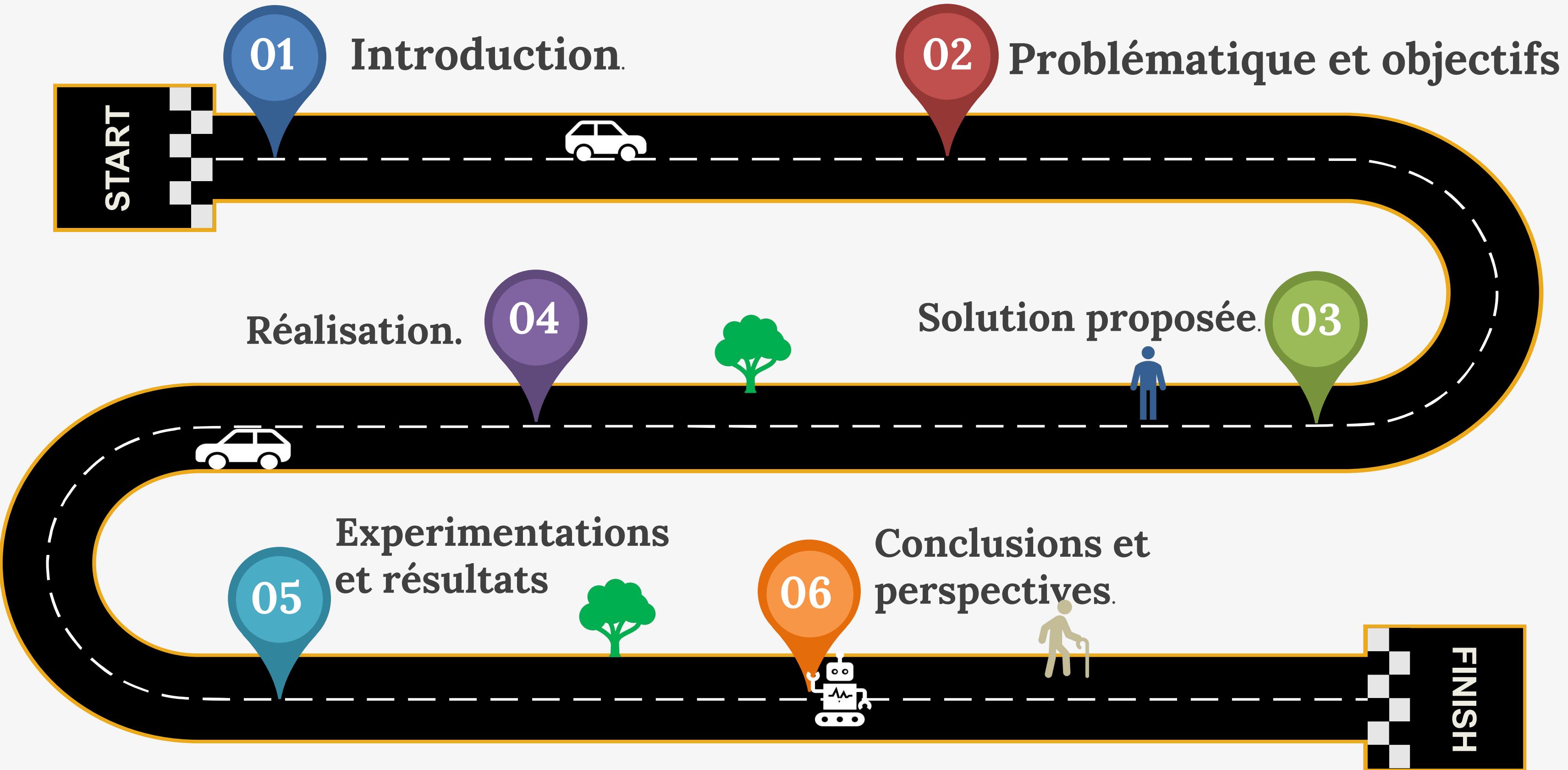
Plan



Plan



Plan



Introduction

-01-

Dans un monde où les robots deviennent nos partenaires, la navigation autonome est la clé qui leur permet:

- de percevoir
- d'agir
- se déplacer avec confiance.

Ce projet explore les technologies qui transforment un simple robot en un véritable explorateur intelligent .

Problématique et objectifs

-02-

Les robots modernes interviennent aujourd'hui dans :

- Des environnements industriels complexes
- Des espaces peu éclairés
- Des environnements dynamiques.

Les limites des solutions existantes

 GPS → X Indisponible en intérieur

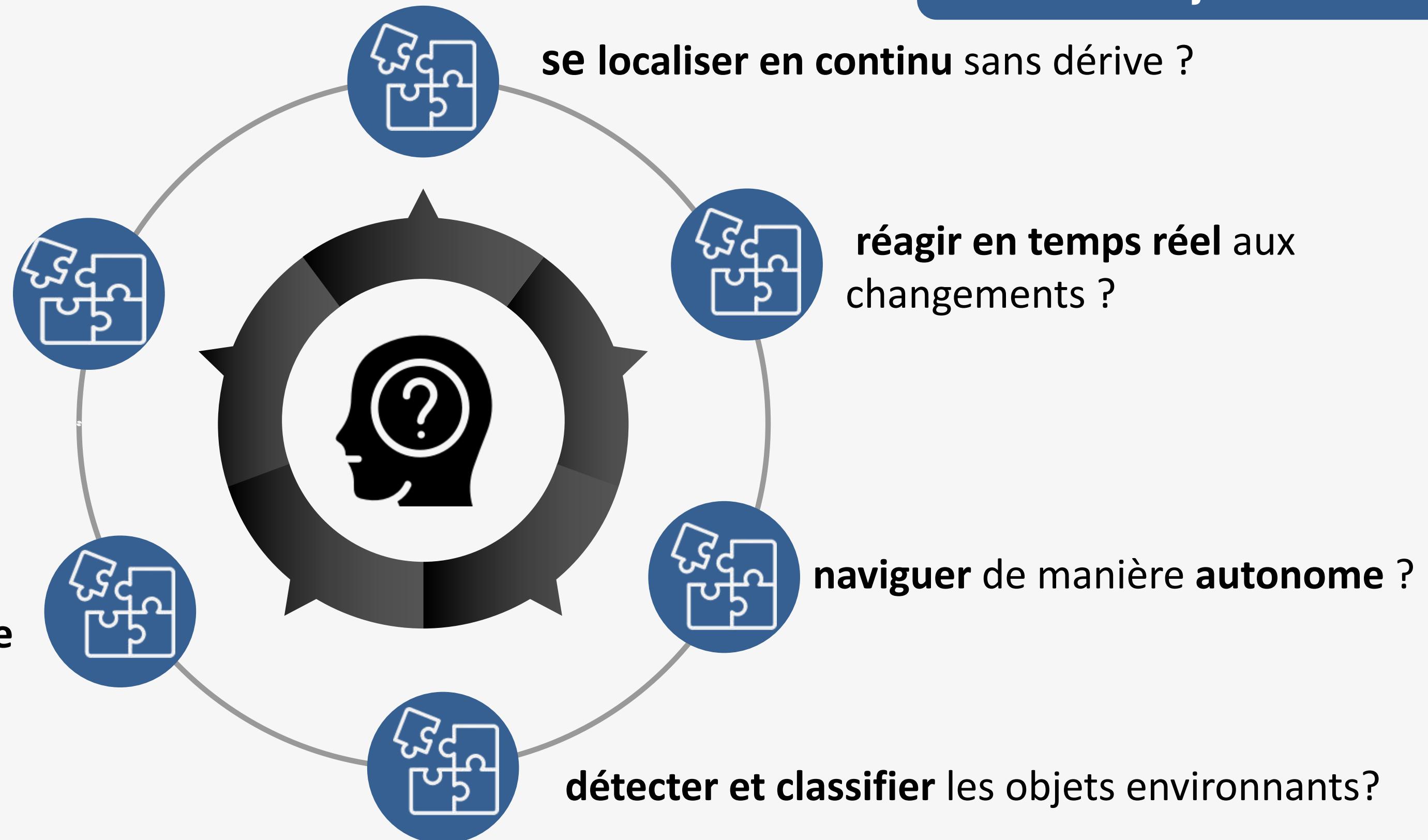
 Vision classique → X Sensible à la lumière

 Odométrie seule → X Dérive progressive

Comment permettre à un robot de :

percevoir précisément son environnement ?

reconstruire une carte cohérente ?



L'objectif de ce projet

Détecter et classifier
objets 3D

Développer un pipeline
complet de navigation
autonome

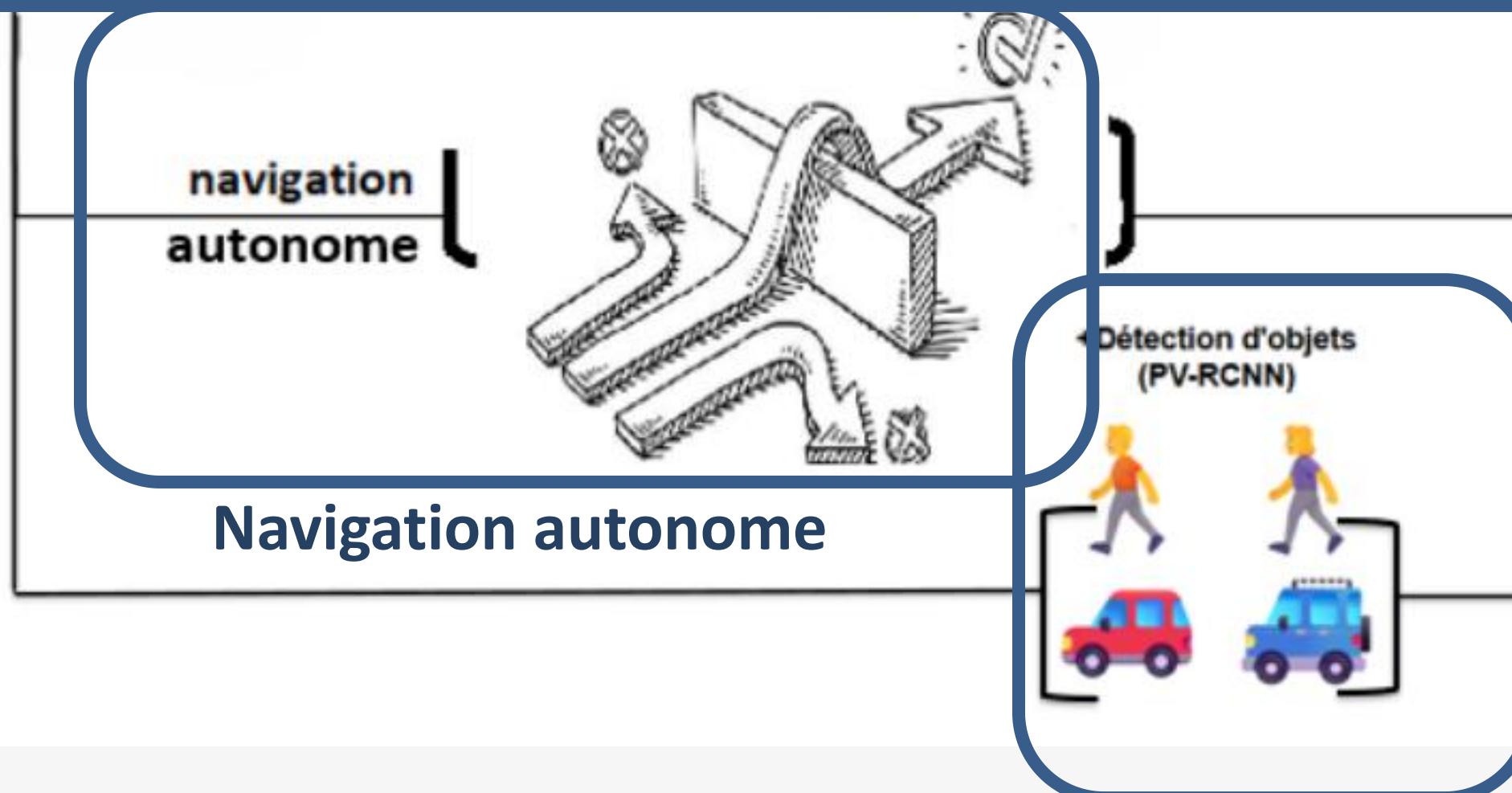
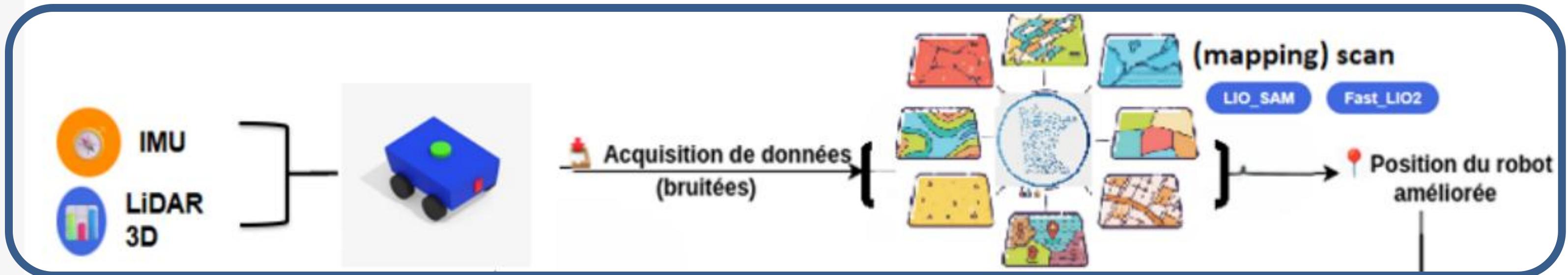


Valider le système en
simulation et analyser
les performances

Solution proposée

-03-

Fusion LiDAR_IMU



Détection d'objets

• Module de Fusion LiDAR_IMU

LiDAR _IMU

Fournit une géométrie 3D précise de l'environnement

Il scanne en permanence et génère des millions de points. Mais seul, il peut être trompé par des objets qui bougent ou qui se déplacent rapidement

Mesure les mouvements du robot

Sait si le robot avance , Tourne, mais seul peut dériver avec le temps



La combinaison LiDAR–IMU offre un équilibre idéal:

IMU +LiDAR = mouvement continu + correction précise → localisation fiable.

