# ROB-104 — Leçon 7

NAVIGATION DANS LES ENVIRONNEMENTS DYNAMIQUES COMPLEXES

Planification en temps réel • piétons et véhicules • coordination multi-robots • sûreté de fonctionnement

Angelo Nibizi — Recteur du Collège du Sacré-Cœur de Gatineau, Québec




*Illustration pédagogique : robot mobile, personnes et véhicules dans un espace partagé.*

## Objectifs d'apprentissage

- Prédire les mouvements d'obstacles et quantifier l'incertitude.
- Comparer les trajectoires candidates et replanifier en temps réel.
- Coordonner plusieurs robots dans des espaces partagés.
- Définir des règles de priorité, de ralentissement et d'arrêt sûr.
- Évaluer les performances à l'aide de mesures reproductibles.

## 1. De la navigation statique à la navigation dynamique

Une carte statique indique où se trouvent les murs et obstacles durables. Dans un campus, un hôpital ou un entrepôt, les personnes, chariots et robots modifient continuellement la zone accessible. Le robot doit observer, estimer, prédire, choisir et vérifier sa décision à chaque cycle de commande.

La perception ne garantit pas une prédiction exacte des intentions humaines. Le planificateur doit considérer les hypothèses du modèle, la covariance des observations et la possibilité d'une manœuvre inattendue.




*Scène illustrée : circulation partagée avec obstacles mobiles.*

### Architecture fonctionnelle

Capteurs → détection → suivi multi-objets → prédiction → costmap dynamique → planification locale → contrôle → surveillance indépendante de sécurité. Le plan global demeure une intention de route; il doit être corrigé lorsque l'environnement change.

## 2. Modélisation des obstacles mobiles

Un obstacle suivi peut être décrit par $s=[x,y,v_x,v_y]^T$ et sa covariance P. Le modèle à vitesse constante donne $x(t+\Delta t)=x(t)+v_x\Delta t$ et $y(t+\Delta t)=y(t)+v_y\Delta t$. Un

filtre d’estimation doit augmenter l’incertitude lorsque les mesures manquent.

Exemple : un piéton est détecté en (4,0 ; 1,0) m et avance à (−0,5 ; 0,2) m/s. Après 2 s, sa position prédite est (3,0 ; 1,4) m. Il s’agit d’une hypothèse, non d’une certitude.

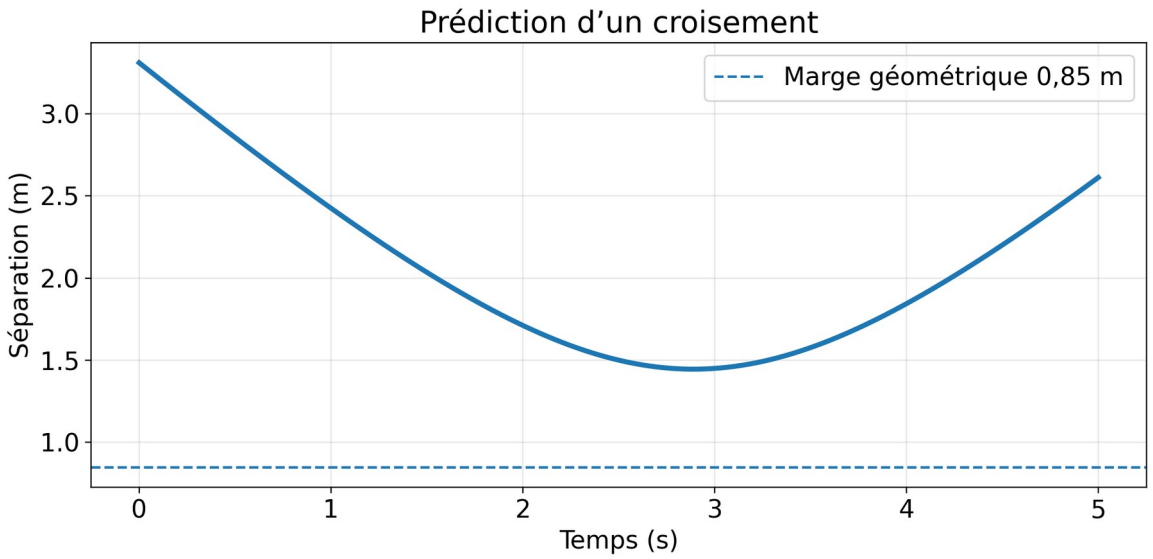



*Figure 7.1 — Exemple de distance relative calculée sur un horizon de cinq secondes.*

