

Planification de tâches de manipulation en robotique par des méthodes probabilistes

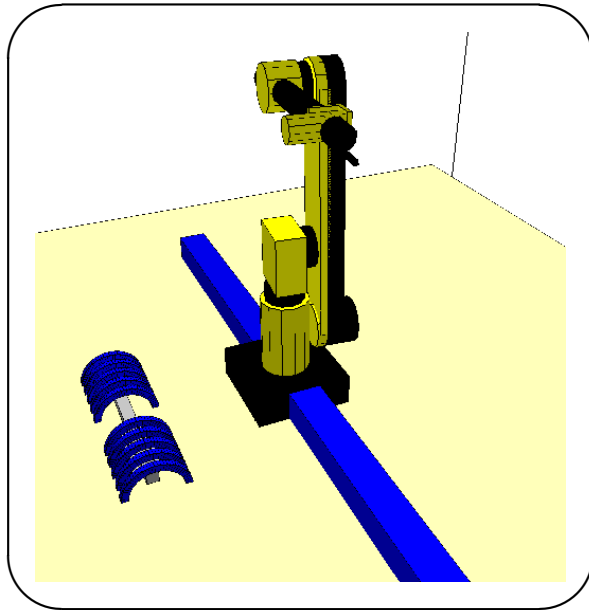
Anis Sahbani

Plan de la présentation

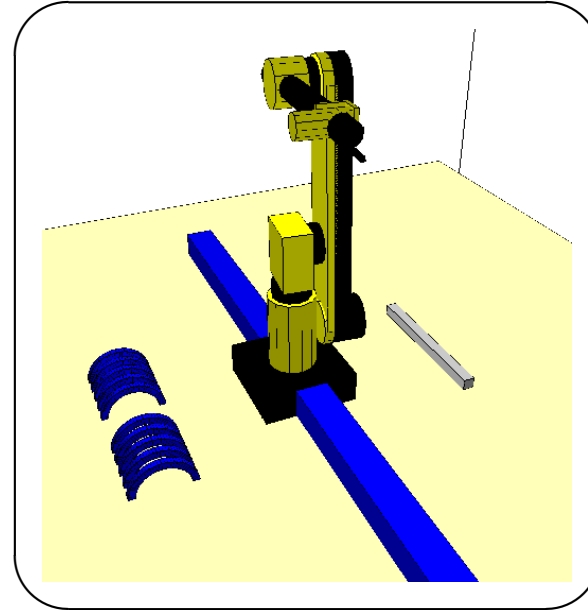
- Problématique
- Introduction
- Formulation géométrique et approche adoptée
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes discrètes
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes continues
- Résultats et Analyse
- Conclusions et perspectives

Problématique

- Planification de mouvement pour un robot manipulant des objets déplaçables dans un environnement encombré d'obstacles



Configuration initiale



Configuration finale

Plan de la présentation

- Problématique
- Introduction
- Formulation géométrique et approche adoptée
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes discrètes
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes continues
- Résultats et Analyse
- Conclusions et perspectives

Introduction

- Planification de mouvement

Définition :