Dans notre projet, cette fusion est mise en œuvre à travers deux algorithmes SLAM(Simultaneous Localization And Mapping).



Pipeline LIO_SAM

Solution proposée



LiDAR Inertial Odometry via Smoothing and Mapping
Filtre de Kalman Itératif + Graph Optimization



Fusion LiDAR-IMU

Synchronisation et fusion des données capteurs



Abstraction Voxels

Voxelisation des nuages de points



Graph Optimization

Optimisation globale de la trajectoire



Odométrie & Carte

Production finale



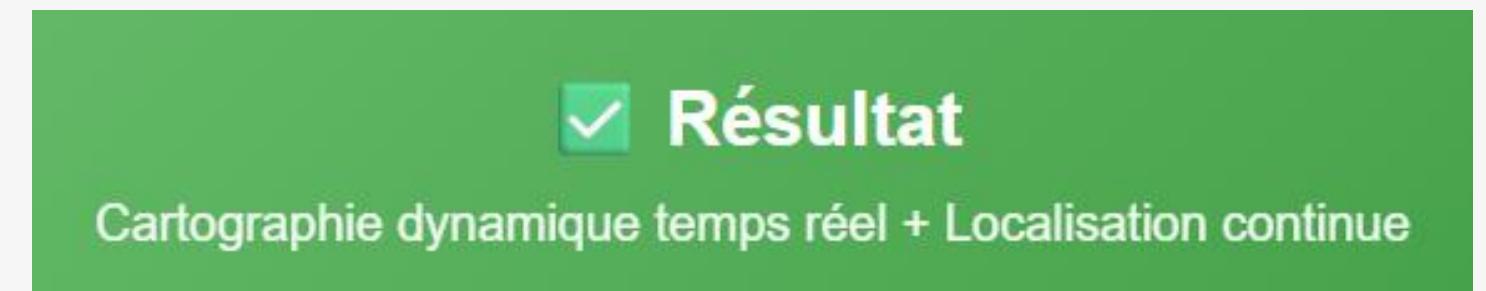
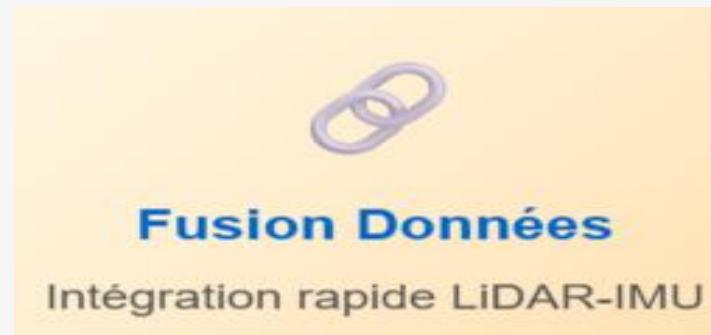
Résultat

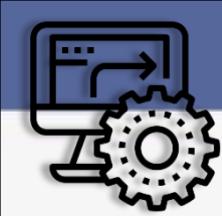
Carte statique haute précision + Odométrie optimisée



Pipeline Fast_LIO2:

Solution proposée



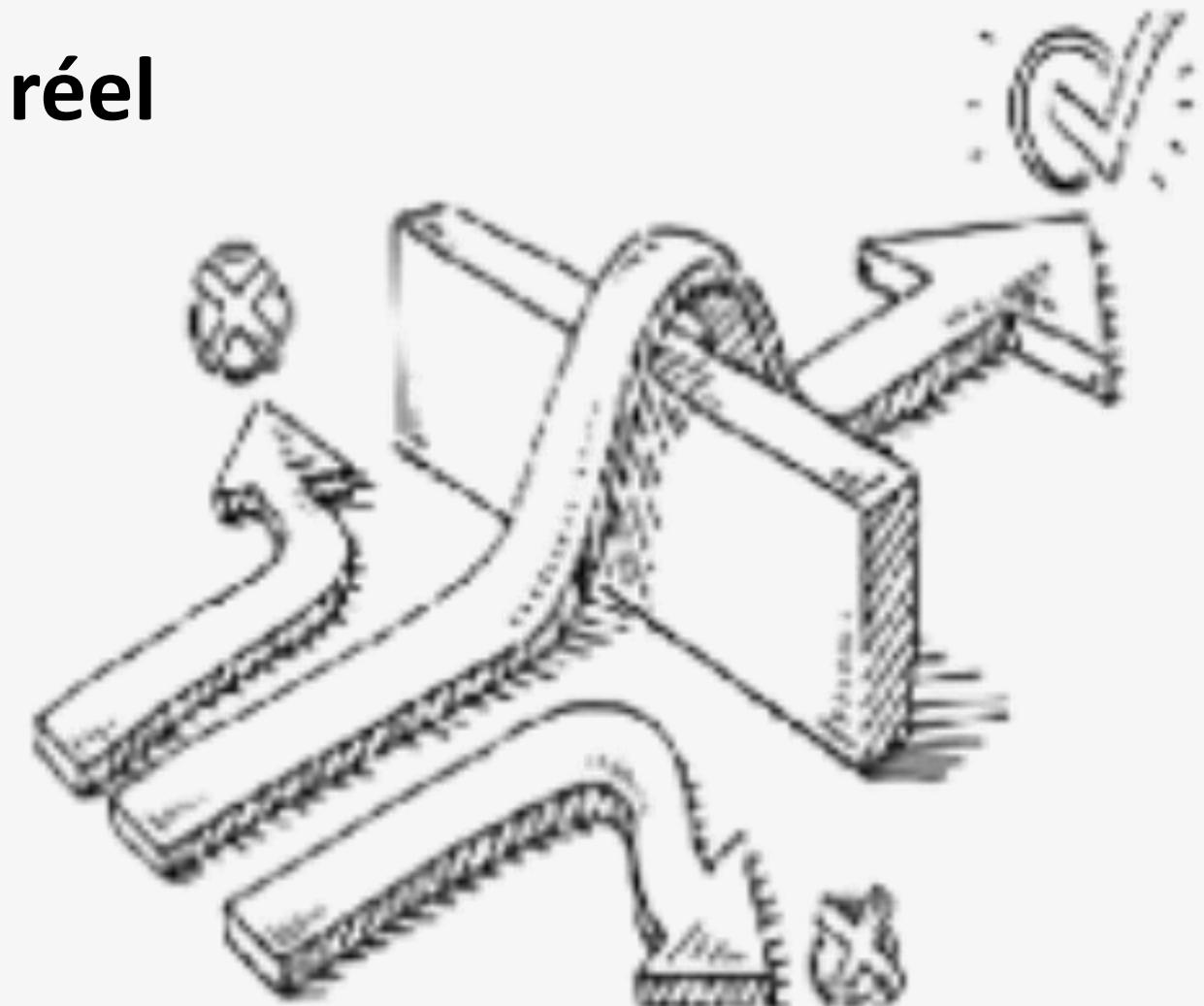


L'objectif de cette comparaison est de déterminer lequel est le plus fiable selon les situations.

- **Module de navigation**

Le système utilise Navigation sous ROS2 pour :

- ✓ Planifier le chemin global pour atteindre la destination
- ✓ Eviter les obstacles de manière dynamique en temps réel
- ✓ Déplacer un robot de manière totalement autonome





Navigation autonome



Stratégie 1 : Navigation avec Carte Statique

LIO_SAM

Génération de carte 3D à partir des données LiDAR et IMU

Fusion Lidar-IMU

Graph Optimization

Map Server

Fournit la carte statique préétablie

Carte fixe

AMCL

Localisation adaptative Monte Carlo sur la carte statique

Particules

Probabiliste

Navigation2

Planification globale/locale et contrôle du mouvement

Global Planner

Local Planner



Navigation autonome

Solution proposée



Stratégie 2 : SLAM en Temps Réel

⚡ FAST-LIO2

SLAM pur sans carte préexistante

Temps réel iKF

🕒 Mise à jour continue

Construction et actualisation de la carte en temps réel

Cartographie dynamique

📍 Localisation simultanée

Le robot se localise pendant qu'il cartographie

SLAM

🎯 Navigation2

Planification adaptative dans l'environnement exploré

Exploration Adaptation



Navigation autonome

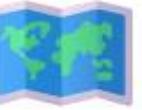
Solution proposée

L'architecture complète de la navigation autonome avec ses trois piliers essentiels



Localisation

Déterminer la position exacte du robot dans l'environnement



Cartographie

Créer et maintenir une représentation de l'environnement



Planification

Calculer les trajectoires optimales vers la destination

Où suis-je?

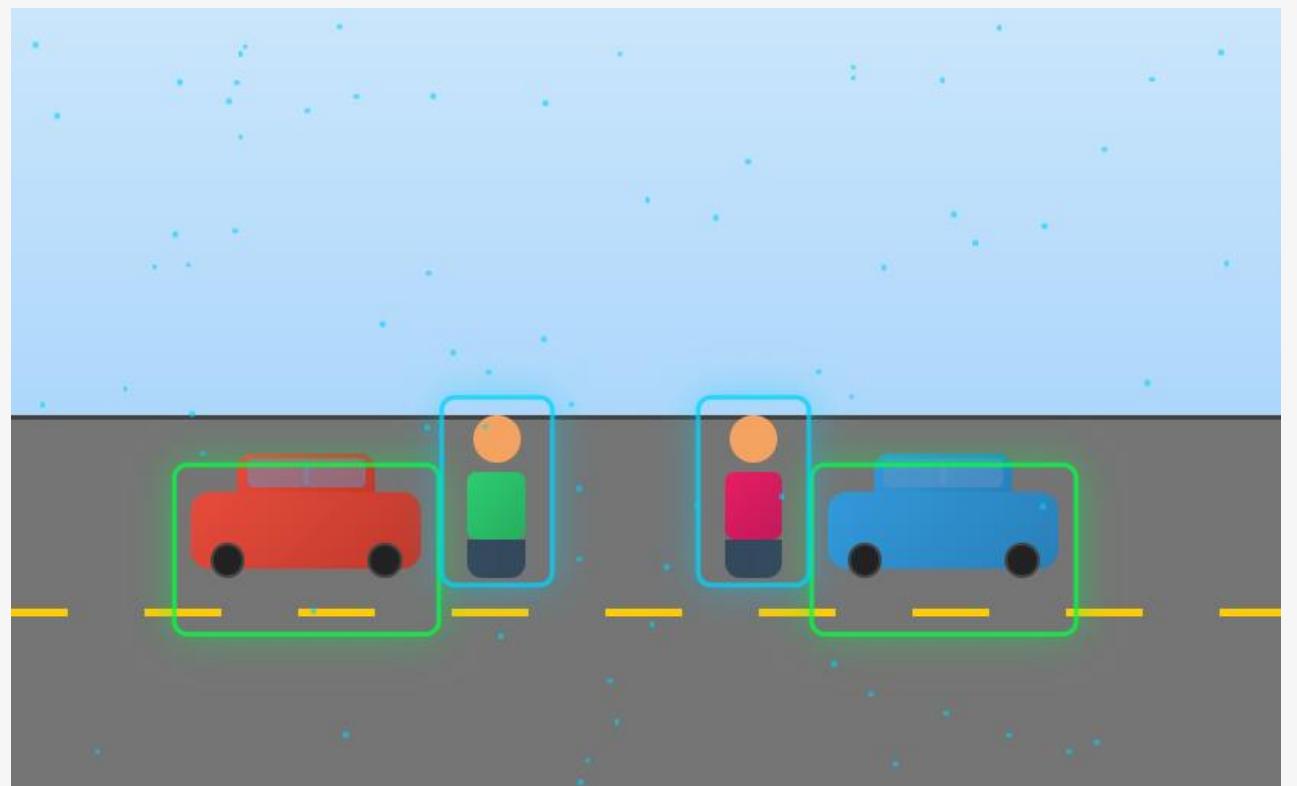
Quelle est la structure de l'environnement?

