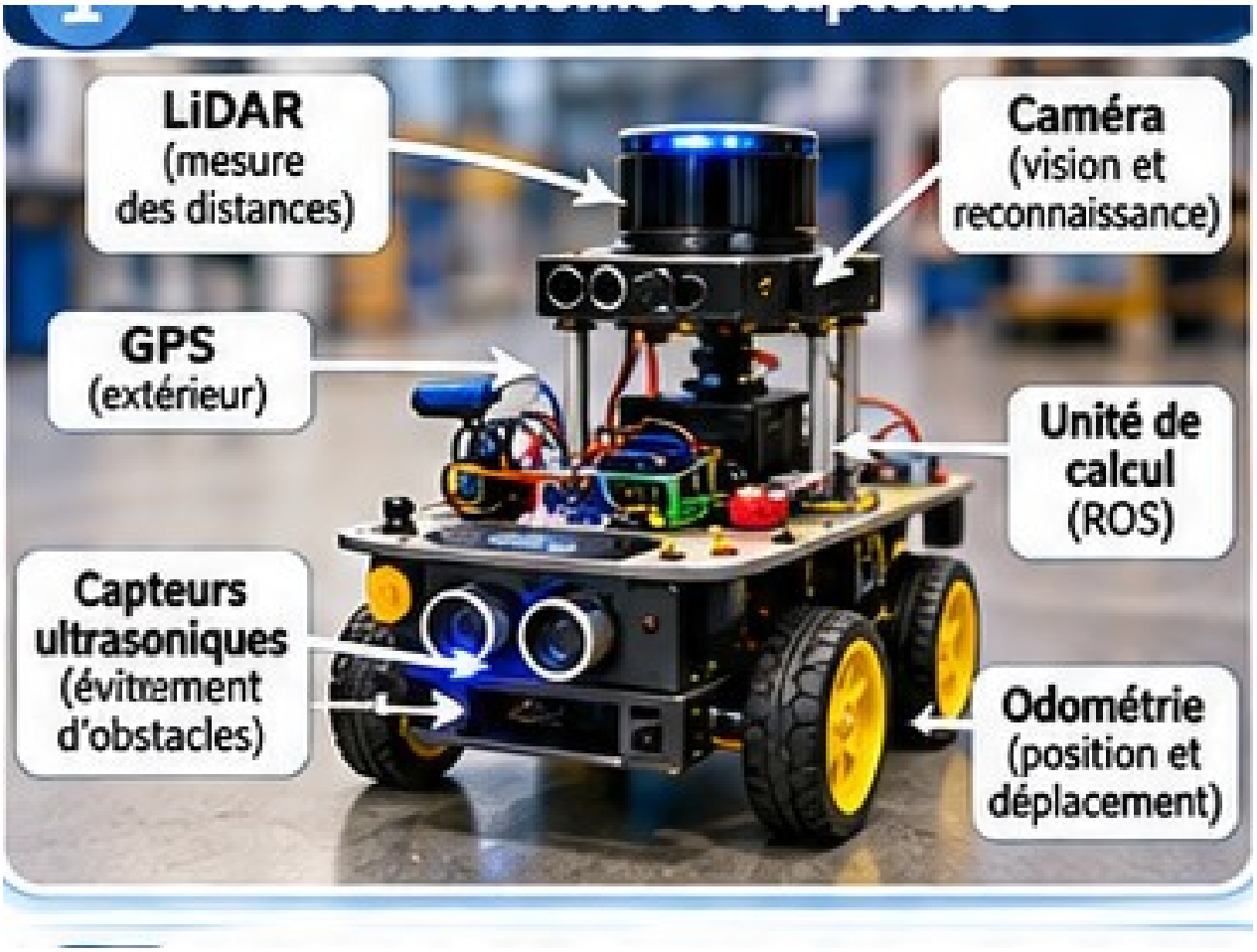
ROB-104 — Leçon 3
Localisation du robot et SLAM

De l’odométrie à une position fiable dans une carte : repères, scan matching, filtrage et localisation simultanée.

