ROB-104 — Systèmes autonomes et navigation avancée

Leçon 4 — Planification dynamique et évitement d'obstacles mobiles

Collège du Sacré-Cœur de Gatineau, Québec — Faculté d'informatique — Département de robotique, intelligence artificielle et systèmes autonomes

Auteur : Angelo Nibizi, recteur

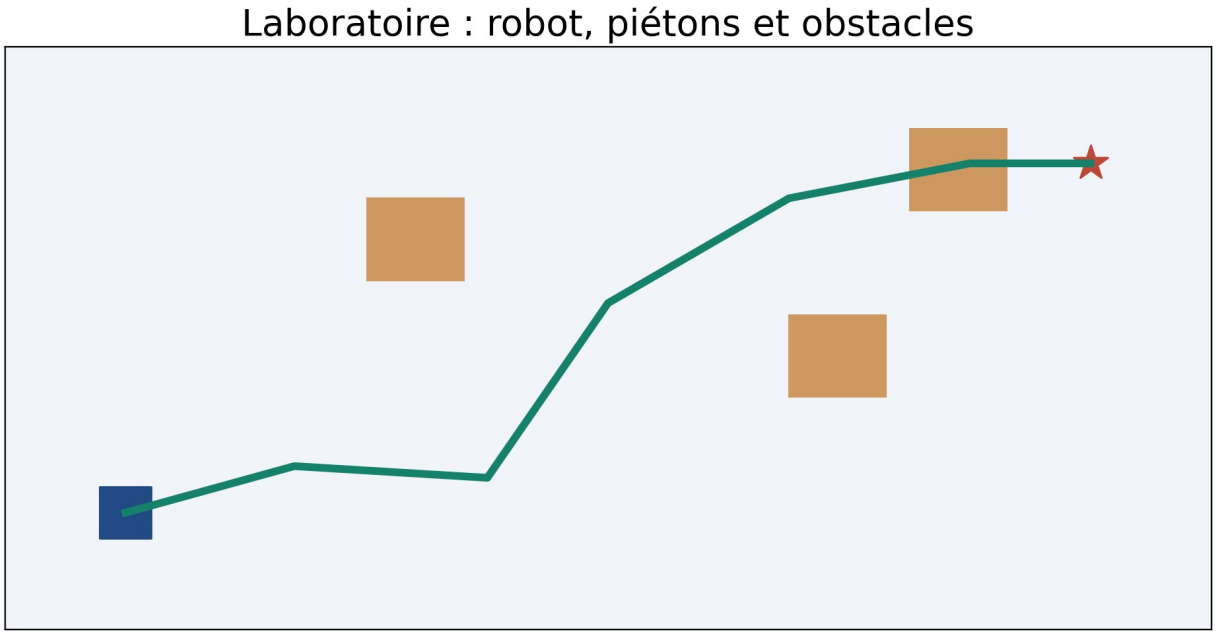


Figure 4.1 — Situation de laboratoire : robot, obstacles et destination.

Objectifs de la leçon

- Distinguer planification globale et locale.
- Prédire les mouvements d'un obstacle et calculer le temps avant collision.
- Comparer DWA, TEB, MPC et la replanification locale.
- Concevoir un arrêt sûr et une reprise contrôlée.

1. Navigation dans un environnement changeant

Dans une carte statique, les obstacles restent fixes. Dans un corridor réel, personnes, chariots et robots peuvent modifier leur direction. Le système doit mettre à jour les pistes d'objets et replanifier selon les observations les plus récentes. Une couche de surveillance indépendante vérifie les limites de sécurité.

Une boucle de navigation comporte perception, suivi des objets, prédiction, planification locale, vérification des contraintes et commande. Elle recommence plusieurs fois par seconde selon les capacités du robot.

2. Suivi et prédiction des obstacles

L'état simplifié d'un obstacle peut être noté (x, y, v_x, v_y). Sous hypothèse de vitesse constante : $p(t+\Delta t)=p(t)+v\Delta t$. Cette hypothèse est utile à court terme mais doit être accompagnée d'une incertitude. Une personne masquée temporairement ne doit pas être considérée immédiatement disparue.