Comment atteindre ma destination?

Ces trois piliers travaillent ensemble pour permettre une navigation totalement autonome."

• Module de détection d'objets 3D

Pour permettre au robot de comprendre son environnement, nous avons intégré PV-RCNN, un modèle de deep learning pour la détection d'objets en 3D





• Pourquoi nous_ avons choisi PV-RCNN ?

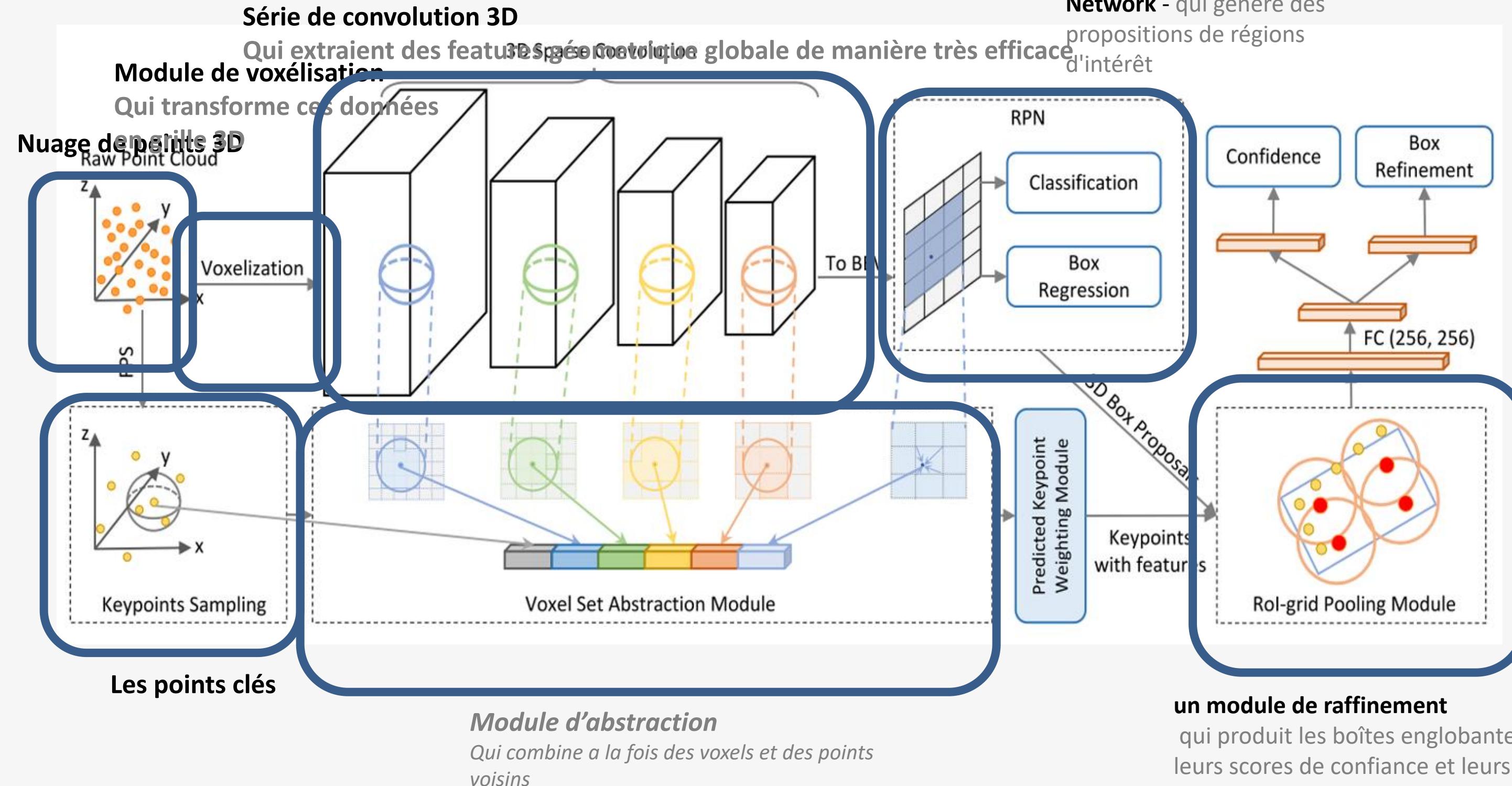
Solution proposée

- Approche hybride qui combine l'efficacité des CNN 3D voxélisés avec la flexibilité des réseaux basés sur Pointnet
- Il affiche une haute précision sur les benchmarks de référence comme KITTI et Waymo,
- Il capture un contexte spatial très riche grâce au Roll-grid encoding



Architecture du modèle PV-RCNN:

Solution proposée





Les composants logiciels

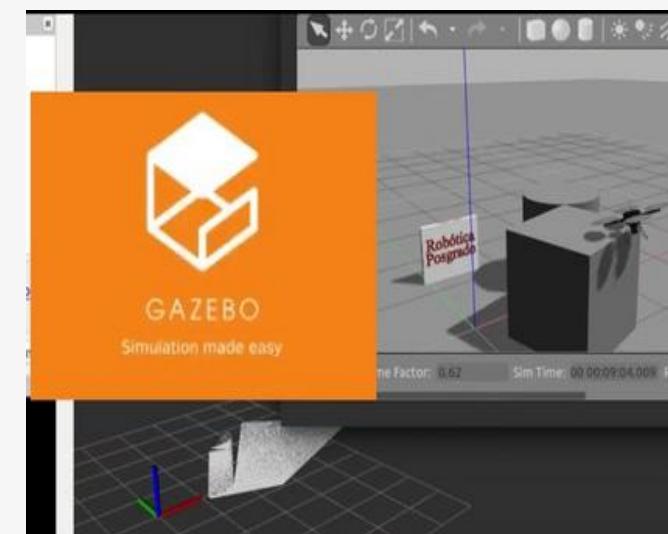
Solution proposée

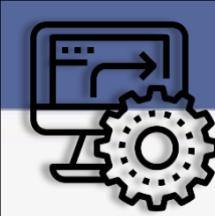




Les composants logiciels

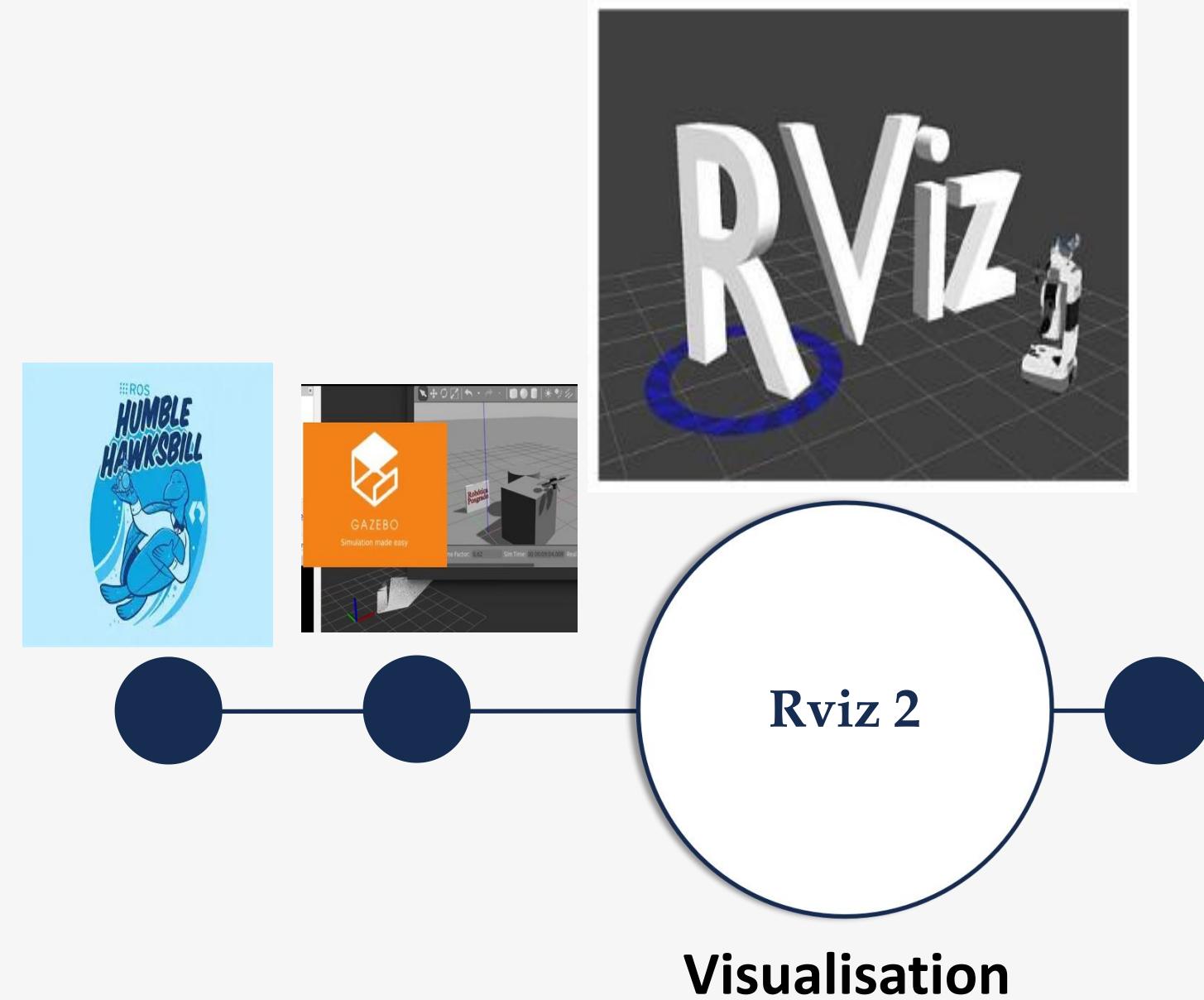
Solution proposée





Les composants logiciels

Solution proposée



Réalisation

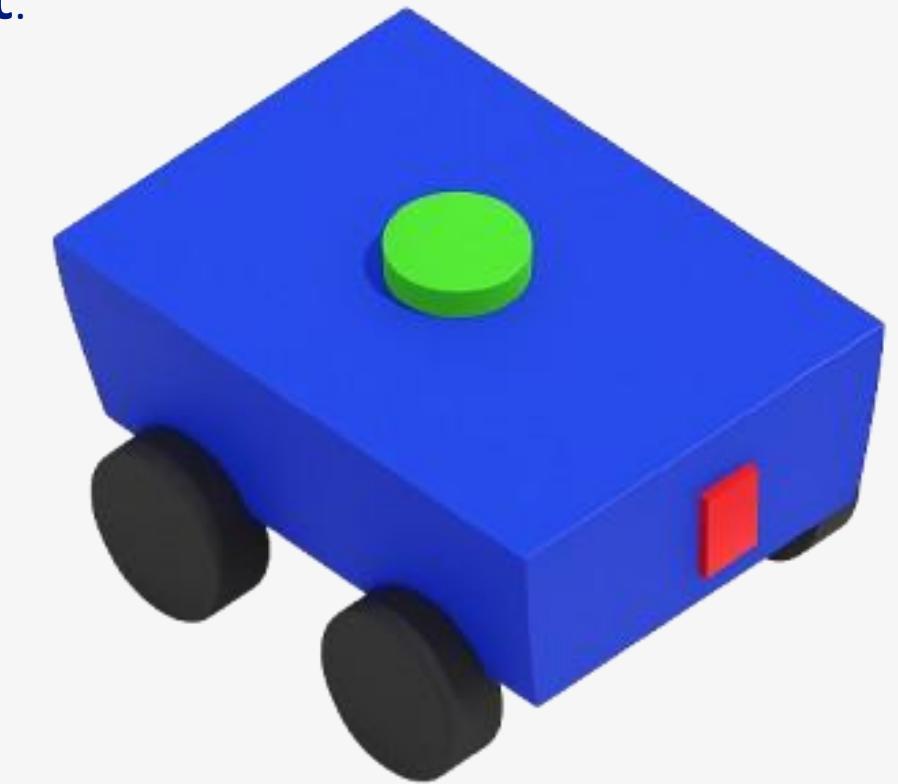
-04-



Modélisation du robot :



- ✓ Les dimensions du robot
- ✓ Les propriétés physiques (mass).
- ✓ Les joints entre les différentes parties du robot.