Auteur : Angelo Nibizi | Édition 2026



Robot mobile didactique : capteurs et déplacement à interpréter dans un repère.

Compétences et parcours pédagogique

- Distinguer localisation, odométrie, cartographie et SLAM.
- Exprimer une pose 2D et les transformations map → odom → base_link.
- Expliquer la dérive et la correction par observations externes.
- Comparer scan matching, filtre de Kalman étendu et localisation sur carte.
- Évaluer l’incertitude et détecter les échecs de localisation.

Prérequis : ROB-103 (capteurs, covariance, Kalman et LiDAR) et ROB-104 leçon 2 (cartes d’occupation et planification).

1. Que signifie localiser un robot ?

La pose plane s’écrit $q = [x, y, \theta]^T$: x et y décrivent la position dans un repère donné; θ décrit l’orientation. Une estimation sérieuse comprend aussi son instant de validité et une matrice de covariance. Le robot peut connaître sa position relative depuis le départ sans connaître sa position absolue dans la carte.

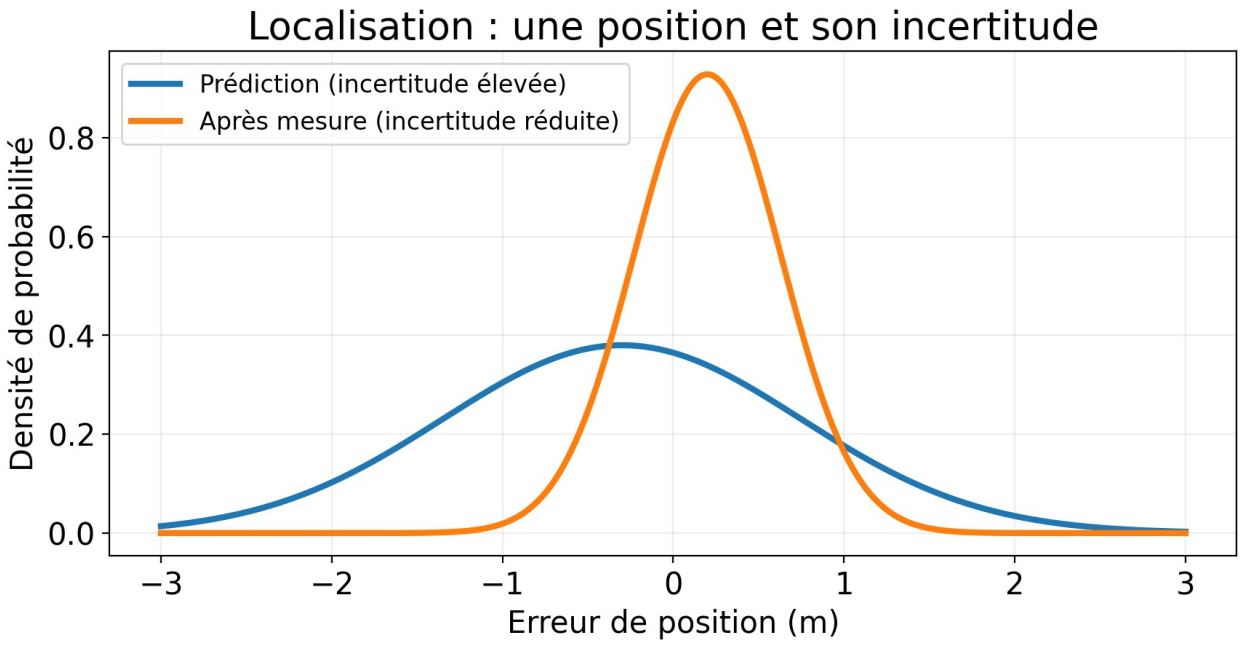


Figure 3.1 — Deux estimations de position peuvent avoir des incertitudes très différentes.

2. Odométrie : utile, mais dérivante

Les encodeurs mesurent la rotation des roues. Sur un robot différentiel, la translation approximative sur un pas est $\Delta s = (\Delta sR + \Delta sL)/2$ et la rotation $\Delta\theta = (\Delta sR - \Delta sL)/L$. Une légère erreur de rayon, un glissement ou un mauvais écartement L produit une erreur cumulative. Une IMU améliore la dynamique à court terme, mais possède également des biais.