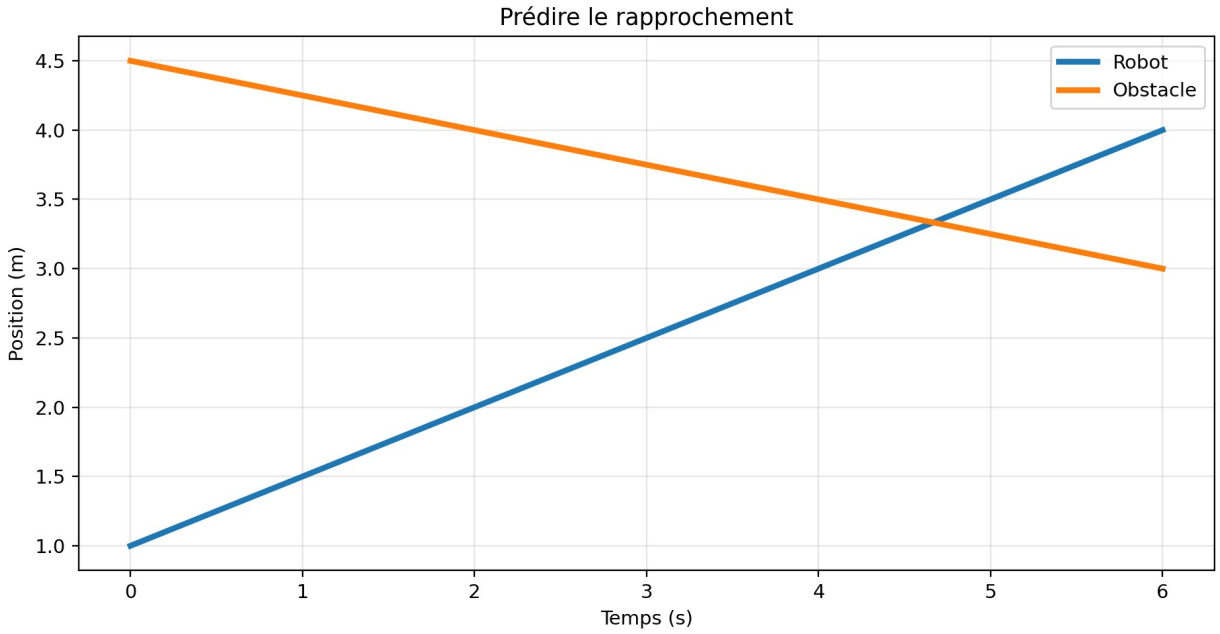


Figure 4.2 — Deux trajectoires longitudinales peuvent se rapprocher.

3. Temps avant collision : calcul résolu

Un robot avance à 1,2 m/s derrière un obstacle mobile à 0,4 m/s. La distance initiale est de 4,0 m. La vitesse relative est $1{,}2 - 0{,}4 = 0{,}8$ m/s. Le temps avant collision théorique est $\mathrm{TTC} = 4{,}0 / 0{,}8 = 5{,}0$ s, si les deux trajectoires restent alignées et les vitesses constantes.

Le TTC n'est pas une garantie de sécurité : il faut considérer la géométrie, l'incertitude, la latence et les possibilités de freinage.

4. DWA, TEB et commande prédictive

La Dynamic Window Approach (DWA) évalue les vitesses atteignables à court horizon, selon les limites cinématiques et le dégagement. Le Timed Elastic Band (TEB) optimise une trajectoire locale dans l'espace-temps. Le Model Predictive Control (MPC) optimise des commandes sur un horizon glissant, applique la première puis recalcule.

Les méthodes peuvent être comparées par le temps de calcul, la distance minimale aux obstacles, la régularité des commandes et le taux de réussite.