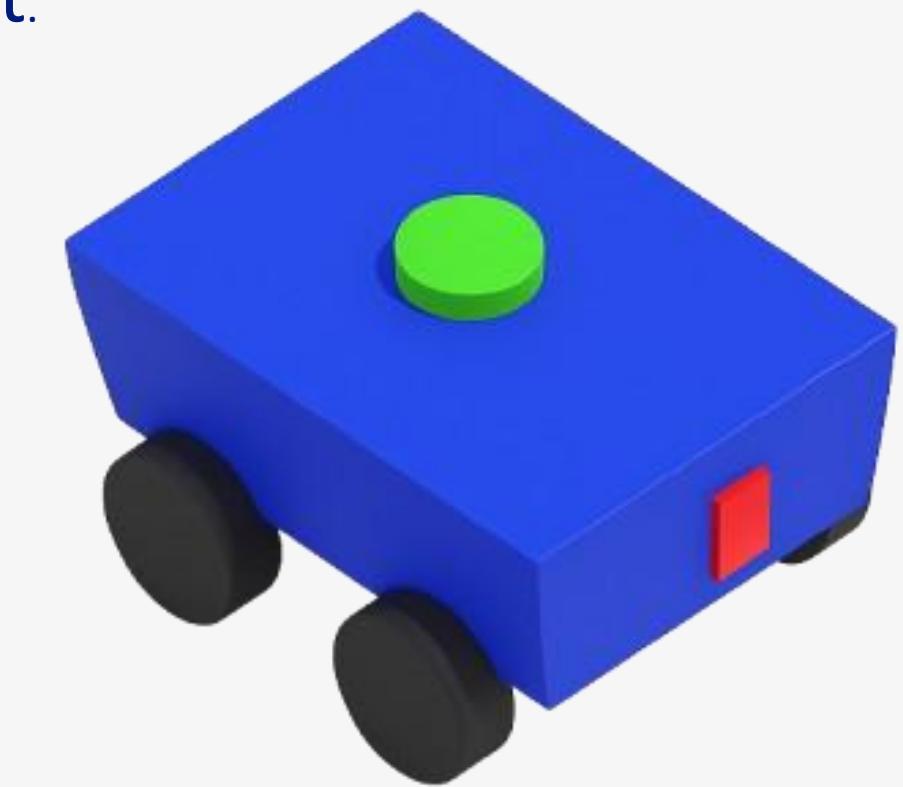
Modélisation du robot :



- ✓ Les dimensions du robot
- ✓ Les propriétés physiques (mass).
- ✓ Les joints entre les différentes parties du robot.



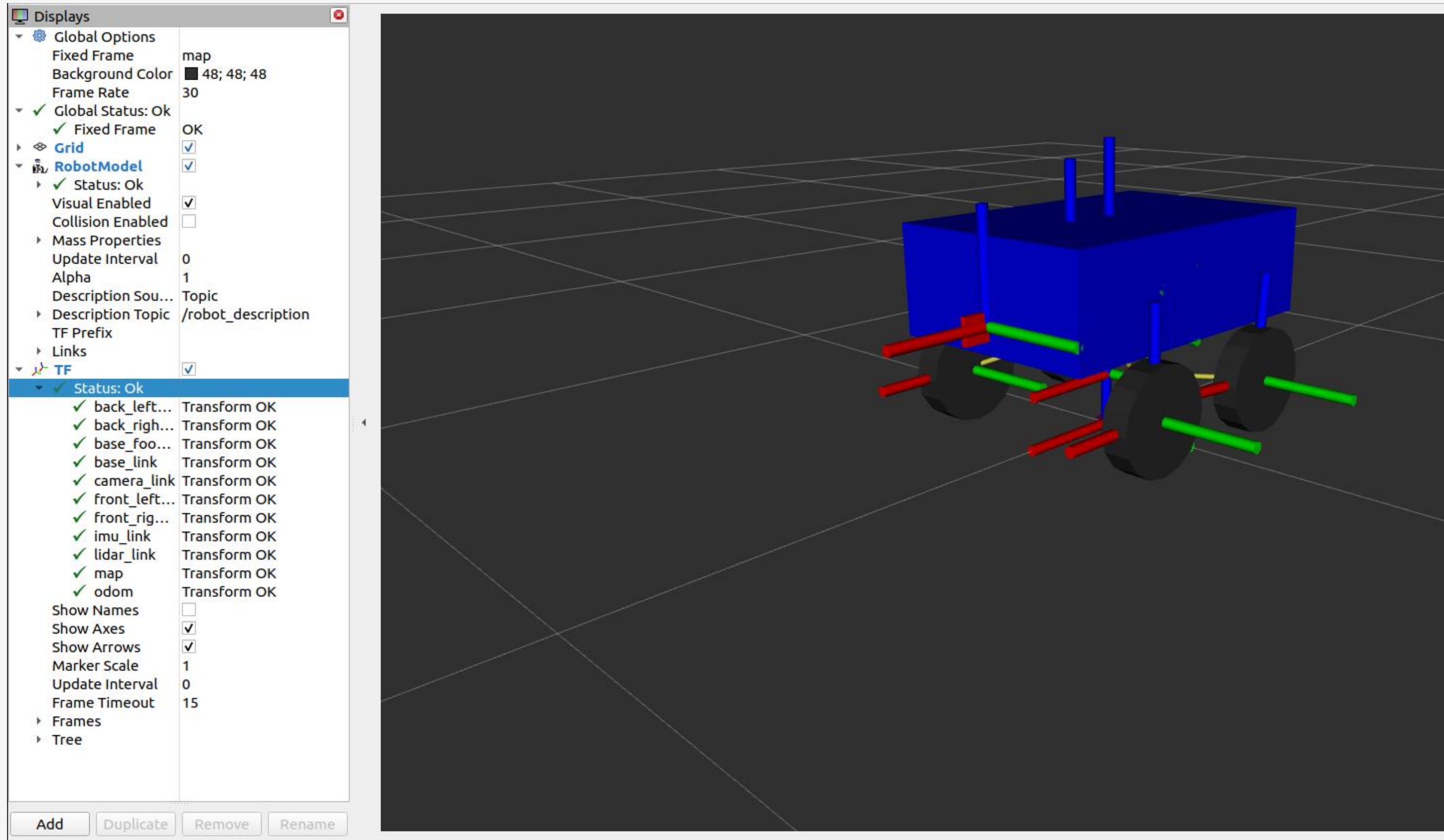
Plugins Gazebo
Classic Spécifiques





Modélisation du robot :