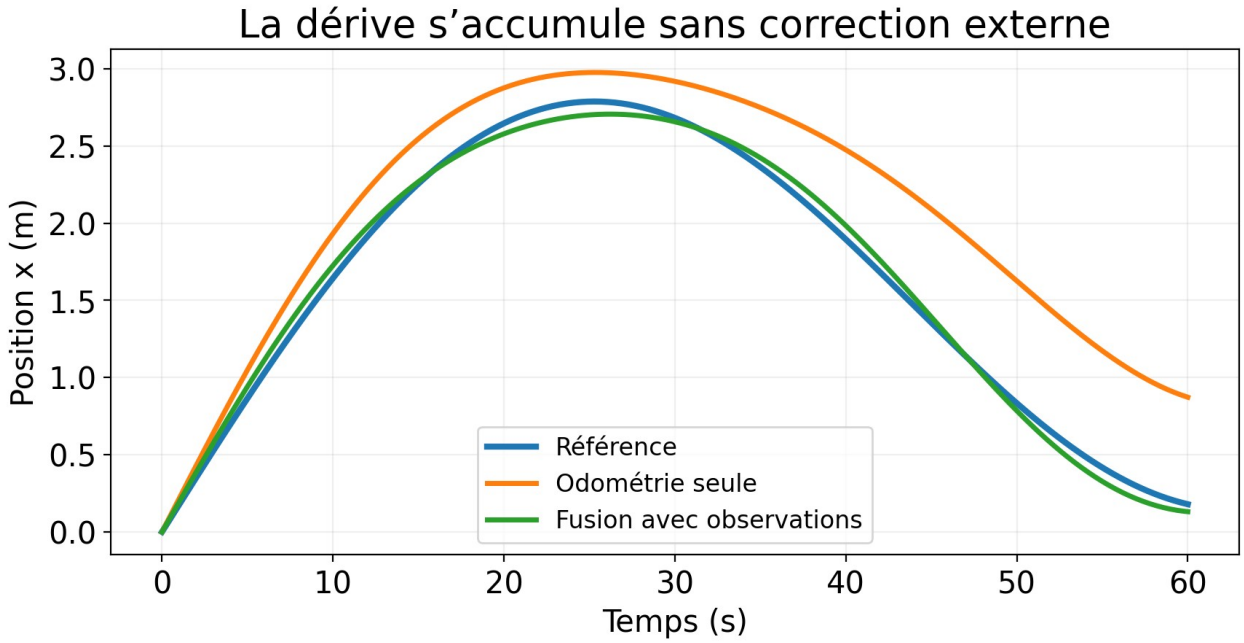


Figure 3.2 — Courbes pédagogiques simulées : la fusion corrige la dérive de l’odométrie.

3. Les repères de coordonnées



Chaque transformation possède un sens, un repère et un horodatage

Figure 3.3 — Chaîne de repères typique dans une architecture ROS 2.

Le repère map représente une référence globale liée à la carte. odom fournit un repère local continu mais susceptible de dériver. base_link suit le corps du robot. laser est fixé au capteur LiDAR. Une pose sans repère ou sans horodatage peut être inutilisable.

4. Localisation par scan matching

Le scan matching cherche la transformation rigide (translation et rotation) qui aligne les points LiDAR courants avec une carte ou un scan précédent. Une formulation pédagogique consiste à minimiser une somme de distances entre points correspondants. Les correspondances incorrectes, les environnements symétriques et les objets mobiles peuvent conduire à un minimum trompeur.