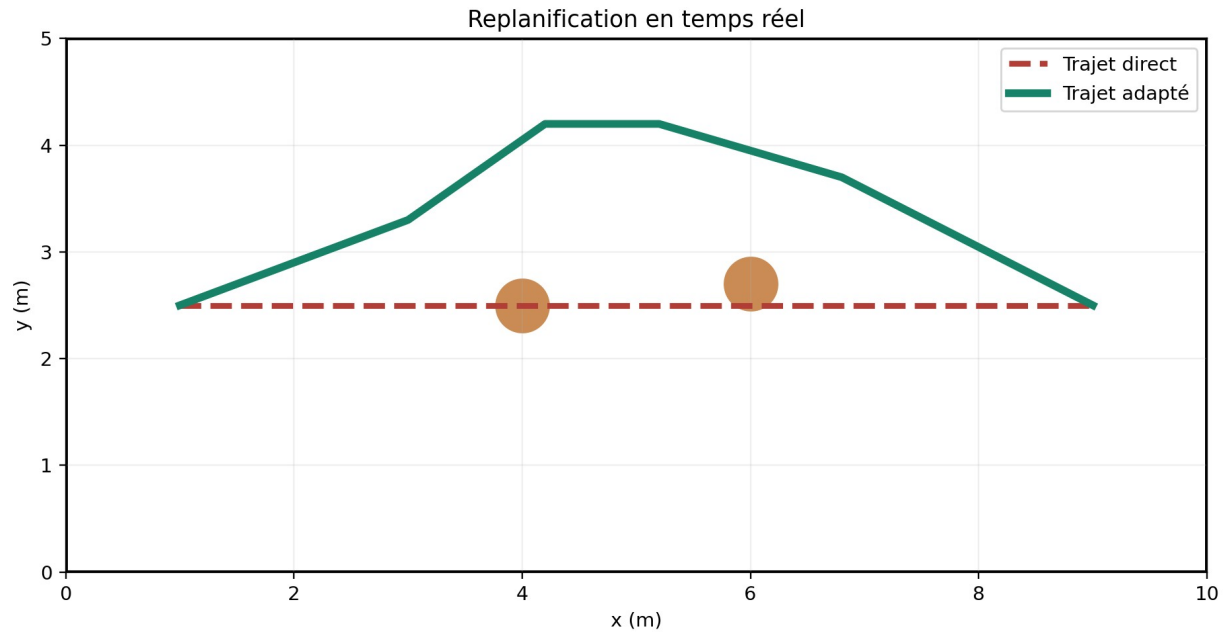


Figure 4.3 — Un passage devenu dangereux nécessite une trajectoire adaptée.

5. Obstacles dans l’espace des vitesses

Le concept de velocity obstacle identifie les vitesses qui pourraient conduire à une collision dans un horizon donné. La vitesse choisie doit rester hors de cette région, tout en respectant les limites d’accélération, de rotation et de freinage.

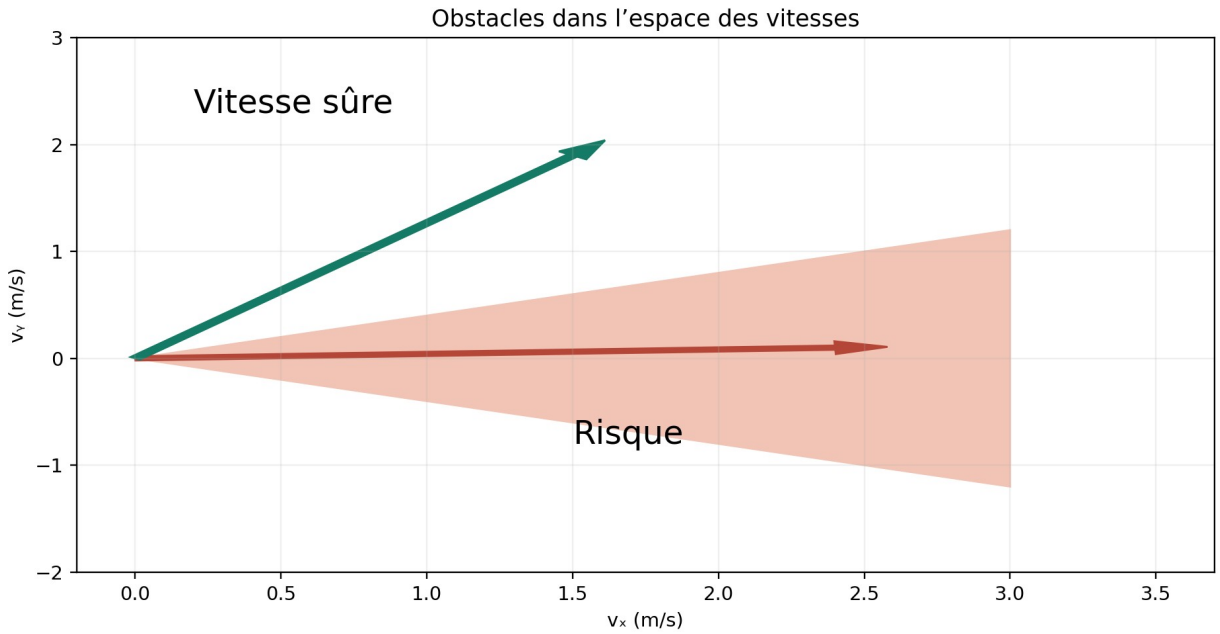


Figure 4.4 — Zone de vitesses à éviter et exemple de commande admissible.

6. Distance d’arrêt et limites physiques

Pour une décélération constante $a>0$, la distance de freinage idéale est $d=v^2/(2a)$. Avec une latence totale τ, la distance d’arrêt simplifiée devient $d \approx v\tau + v^2/(2a)$. Ajouter une marge pour l’adhérence, les pentes, les dimensions et l’incertitude.

Exemple : $v=1{,}5$ m/s, $\tau=0{,}25$ s, $a=0{,}75$ m/s^2. Distance pendant la latence : 0,375 m. Freinage : 1,50 m. Total : 1,875 m avant marge supplémentaire.