## 3. Temps de rapprochement maximal et distance minimale

Soient $r_0$=p_obstacle−p_robot et v_rel=v_obstacle−v_robot. Le temps de rapprochement maximal est $t^*=-(r_0 \cdot v_{rel})/||v_{rel}||^2$, borné à l’horizon [0,T]. La séparation minimale estimée vaut $||r_0+t^* v_{rel}||$. Si la vitesse relative est presque nulle, on évalue directement la distance actuelle et ses marges.

Étude résolue : $r_0$=(3 ; −1,4) m et v_rel=(−0,65 ; 0,8) m/s. Produit scalaire = −3,07; norme carrée = 1,0625. Donc $t^*$=2,89 s. La distance à cet instant est

approximativement 1,45 m. Il faut comparer cette distance à la somme des rayons physiques et des marges de sécurité.

## 4. Planification et replanification

Le planificateur local évalue des commandes réalisables selon la géométrie du robot, la distance aux obstacles, la progression vers le but et le confort du mouvement. Une trajectoire violant une contrainte de sécurité doit être rejetée, même si son coût de temps est faible.

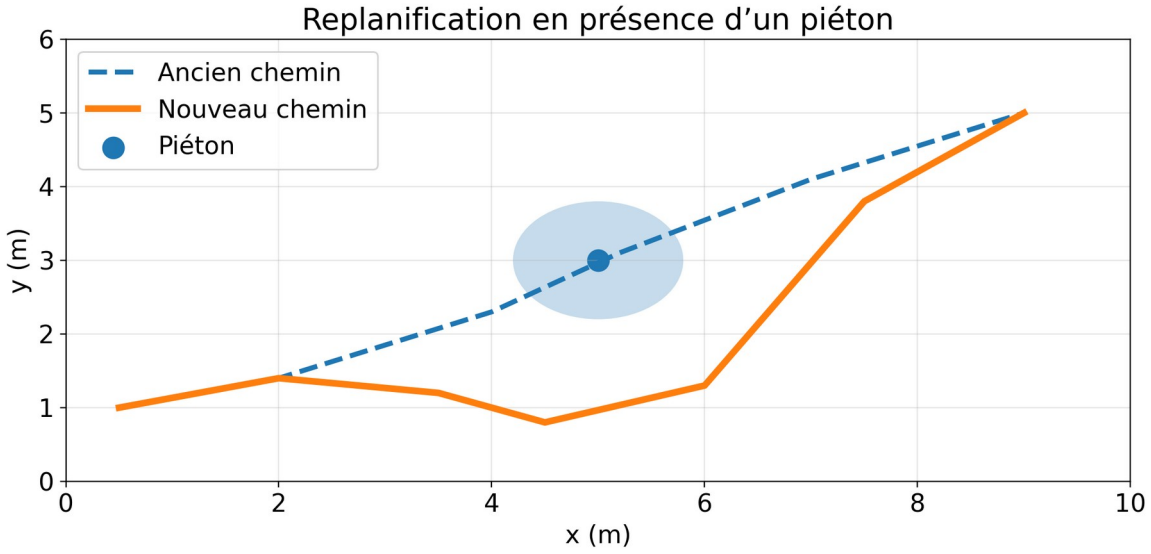



*Figure 7.2 — Ancien chemin devenu défavorable et détour planifié.*

### Comparaison DWA, TEB et MPC

DWA échantillonne des commandes de vitesse et simule leurs trajectoires à court horizon. TEB optimise une bande élastique temporelle soumise à des contraintes de mouvement et d'obstacles. MPC résout périodiquement une optimisation prédictive, en tenant compte du modèle et des contraintes. Leur efficacité dépend des paramètres et du scénario; aucune méthode ne garantit seule la sécurité.

## 5. Navigation en présence de personnes

La navigation dans les espaces humains privilégie la prévisibilité du mouvement, les vitesses modérées, la visibilité et le respect des distances. Le robot doit éviter les changements de direction brusques, les blocages d'issues et les mouvements qui obligent les personnes à s'écarter dangereusement.