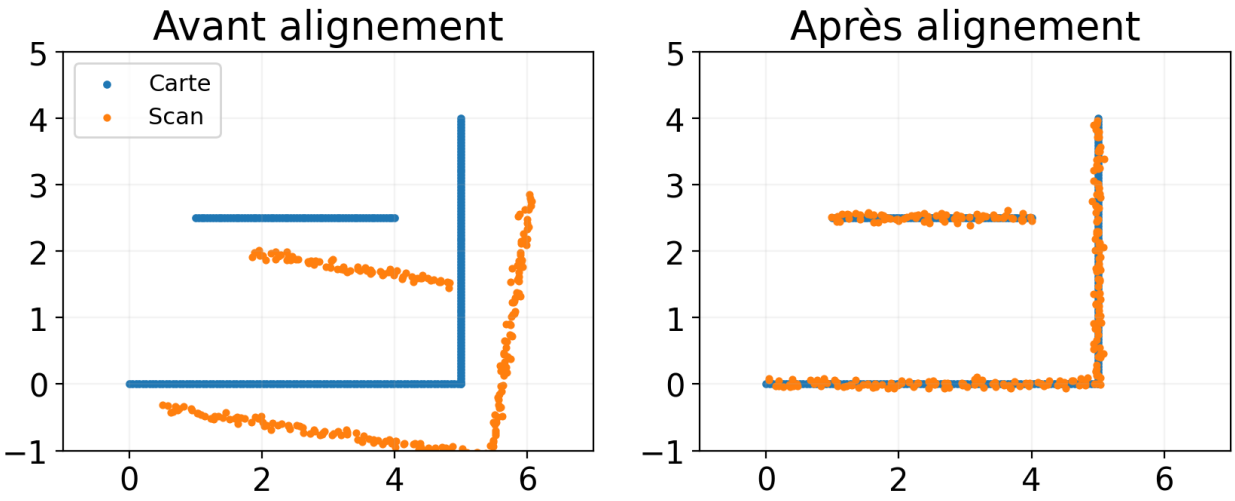


Figure 3.4 — Alignement de deux ensembles de points : représentation simulée.

5. Localisation et SLAM : deux tâches liées

En localisation sur carte connue, le robot estime sa pose dans une carte préexistante. En SLAM, il doit simultanément estimer sa trajectoire et construire ou mettre à jour une carte. Les boucles fermées (loop closure) permettent de reconnaître un lieu déjà visité et de corriger une partie de la dérive accumulée.