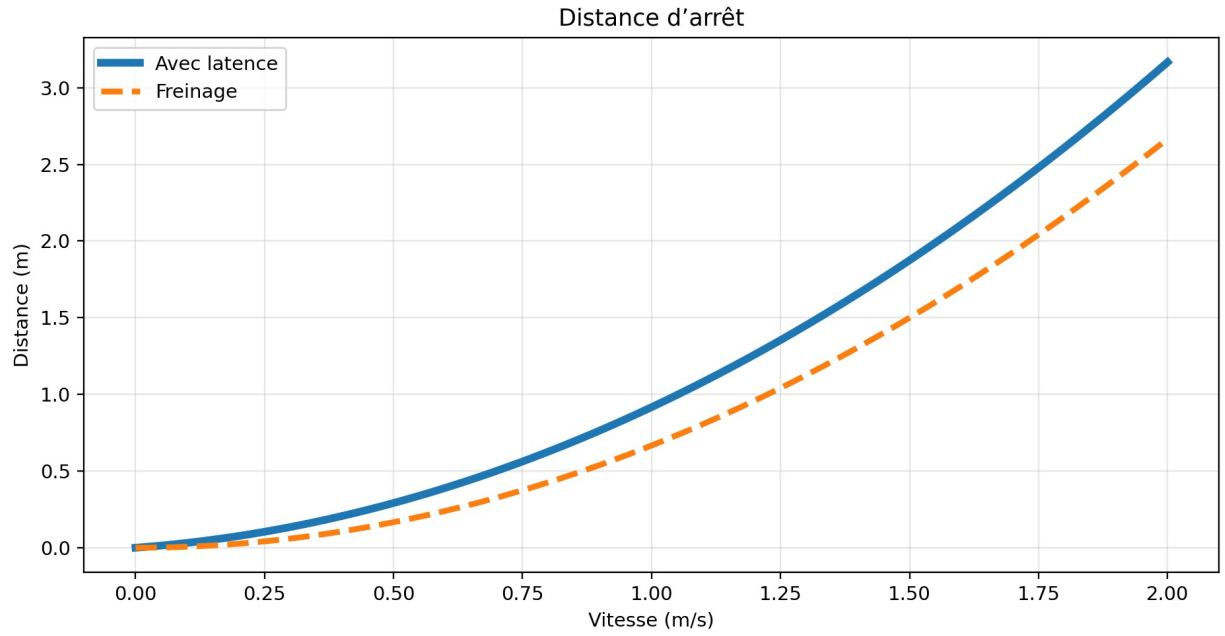


Figure 4.5 — La distance d'arrêt augmente rapidement avec la vitesse.

7. Interaction avec les personnes

Dans les lieux partagés, la navigation doit être prévisible et prudente : ralentir en présence de piétons, préserver une distance de confort et éviter les changements brusques. Si aucune trajectoire sûre n'existe, le robot doit s'arrêter et réévaluer.

8. Laboratoire à distance : corridor dynamique

- Créer une carte 10 m × 6 m avec deux obstacles fixes et un obstacle mobile.
- Configurer un robot différentiel : vitesse maximale 1,5 m/s, décélération 0,75 m/s^2.
- Faire traverser un piéton simulé à 0,6 m/s.
- Calculer le TTC à trois instants et tracer les trajectoires prédites.
- Comparer trajet direct, ralentissement/attente et replanification.
- Injecter une perte de détection de 0,5 s et tester l'arrêt sûr.
- Remettre un rapport : temps, dégagement minimal, nombre d'arrêts et courbes de vitesse.

9. Étude de cas : robot de service

Un robot livre des documents dans un corridor fréquenté. La route la plus courte croise un groupe d'étudiants. L'équipe doit choisir une trajectoire compréhensible, justifier la marge de sécurité et mesurer la reprise de mission après un arrêt.

10. Autoévaluation et corrigés

Question — Différence entre planification globale et locale ?

Corrigé — La première définit le chemin général; la seconde adapte les commandes aux obstacles immédiats.

Question — Pourquoi le TTC est-il une estimation ?

Corrigé — Il suppose des vitesses et trajectoires qui peuvent changer.

Question — Distance d'arrêt pour $v=1$ m/s, $\tau=0{,}2$ s, $a=1$ m/s^2 ?

Corrigé — $0{,}2+1^2/(2\times1)=0{,}7$ m, avant marge.

Question — Que faire si aucune commande sûre n'existe ?

Corrigé — Arrêter de façon contrôlée et réévaluer.

Question — Principe du MPC ?

Corrigé — Optimiser sur un horizon, appliquer une commande, puis recalculer.

11. Film pédagogique : storyboard

Scène 1 : professeur et étudiants présentent le robot. Scène 2 : un piéton traverse la route. Scène 3 : calcul visuel du TTC. Scène 4 : comparaison DWA et replanification. Scène 5 : freinage et arrêt. Scène 6 : un étudiant explique la stratégie et relance la mission. Dialogues entre professeur et étudiants, sans narration externe.

12. Évaluation de séance

Évaluation suggérée : modèle et calculs 25 %, simulation 35 %, diagnostic/sécurité 25 %, rapport et communication 15 %. Les mesures de performance du laboratoire sont des objectifs d'exercice et non des résultats expérimentaux déjà obtenus.