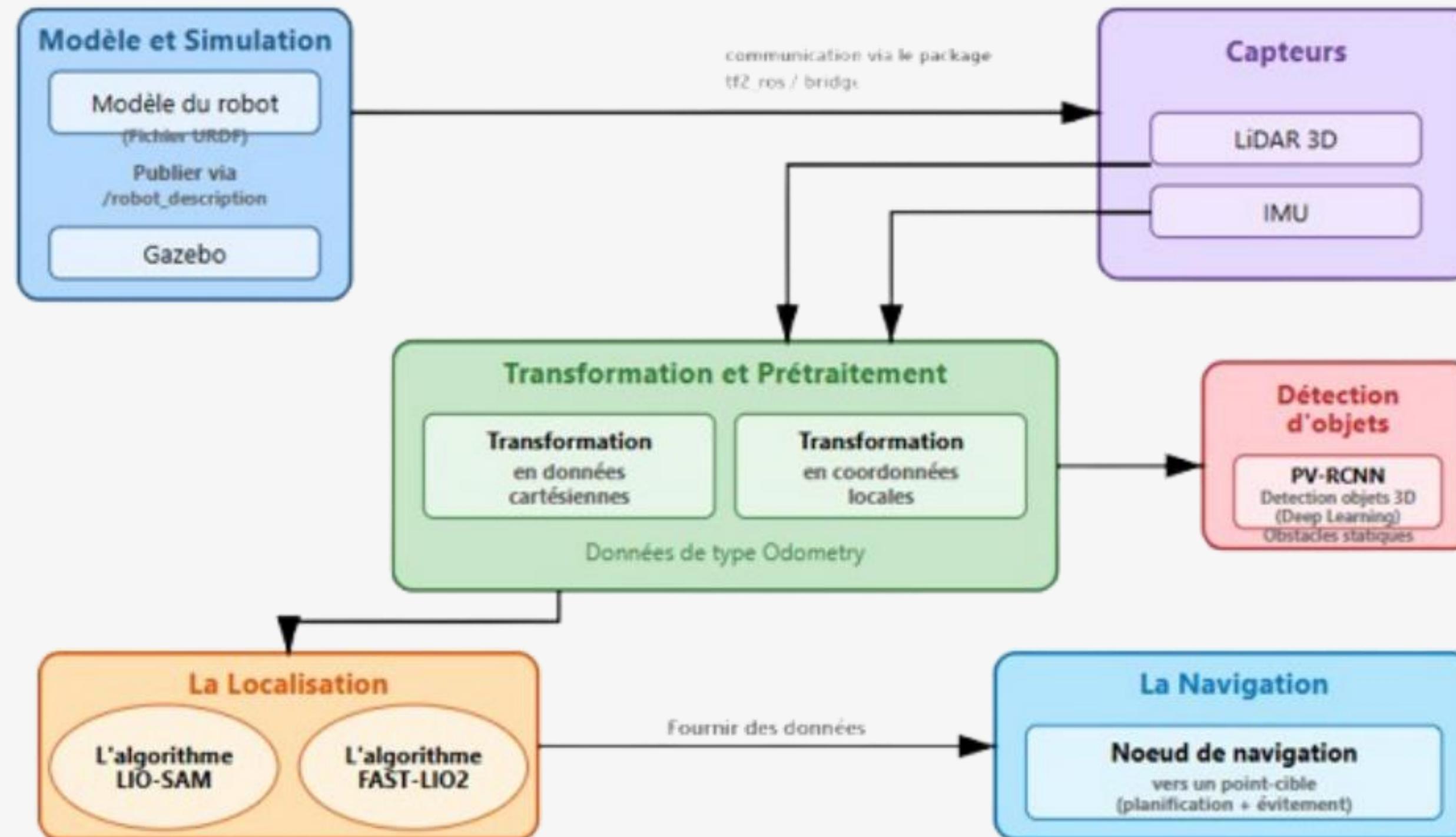
Réalisation

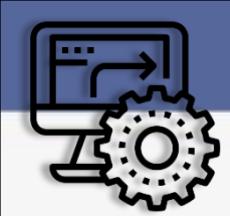




Architecture Globale

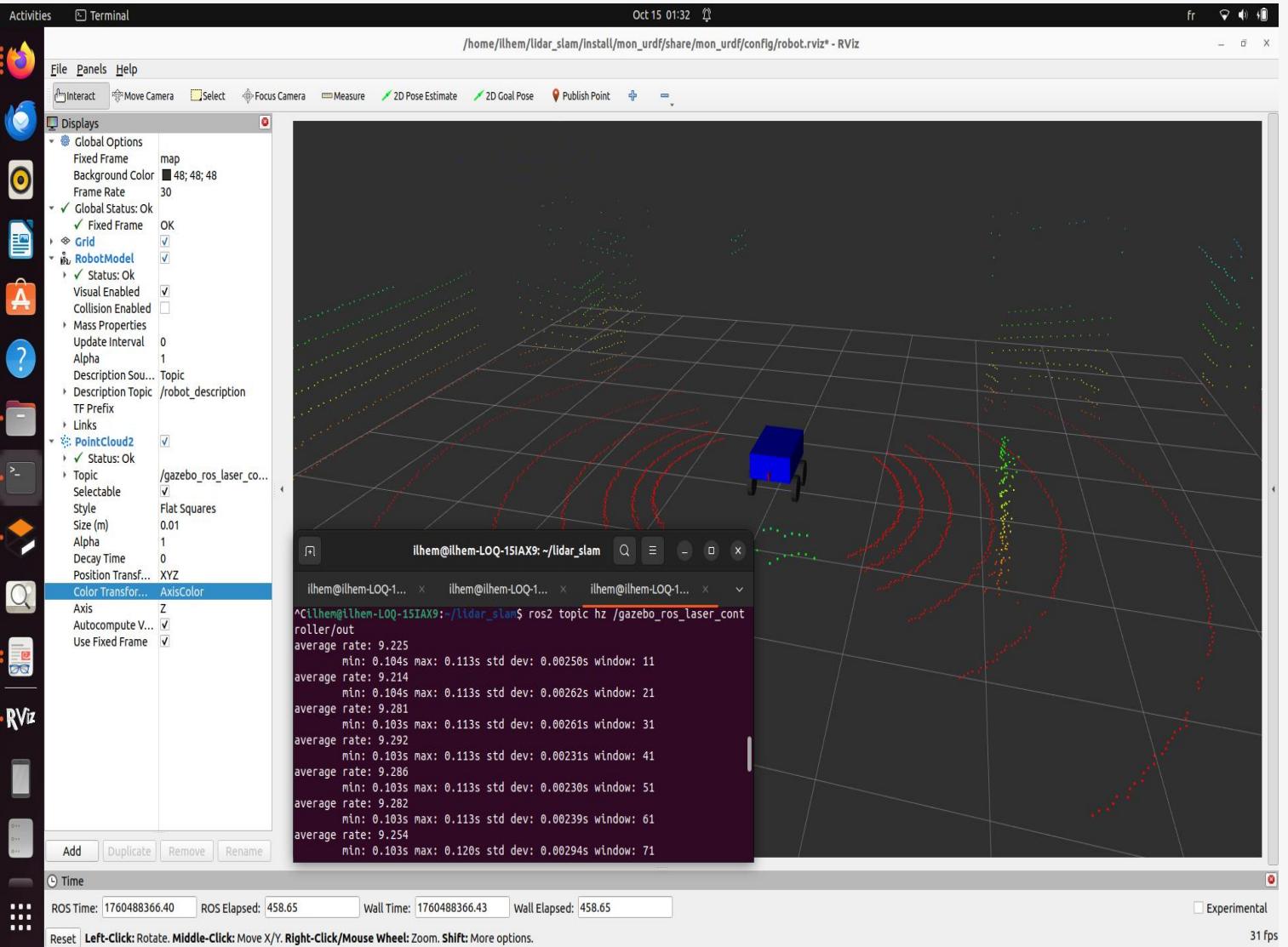
Réalisation





Les données brutes des capteurs

Réalisation



```
^Cilhem@ilhem-LOQ-15IAIX9:~/lidar_slam$ ros2 topic echo /imu imu_plugin/out
header:
  stamp:
    sec: 1443
    nanosec: 148000000
  frame_id: imu_link
  orientation:
    x: -3.7155381329001013e-08
    y: 1.8181315779932742e-07
    z: -2.0172387799554915e-07
    w: 0.9999999999999626
  orientation_covariance:
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
  angular_velocity:
    x: -0.00023593329035282305
    y: 0.00019619650264963244
    z: 0.0002653970936510434
  angular_velocity_covariance:
    - 4.0e-08
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 4.0e-08
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 4.0e-08
  linear_acceleration:
    x: -0.007058853414407711
    y: -0.0046163733286451476
    z: 9.793113806706364
  linear_acceleration_covariance:
    - 0.00028900000000000003
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.0
    - 0.00028900000000000003

^Cilhem@ilhem-LOQ-15IAIX9:~/lidar_slam$ ros2 topic hz /gazebo_ros_laser_controller
average rate: 9.225
  min: 0.104s max: 0.113s std dev: 0.00250s window: 11
average rate: 9.214
  min: 0.104s max: 0.113s std dev: 0.00262s window: 21
average rate: 9.281
  min: 0.103s max: 0.113s std dev: 0.00261s window: 31
average rate: 9.292
  min: 0.103s max: 0.113s std dev: 0.00231s window: 41
average rate: 9.286
  min: 0.103s max: 0.113s std dev: 0.00230s window: 51
average rate: 9.282
  min: 0.103s max: 0.113s std dev: 0.00239s window: 61
average rate: 9.254
  min: 0.103s max: 0.120s std dev: 0.00294s window: 71
```

Ω → Σ† × ↓ → Σ × § → ^∇ C† ∇† × η U C U ' ^ → ∇ § X
3 ⊕ U § C ^ ∇ ∇ é U X ' ^ § U X ' ^ ↓ → é U X ' ^ X
↓ U & → ⊕ ⊖ X

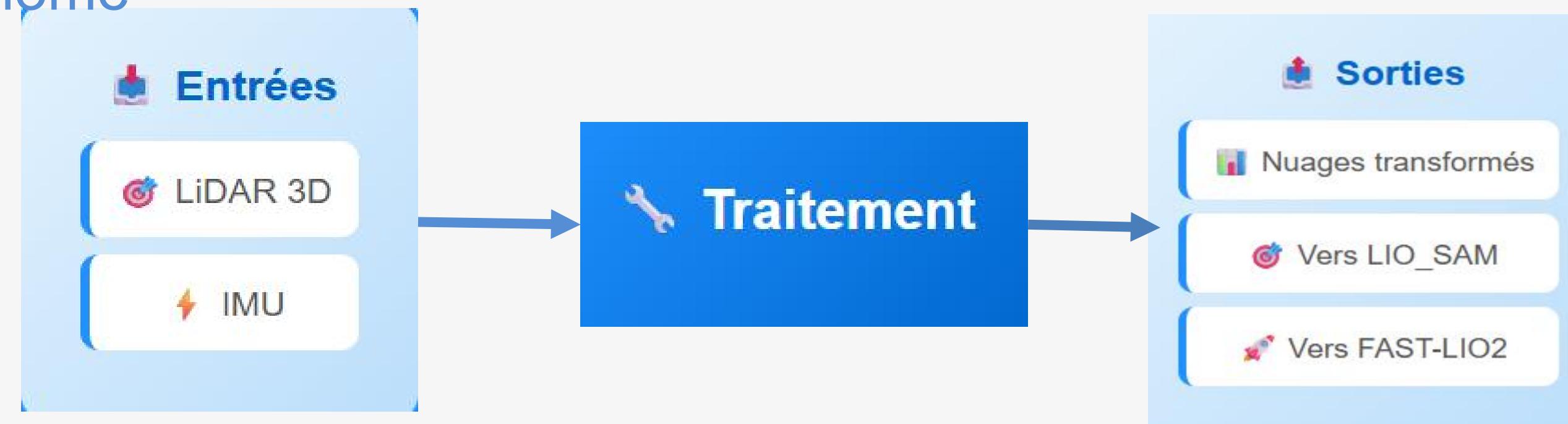
⊕ ^ ∇ ∇ é U X ' ^ § U X C U ↓ ' Ψ * m



Préparation des données capteurs pour la navigation autonome



Réalisation



Transformation Cartésienne

Conversion des coordonnées polaires/sphériques du LiDAR en coordonnées cartésiennes (x, y, z) pour le traitement spatial 3D

Transformation Locale

Passage du référentiel capteur au référentiel robot pour aligner LiDAR et IMU dans un système de coordonnées commun

Données de sortie

Données transformées prêtes pour les algorithmes SLAM

Nuages de points 3D

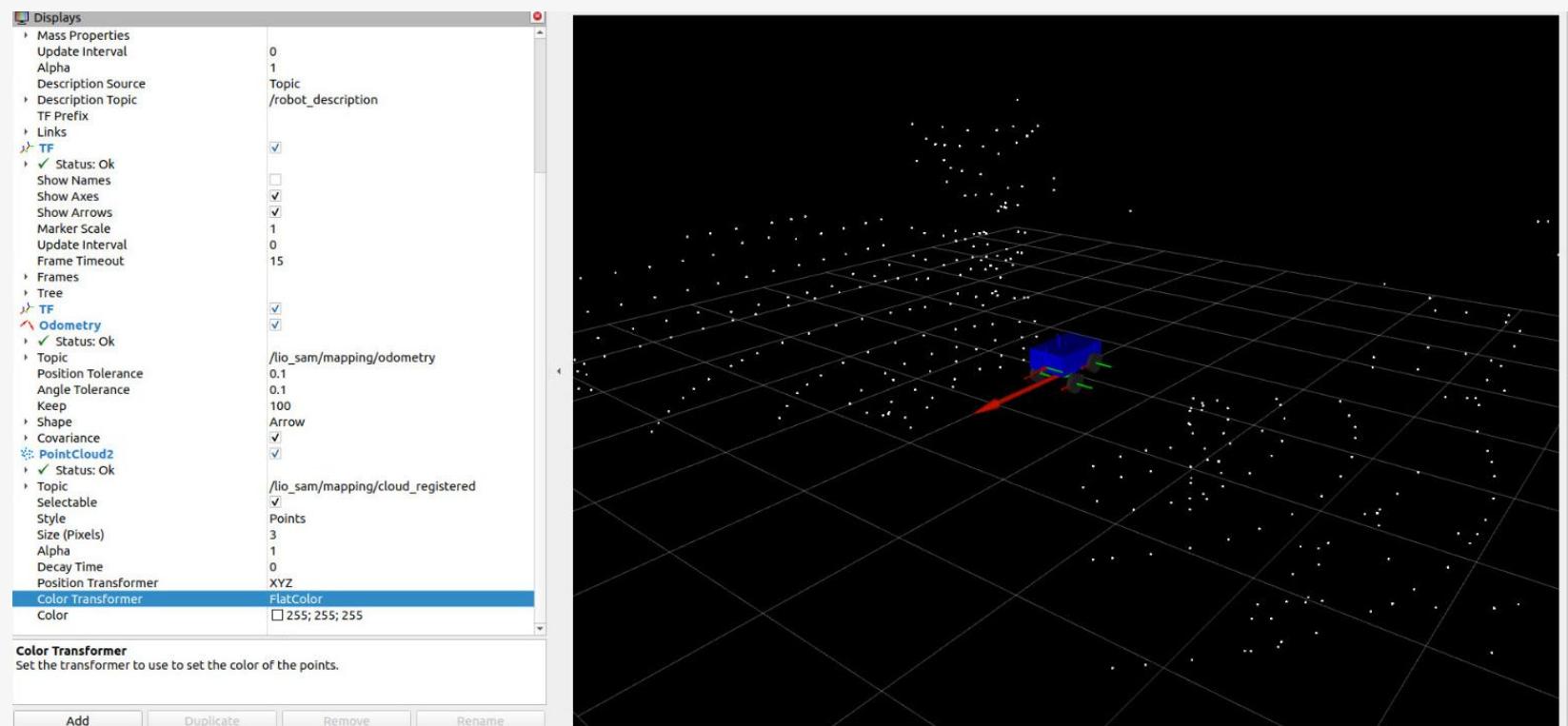
Coordonnées cartésiennes

Données alignées

Référentiel robot



Validation du fonctionnement de LIO_SAM



```
cilhem@cilhem-LOQ-15IAx9:~/lidar_slam$ ros2 topic echo/lio_sam/mapping/odometry
```

```
header:  
  stamp:  
    sec: 1367  
    nanosec: 599000000  
  frame_id: odom  
  child_frame_id: odom_mapping  
pose:  
  pose:  
    position:  
      x: 50.49763107299805  
      y: 94.9974365234375  
      z: -0.49509772658348083  
    orientation:  
      x: 0.008694194664821018  
      y: -0.012253557238948607  
      z: 0.9837350739806286  
      w: 0.17899599306813968  
covariance:  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0  
  - 0.0
```

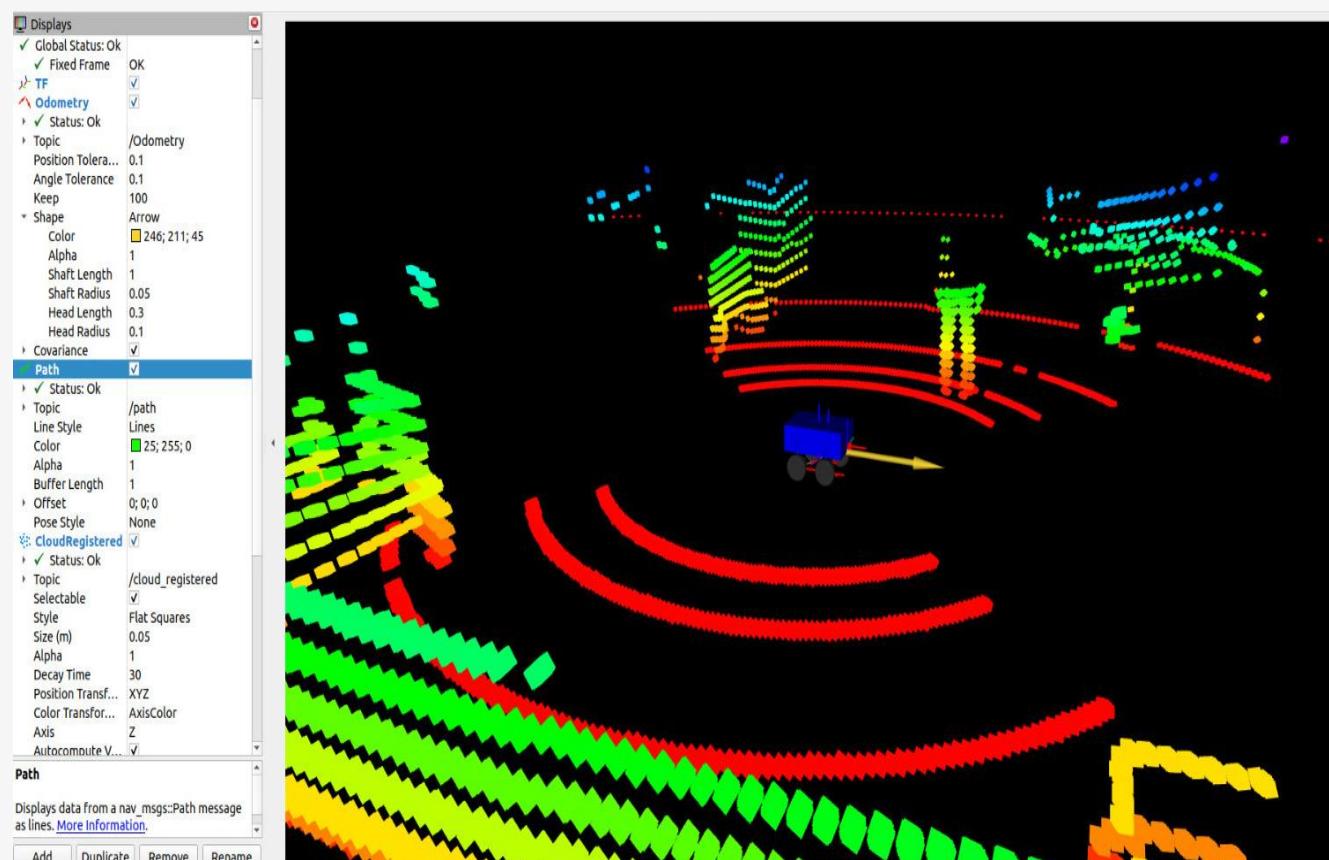
Ø†*nU C U ' ^ → ñ§ñ *↓→ n ñéñ C ñ ñx ' ↓ ^ t C _ " v n → ñ§ñ ~ U C