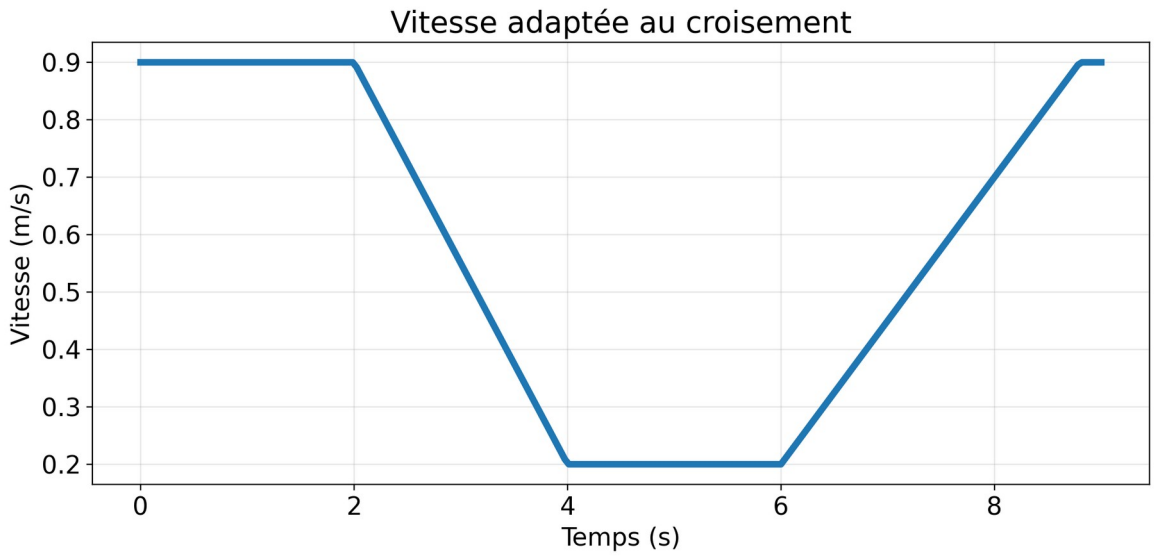



*Figure 7.3 — Exemple de ralentissement avant un croisement, suivi d'une reprise progressive.*

### Distance d'arrêt

Une approximation est $d_{arrêt} = v\tau + v^2/(2a)$, où $\tau$ est la latence totale et $a$ la décélération effective positive. À $v = 1{,}2$ m/s, $\tau = 0{,}25$ s et $a = 0{,}8$ m/s², $d_{arrêt} = 0{,}30 + 0{,}90 = 1{,}20$ m, avant marge. Cette distance doit être vérifiée expérimentalement.

## 6. Coordination multi-robots

Plusieurs robots peuvent partager position, état de mission et intention de déplacement. Le problème n'est pas seulement d'éviter une collision : il

faut prévenir les impasses, réserver les passages étroits et résoudre les conflits de priorité.