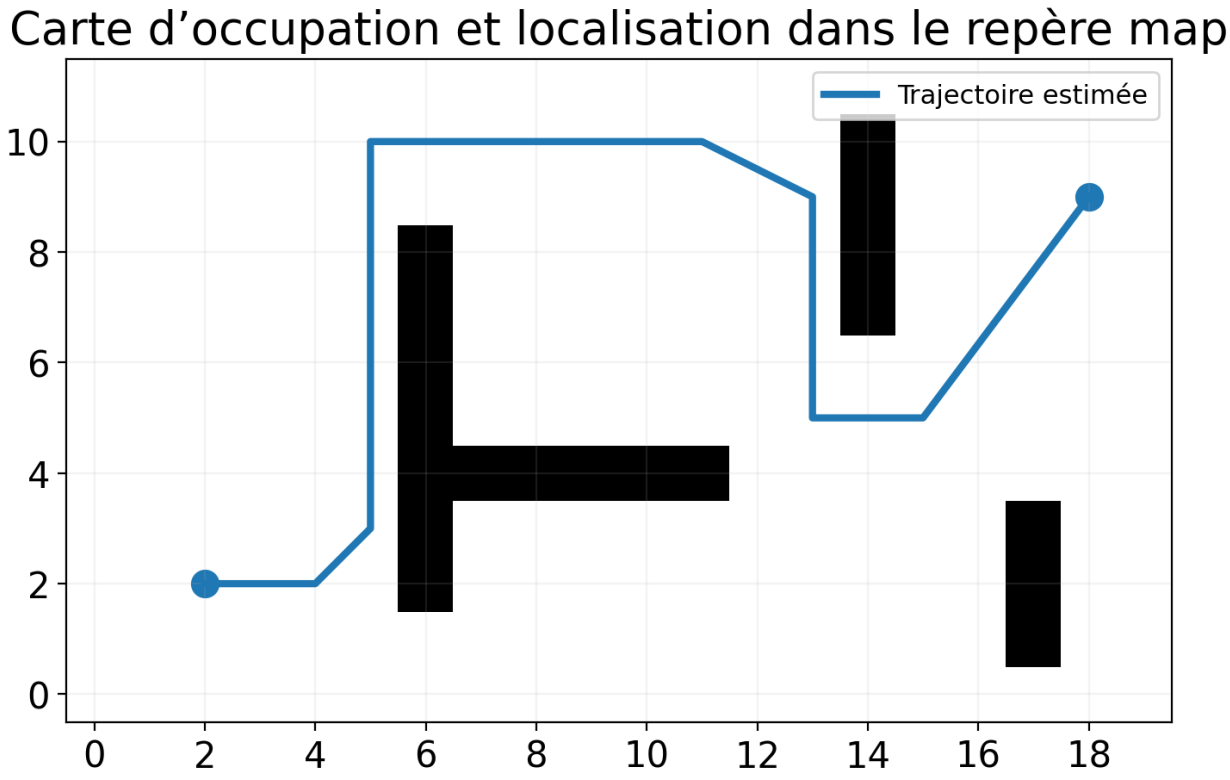


Figure 3.5 — Carte d’occupation simulée, avec pose initiale et trajet estimé.

6. Fusion probabiliste et incertitude

Le modèle d’évolution prédit l’état; une mesure LiDAR ou visuelle le corrige. Dans un EKF, le gain dépend des covariances du modèle et de la mesure. Une petite covariance annoncée à tort peut donner un poids excessif à une mesure erronée. La covariance doit être suivie et évaluée contre les erreurs observées.

Exemple résolu : correction 1D

Prédiction $x^- = 4{,}0$ m, variance $P^- = 0{,}36$ m². Mesure $z = 4{,}6$ m, variance $R = 0{,}09$ m². Gain $K = 0{,}36/(0{,}36+0{,}09) = 0{,}80$. Innovation $= 4{,}6-4{,}0 = 0{,}6$ m. État corrigé $x^+ = 4{,}0+0{,}80\times0{,}6 = 4{,}48$ m. Variance corrigée $P^+ = (1-0{,}80)\times0{,}36 = 0{,}072$ m². Ces équations illustrent un cas scalaire simplifié, pas le SLAM complet.