øUñ C ^ ñéñ Uñ C / ñCñ ñðññ®

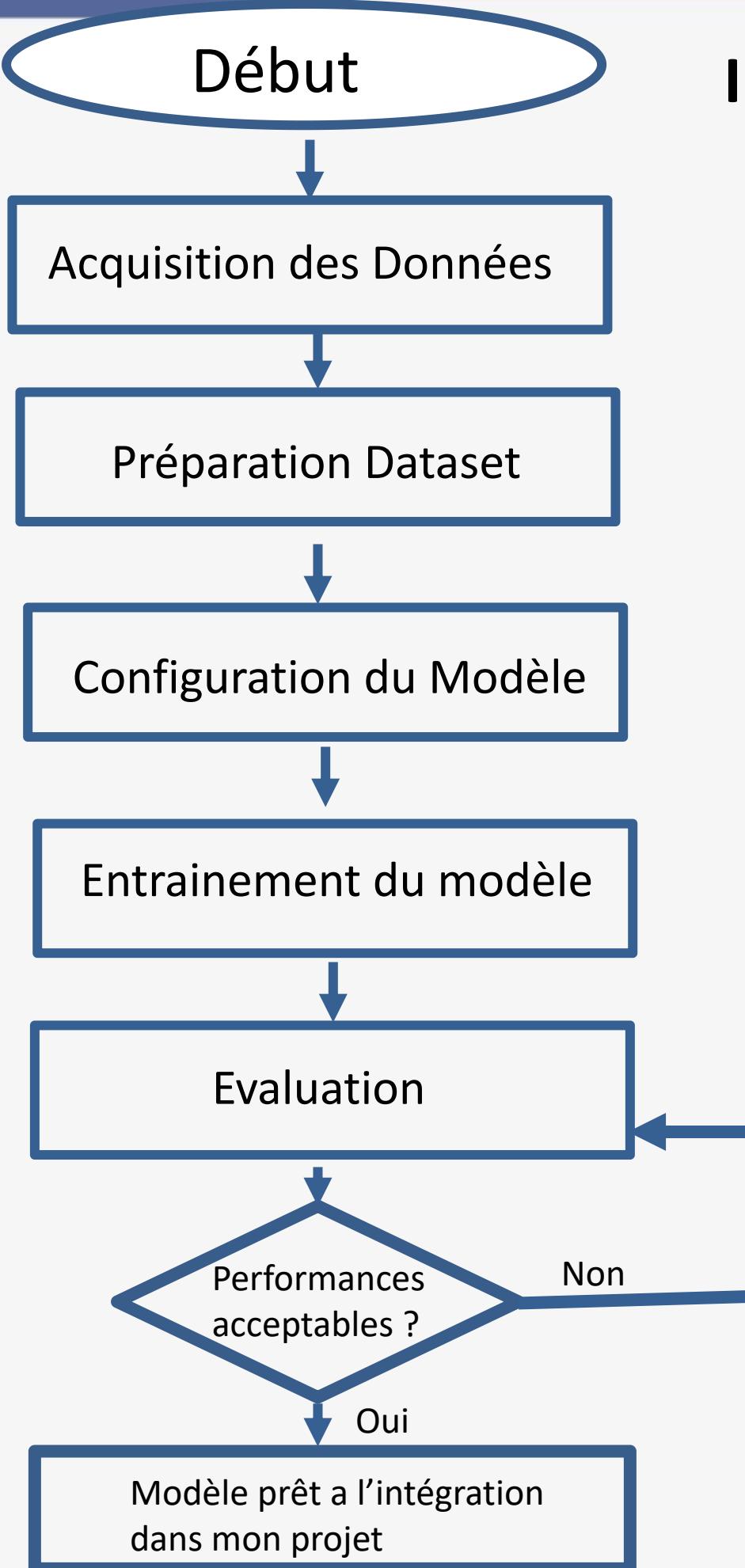


Validation du fonctionnement deFast_LIO2

Réalisation



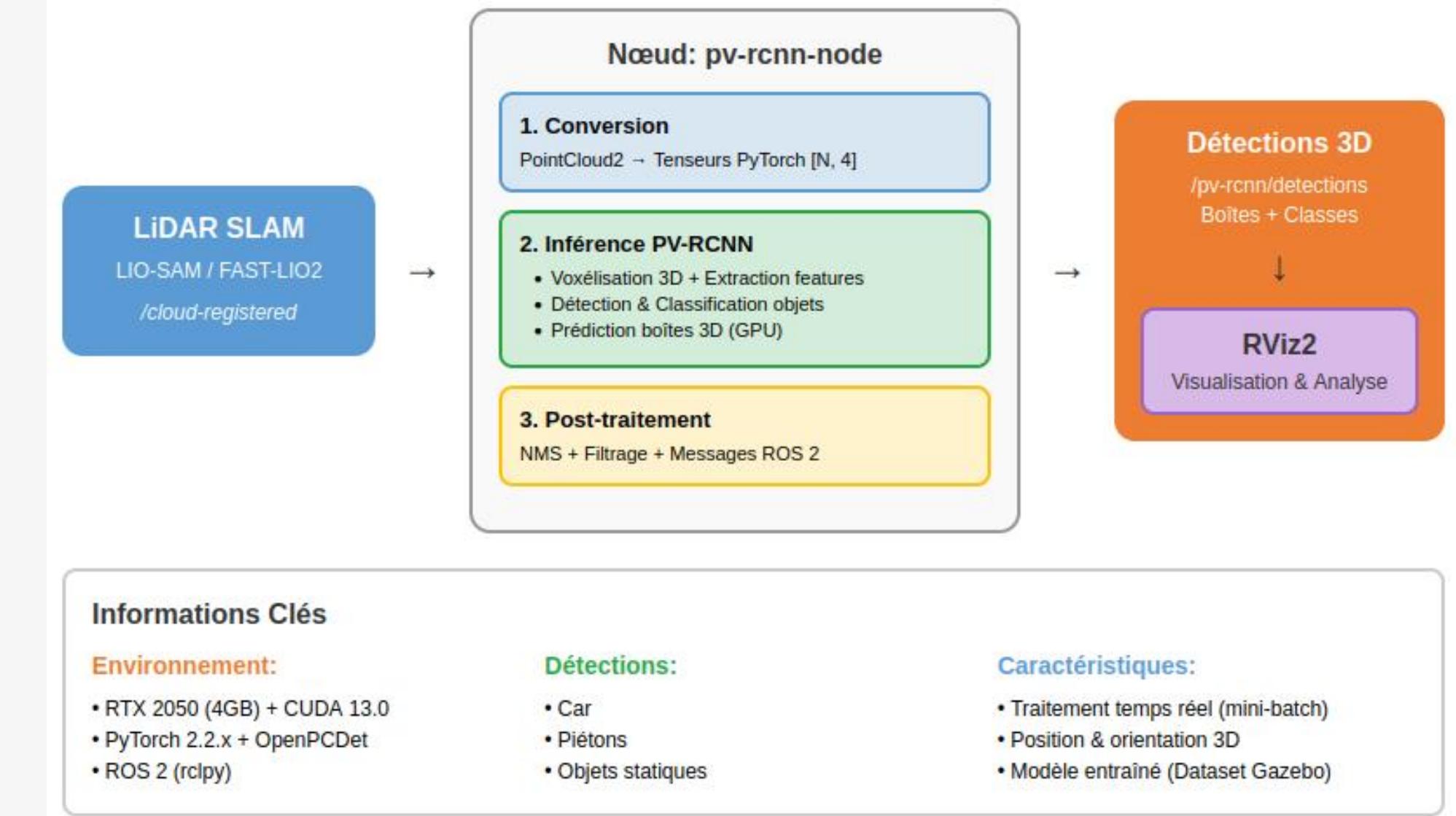
אָמֵן כִּי־נְאָמֵן וְתִּשְׁמַע כִּי־בְּאָמֵן



Intégration du module PV-RCNN

Réalisation

Intégration dans Ros2





Téléopération du robot

Interface Web de Contrôle en Temps Réel

The screenshot shows a Linux desktop environment with a blue header bar. On the left, there's a vertical dock with icons for various applications like a terminal, file manager, and system tools. In the center, a Firefox browser window is open, showing the 'Robot ROS2 Control' web interface. This interface has sections for 'Position' (X: 0.00, Y: 0.00), 'Vitesse Linéaire' (0.00 m/s), 'Vitesse Angulaire' (0.00 rad/s), and a speed slider set to 0.5 m/s. It also features buttons for 'Avant', 'STOP', 'Droite', 'Gauche', and 'Arrière'. A note at the bottom says 'Utilisez les boutons ou les touches WASD/Fleches'. To the right of the browser is a Gazebo simulation window titled 'Gazebo'. The simulation shows a 3D environment with a robot model, a green cube, and some trees. The status bar at the bottom of the Gazebo window displays 'Real Time Factor: 0.95', 'Sim Time: 00:00:17.03/1.0', 'real Time: 00:00:03/23.020', 'Iterations: 100519', 'FPS: 62.48', and a 'Reset Time' button.

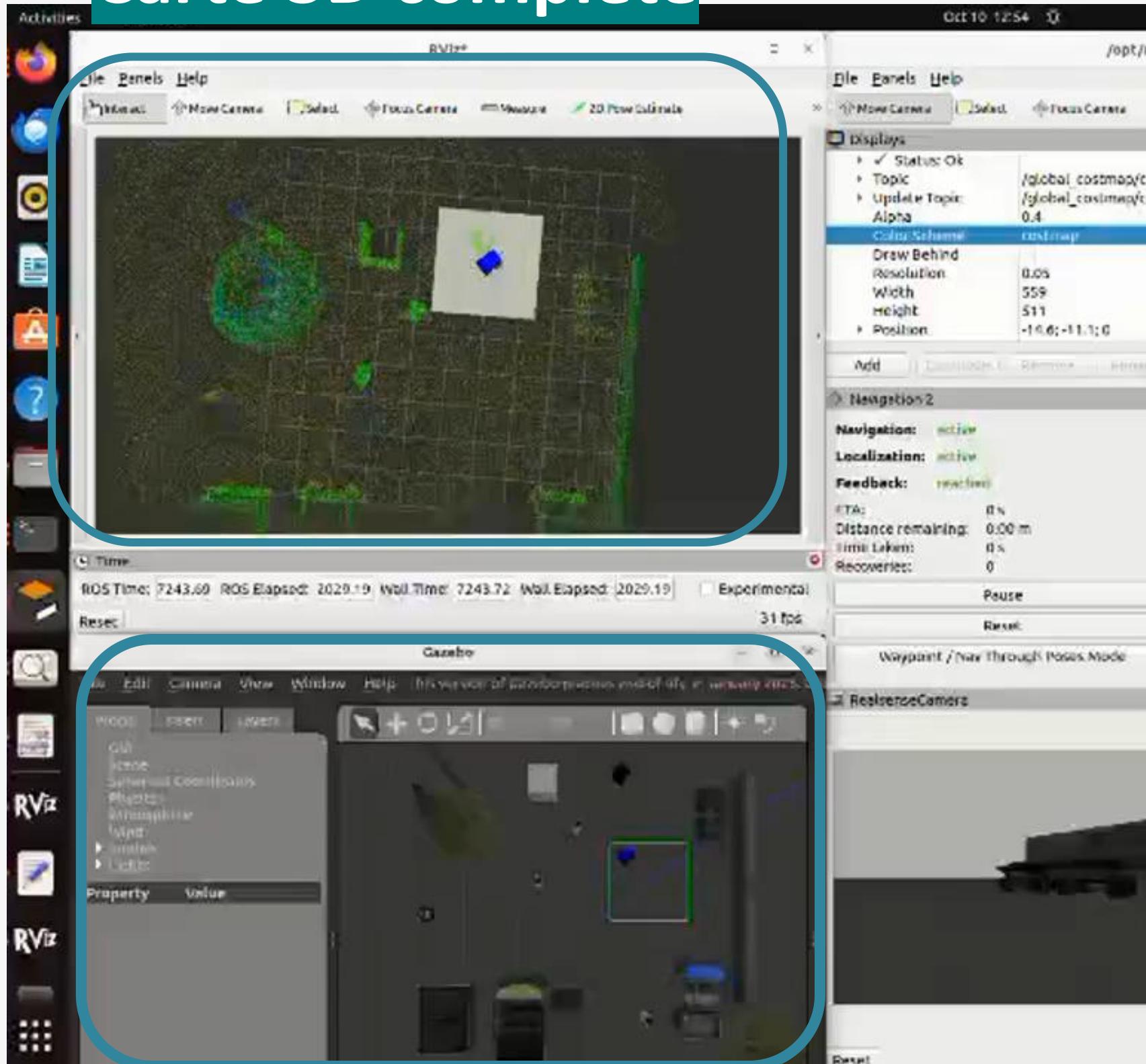
- Contrôler manuellement le robot pour tests
- Exploration et validation système