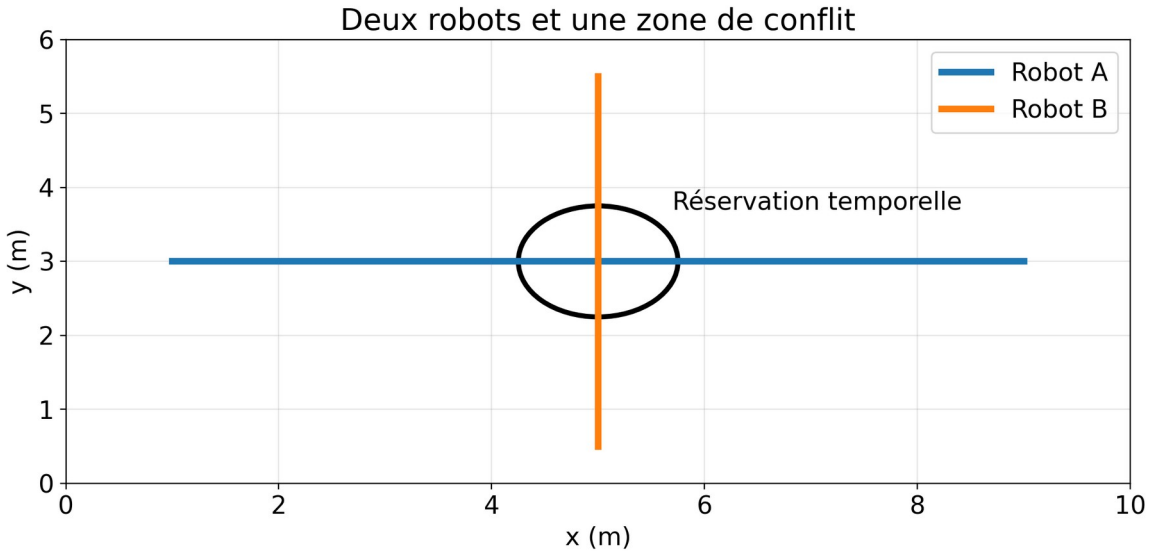



*Figure 7.4 — Deux robots sollicitent le même passage; la réservation temporelle évite une occupation simultanée.*

Une méthode simple consiste à attribuer à chaque passage une fenêtre temporelle, puis à refuser les réservations incompatibles. Les communications peuvent être retardées ou interrompues : chaque robot conserve une capacité locale d’arrêt et d’évitement.

### Exemple de protocole

1. Robot A annonce son intention de traverser le couloir.
2. Le gestionnaire attribue une fenêtre temporelle si elle est libre.
3. Robot B attend dans une zone de stationnement autorisée.
4. Si les messages expirent, la réservation devient invalide et le robot passe à une conduite conservatrice.

## 7. Scénarios de défaillance

### Perte de détection

Ralentir ou s’arrêter selon la visibilité résiduelle.

### Objet change brusquement de direction

Actualiser les trajectoires candidates et vérifier la marge.

### Perte de communication entre robots

Appliquer les règles locales d’arrêt et de priorité.

### Localisation incertaine

Augmenter les marges et limiter la vitesse.

### Planificateur sans solution

Arrêt contrôlé; diagnostic puis reprise autorisée.

## 8. Laboratoire virtuel — cinq séances

### Séance 1 — Scène

Construire une place de campus simulée avec robot, piétons et véhicule lent.

### Séance 2 — Suivi

Enregistrer position, vitesse et covariance des objets toutes les 100 ms.

### Séance 3 — Planification

Comparer DWA et TEB dans les mêmes conditions et enregistrer leurs commandes.

### Séance 4 — Flotte

Ajouter deux autres robots et gérer un passage étroit partagé.

**Séance 5 — Robustesse**

Introduire une détection manquée, un piéton imprévu et une perte de communication; analyser la réaction.

## 9. Critères d'évaluation

| Indicateur | Méthode | Valeur mesurée |
|---|---|---|
| Distance minimale | Calcul sur journaux de trajectoire | À renseigner |
| Collisions | Nombre par scénario | À renseigner |
| Temps de mission | Départ à arrivée | À renseigner |
| Arrêts sûrs | Taux de réussite des injections de fautes | À renseigner |
| Conflits de passage | Nombre de réservations incompatibles | À renseigner |

## 10. Questions et corrigés

**Question : Pourquoi un modèle à vitesse constante est-il insuffisant à lui seul ?**

Corrigé : Il ne décrit pas les intentions ni les changements soudains de direction.

**Question : Que doit-on faire si le planificateur n'a pas de trajectoire sûre ?**

Corrigé : Arrêter le robot et réévaluer la situation.

**Question : Pourquoi coordonner les passages étroits ?**

Corrigé : Pour éviter conflits, impasses et occupation simultanée.

**Question : À quoi sert la covariance ?**

Corrigé : À quantifier l’incertitude des états estimés et des prédictions.

**Question : Pourquoi comparer les algorithmes sur les mêmes scénarios ?**

Corrigé : Pour produire une évaluation reproductible et interprétable.

## 11. Film pédagogique — scénario dialogué

Scène 1 : le professeur présente un campus partagé par des piétons et des robots. Scène 2 : deux étudiants observent les trajectoires prévues à l’écran. Scène 3 : un piéton traverse; le robot ralentit. Scène 4 : deux robots demandent le même couloir et négocient leur passage. Scène 5 : une panne de perception est simulée et l’arrêt sûr est démontré. Scène 6 : le professeur fait comparer les journaux de DWA et TEB; les étudiants expliquent leurs résultats.

## 12. Synthèse des compétences

L’étudiant sait modéliser des objets mobiles, prédire leur déplacement, comparer des planificateurs, organiser une flotte simple, vérifier les distances d’arrêt et produire des preuves de sûreté en simulation.