7. Diagnostic : quand la localisation devient-elle peu fiable ?

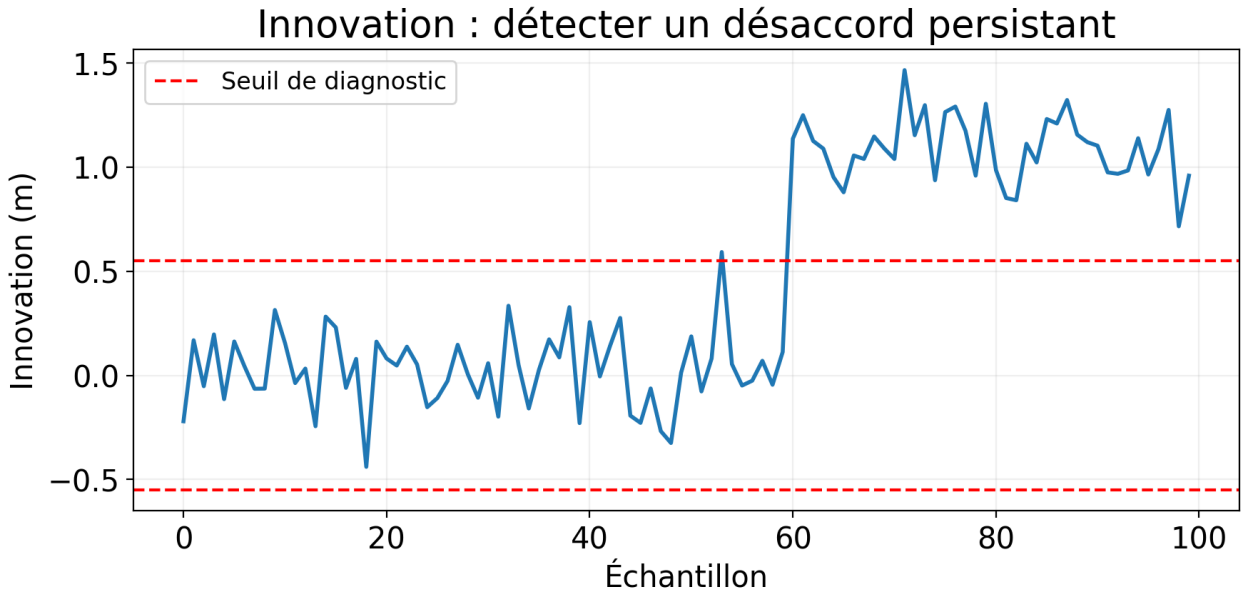


Figure 3.6 — Une innovation persistante peut révéler un biais, un mauvais appariement ou un capteur dégradé.

- Scan LiDAR absent ou trop ancien : détecter le timeout et réduire les capacités.
- Incohérence odométrie/LiDAR : contrôler glissement, repères et horodatage.
- Covariance qui augmente : vérifier la perte d'observations informatives.
- Carte incohérente : contrôler calibration extrinsèque et fermetures de boucle.
- Localisation ambiguë : éviter de commander une trajectoire comme si la pose était certaine.

8. Laboratoire virtuel — retrouver sa position dans un bâtiment

Objectif : simuler un robot différentiel dans une pièce comportant murs, couloirs et obstacles. Utiliser ROS 2 avec un simulateur adapté ou une simulation Python de scans 2D.

- Construire une carte 2D et définir les repères map, odom, base_link et laser.
- Simuler 60 secondes d’encodeurs avec une erreur de rayon de roue de 2 %.
- Produire un scan LiDAR bruité à 10 Hz et visualiser les points.
- Aligner un scan sur la carte et corriger la pose odométrique.
- Comparer trajectoire de référence, odométrie et localisation corrigée.
- Injecter 5 secondes de perte LiDAR et tracer la covariance.
- Rétablir le capteur; vérifier une correction contrôlée et l’absence de saut dangereux.
- Rendre les graphes, la carte, un journal de fautes et une analyse des erreurs.

9. Questions d’évaluation avec corrigés

1. Quelle différence entre odom et map ?

Corrigé : odom est local et continu mais dérive; map fournit une référence globale de carte pouvant corriger la dérive.

2. Pourquoi le scan matching peut-il échouer dans un long couloir ?

Corrigé : Les structures répétitives ou peu distinctives rendent certaines transformations ambiguës.

3. Pourquoi conserver la covariance ?

Corrigé : Elle exprime la confiance dans l’estimation et permet d’adapter les décisions.

4. Quel est le gain K pour $P^{-} = 0{,}36$ et $R = 0{,}09$?

Corrigé : $K = 0{,}80$.

5. Que faire si le LiDAR disparaît ?

Corrigé : Détecter la perte, augmenter l’incertitude et passer à un comportement dégradé défini.

10. Film pédagogique — déroulé par scènes

Scène 1 : une étudiante présente le robot et explique la différence entre une carte et une position. Scène 2 : le professeur montre un déplacement avec odométrie seule; l’erreur s’accumule à l’écran. Scène 3 : le LiDAR observe les murs et les points se superposent progressivement à la carte. Scène 4 : la fusion corrige la pose et la covariance diminue. Scène 5 : le professeur simule une perte de capteur; le robot ralentit et signale son mode dégradé. Scène 6 : retour des données, validation de la localisation, questions à l’étudiant et conclusion.

11. Critères de réussite

- Définition correcte des repères et des unités.
- Graphiques de trajectoires lisibles et annotés.
- Calcul numérique exact et interprétation de l’incertitude.
- Réaction démontrée à une perte de capteur.
- Rapport de laboratoire reproductible et présentation orale claire.

Synthèse

Une bonne navigation ne commence pas par le choix d’un chemin : elle commence par une estimation de pose suffisamment fiable pour agir. L’étudiant doit être capable d’expliquer comment le robot sait où il est, quelles données le soutiennent et ce qu’il fait lorsque cette connaissance devient incertaine.