Navigation autonome avec LIO_SAM :

Réalisation

Carte 3D complète



Carte 2D



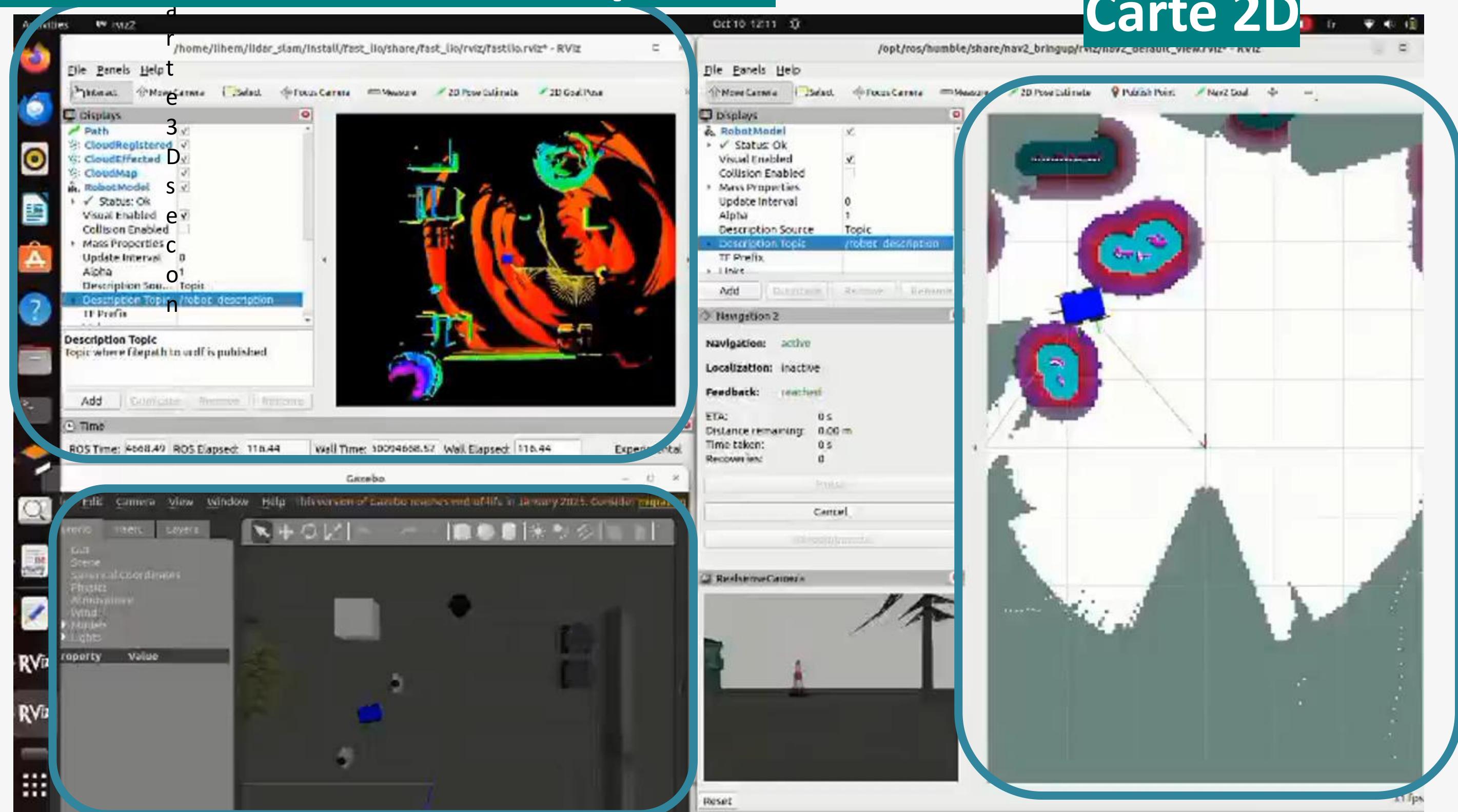
Simulation Gazebo



Navigation autonome avec Fast_LIO2 :

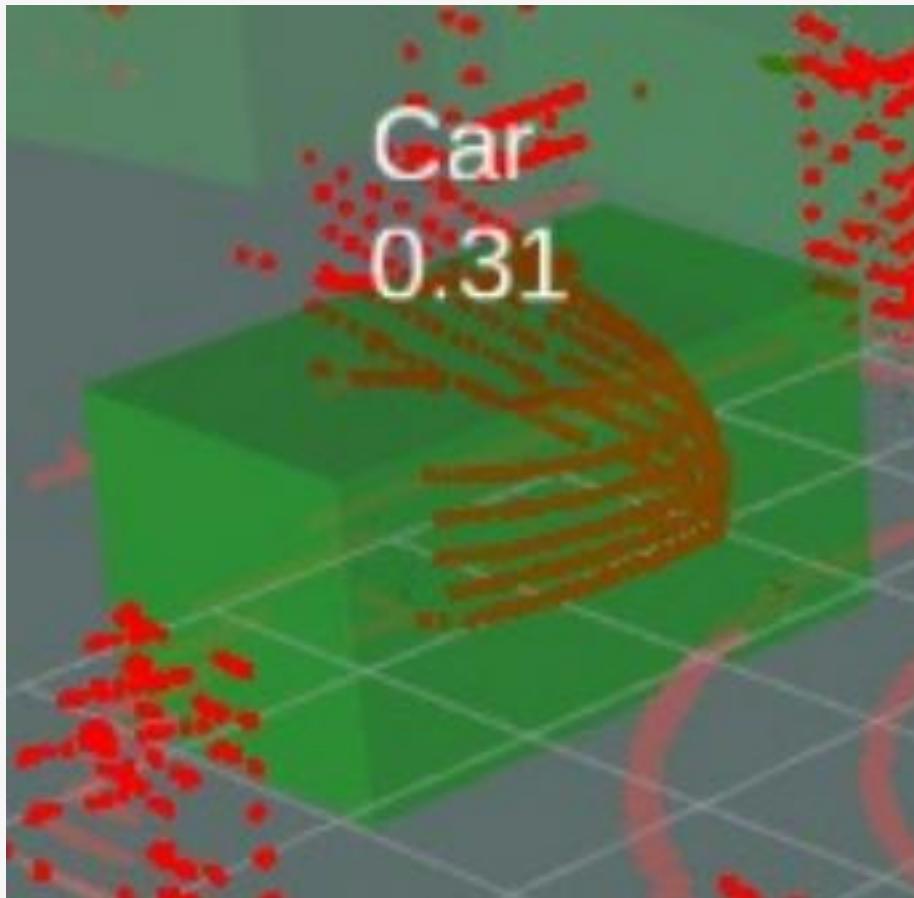
Réalisation

Carte 3D se construit en temps réel

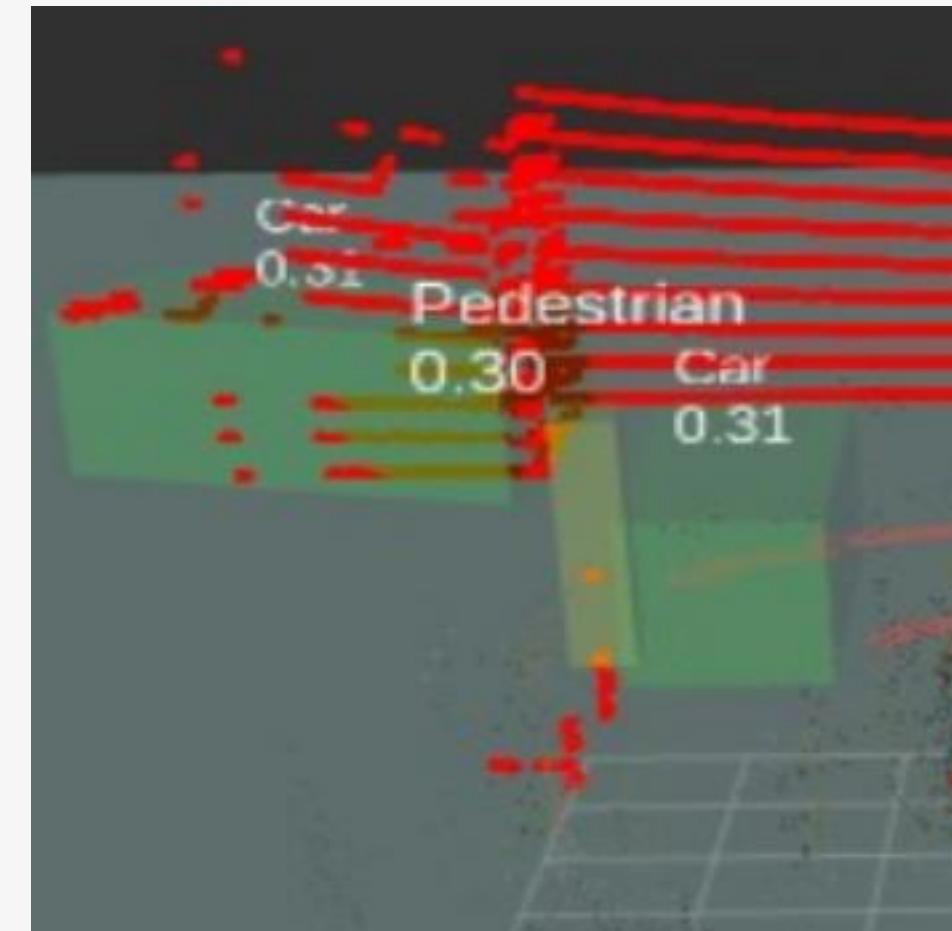




Détection d'objets



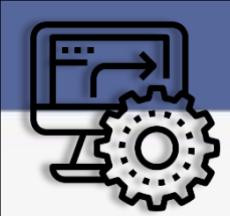
Détection d'une voiture (score : 0.31) dans le nuage de points 3D



Détection d'un piéton (score : 0.30) avec présence d'une voiture en arrière-plan

Expérimentations et résultats

-05-



🎯 Protocole d'évaluation rigoureux

- ✓ 17 missions de navigation autonome
- ✓ Évaluation quantitative avec EVO (métriques APE, RMSE)
- ✓ Environnement simulé Gazebo + Rviz



Métriques d'évaluation :

- **APE (Absolute Pose Error)** : Erreur de localisation globale
- **RMSE** : erreur quadratique moyenne sur toute trajectoire
- **STD** : stabilité et cohérence de l'estimation de pose
- **Max** : Erreur maximale, indicateur de robustesse dans les zones difficiles
- **Taux de réussite mission** : Atteinte de l'objectif dans un rayon de 0.5m
- **Temps d'exécution et charge CPU/RAM**

Outil d'évaluation : EVO (Python package for visual odometry evaluation)



Métrique

APE temporelle

Réussite

Métriques SLAM Comparatives

Fast_LIO2

Succès complets
Succès partiels
Échecs

94%

Taux de Réussite Total
(16/17 missions)

82%
12%
6%

LIO_SAM

Succès complets
Succès partiels
Échecs

82%

Taux de Réussite Total
(14/17 missions)

71%
11%
18%



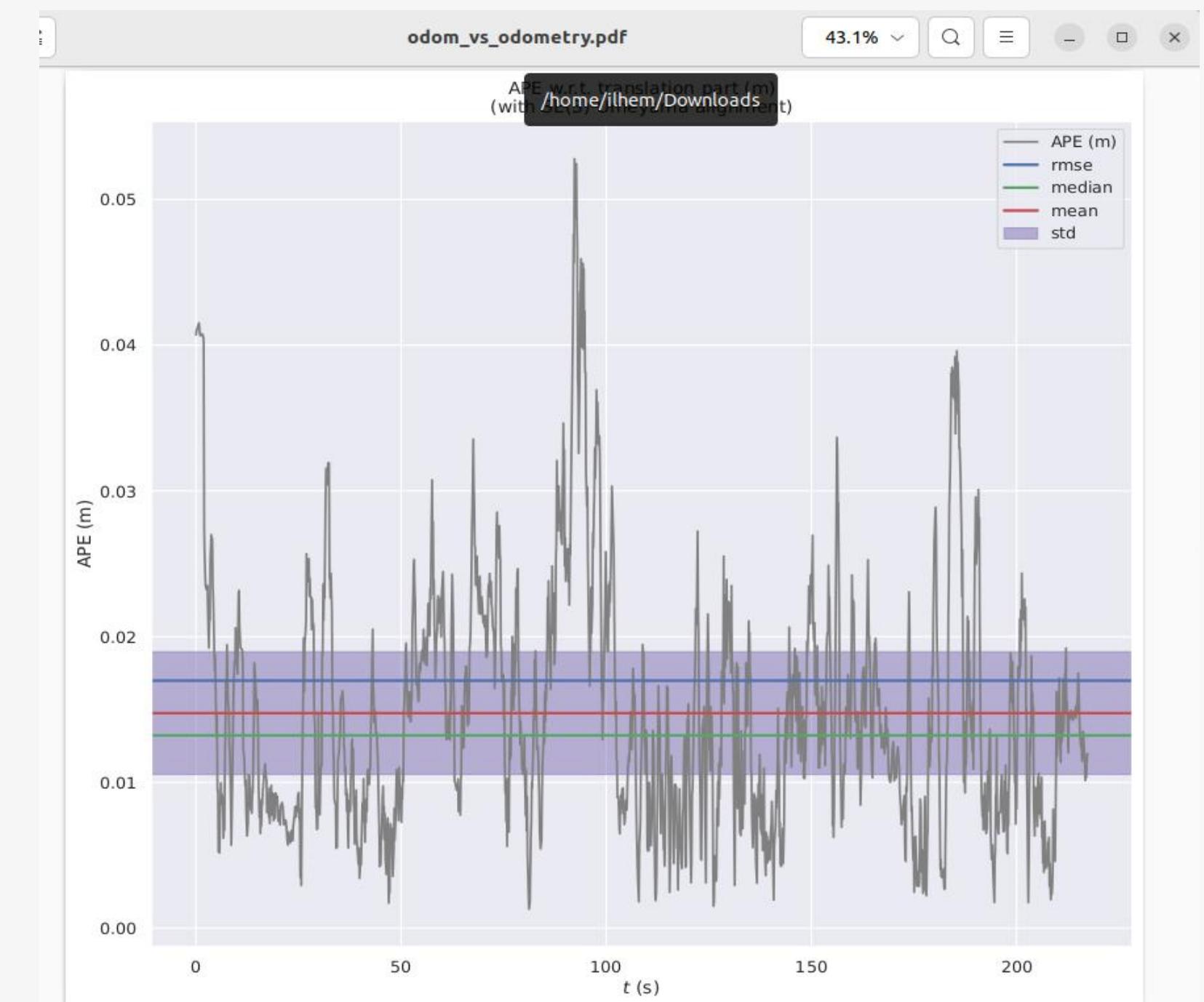
Métriques

APE temporelle

Réussite

Fast_lio2

Métrique	Valeur (m)
RMSE	0.017
Mean	0.014
Median	0.013
STD	0.011
Min	0.001
Max	0.053





Métriques

APE temporelle

Réussite

LIO_SAM

Métrique	Valeur (m)
RMSE	0.504
Mean	0.461
Median	0.415
STD	0.338
Min	0.115
Max	1.010





APE temporelle

Métriques

Recommandations

✓ **Fast_LIO2 recommandé pour:**

- Exploration d'environnements inconnus
- Applications haute précision ($\pm 1\text{-}2\text{cm}$)
- Environnements dynamiques
- Opérationnalité immédiate requise

✓ **LIO_SAM+AMCL recommandé pour:**

- Navigation répétée (carte existante)
- Ressources limitées (-30% CPU, -45% RAM)
- Environnements statiques
- Précision décimétrique suffisante



Évaluation du Système de Détection d'Objets 3D

PV-RCNN - Résultats et Performances

Évolution de l'Entraînement

🔥 Progression sur 80 Époques

Epoch	Loss	Car AP	Ped AP
1	1.82	68.3%	52.1%
20	0.92 ↓	79.5% ↑	64.8% ↑
40	0.65 ↓	84.2% ↑	71.3% ↑
60	0.52 ↓	86.1% ↑	74.2% ↑
80	0.48 ↓	86.7% ↑	74.9% ↑

✓ Réduction de la perte de **73.6%** • Amélioration AP de **+18.4%** (Car) et **+22.8%** (Piéton)

🏆 Performances Finales (Epoch 80)





Scénarios Testés



Zone de stationnement:

Détection précise de deux véhicules proches



Environnement avec végétation

Détection robuste malgré les obstacles



Distances variables

Détections cohérentes à différentes distances



Limites et Défis

Détections manquées

Zones à faible densité de points LiDAR

Détections erronées

Confusion possible avec éléments structurels (poteaux)



Contraintes matérielles

GPU: 80% VRAM | CPU: 0.4 FPS (incompatible temps réel)

Conclusion et perspectives

-06-

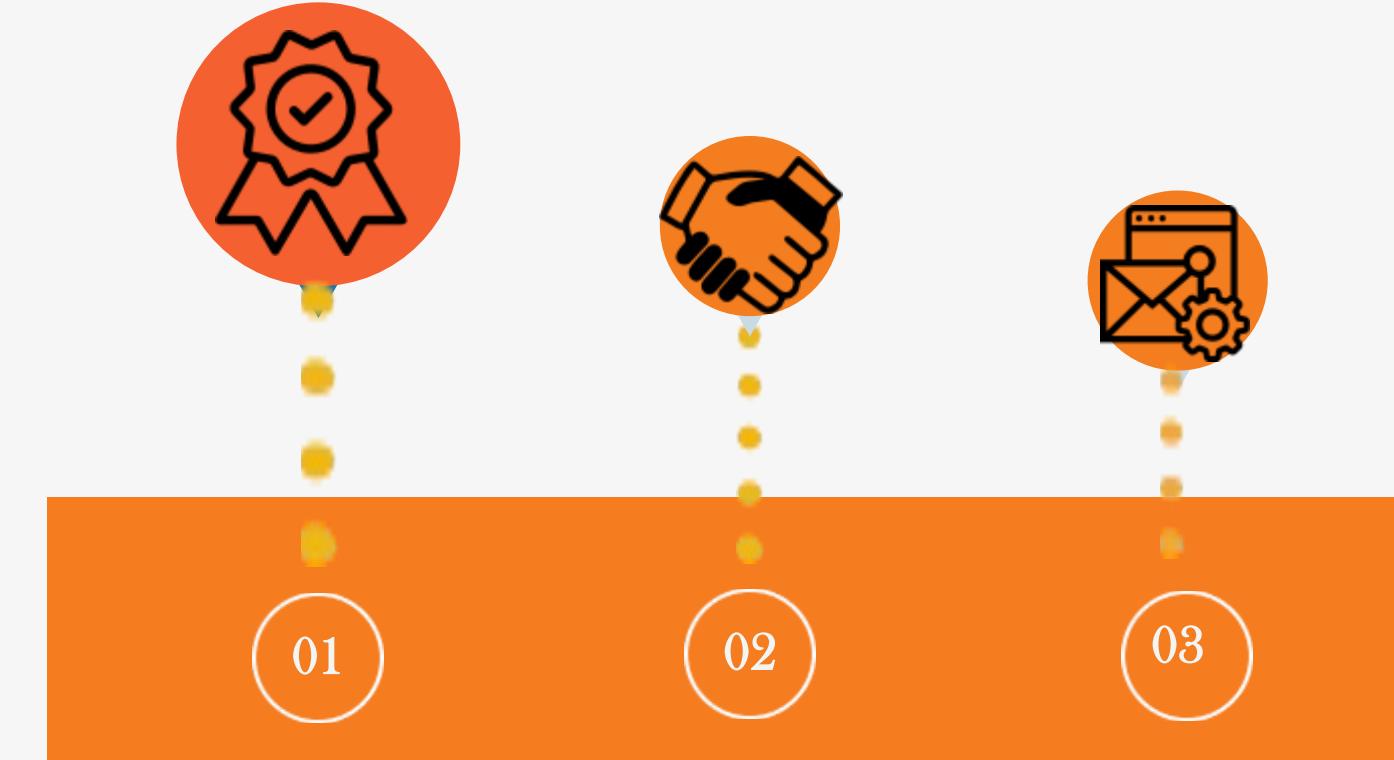


Conclusions

Validation de la solution



- ✓ Intégration réussie d'un système de localisation SLAM sous ROS2
- ✓ Navigation autonome du robot validée avec 94% de réussite pour Fast_llo2 et 82% pour LIO_SAM
- ✓ Étude comparative LIO_SAM vs FAST-LIO2 : recommandations pratiques
- ✓ Détection d'objets 3D performante (86.7% AP véhicules)





Conclusions



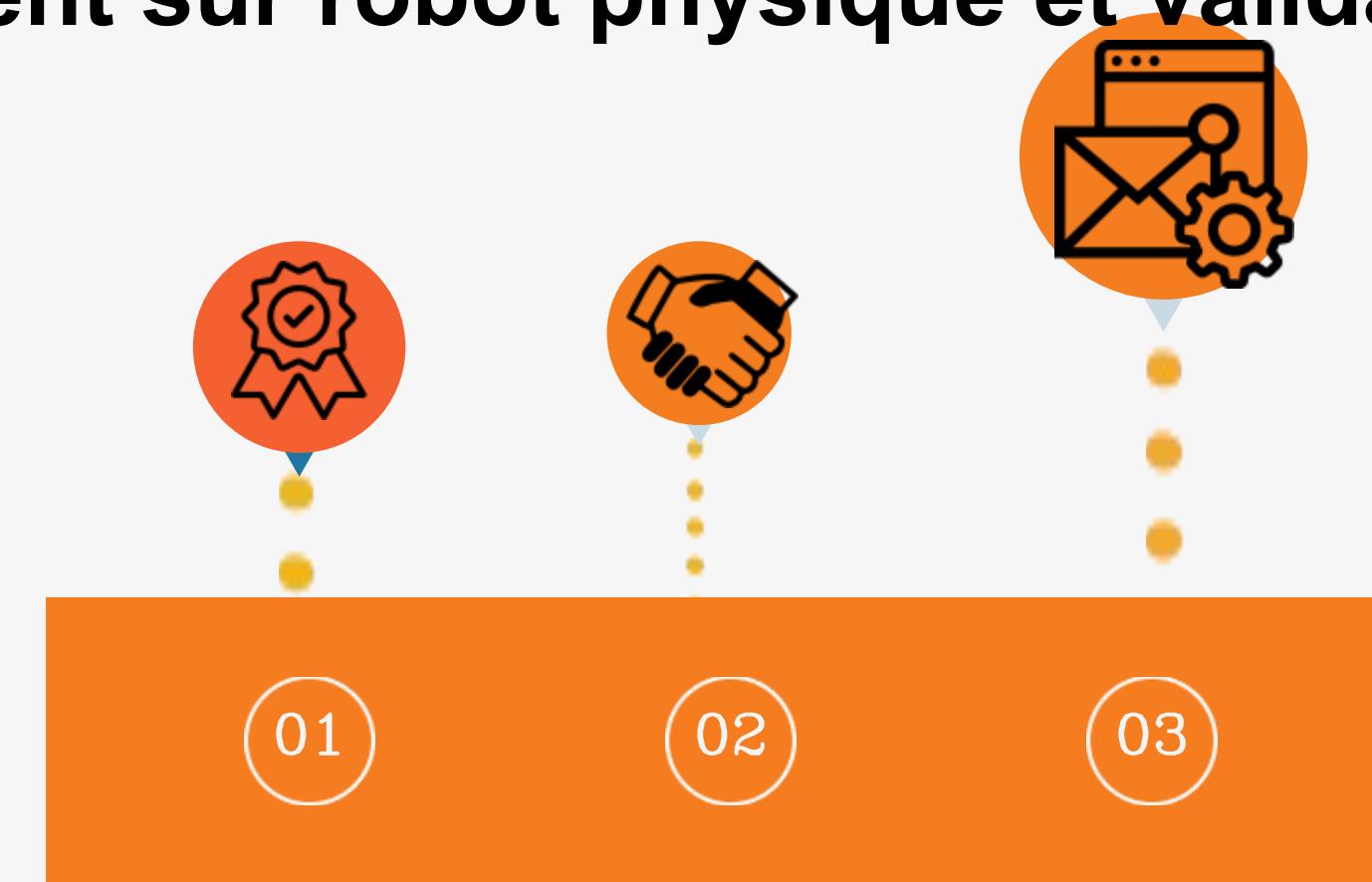
L'opportunité de :

- ✓ Maitriser des nouvelles connaissances en robotique autonome
- ✓ Mettre en pratique les compétences académique



Perspectives

- ✓ Fusion LiDAR-caméra pour conditions difficiles
- ✓ Intégration de scénarios dynamiques pour validation de stabilité
- ✓ Tests sur datasets réels (KITTI, NuScenes) pour validation en conditions variées
- ✓ Déploiement sur robot physique et validation terrain



Aujourd’hui, nous créons des robots capables de comprendre leur environnement. J’espère qu’un jour, notre monde comprendra mieux l’injustice qui touche les plus vulnérables.

Merci pour votre attention.