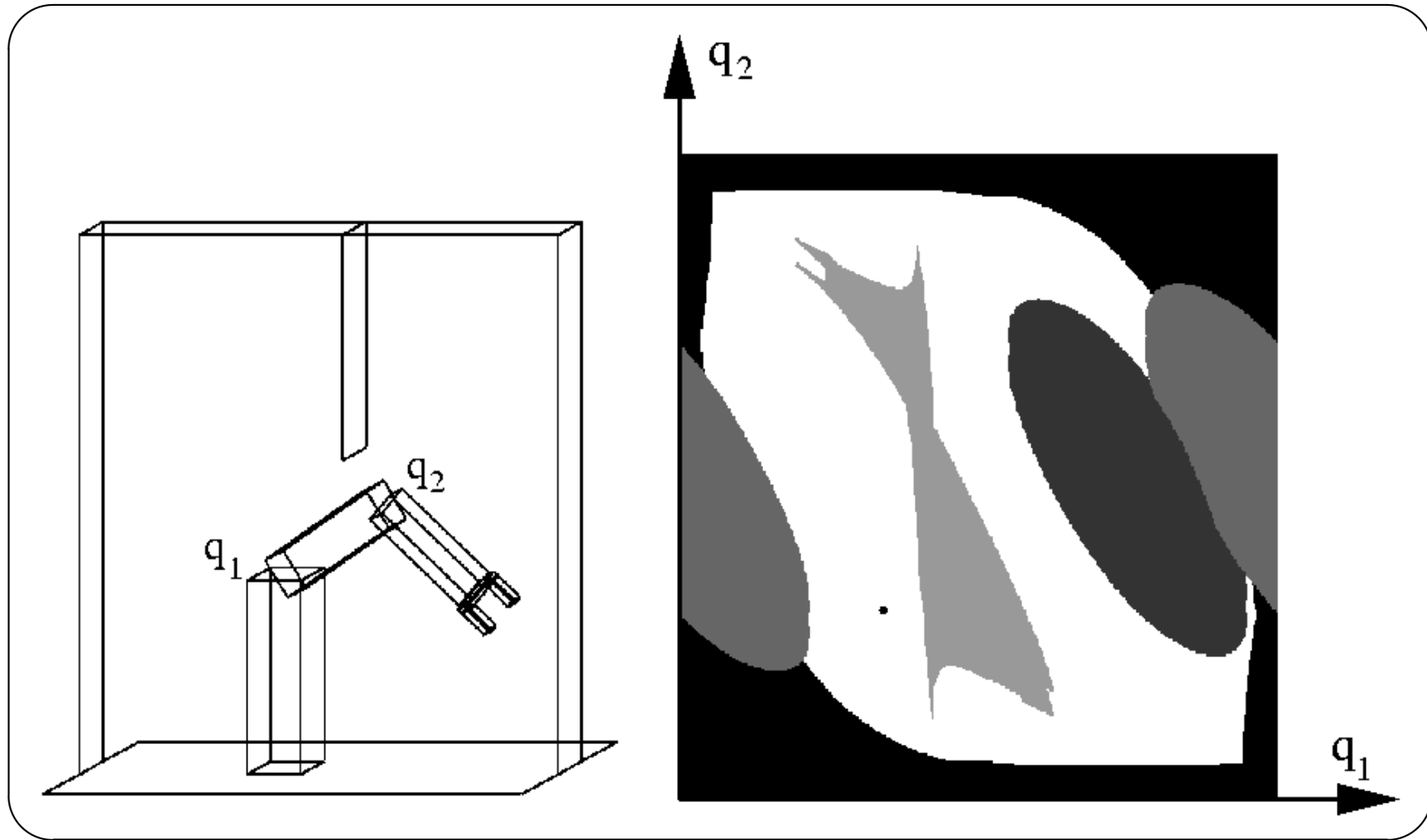
Calcul automatique de chemins sans collision pour un système mécanique

Notion d'espace des configurations [[Lozano-Pérez 83](#)]

Plusieurs approches (exactes, heuristiques) [[Latombe 91](#)]

Méthodes probabilistes [[Kavraki 96](#) et [Švestka 96](#)]

Espaces des configurations



Méthodes Probabilistes : PRM

- PRM (Probabilistic Roadmap Method) [[Kavraki 96](#)]
- PPP (Probabilistic Path Planner) [[Švestka 96](#)]

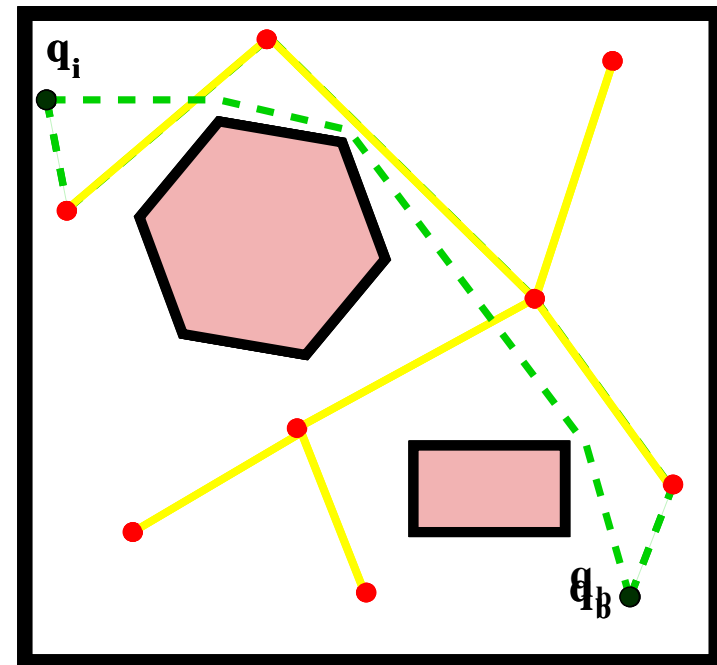
Principe :

elles sont composées de trois étapes

une phase d'apprentissage

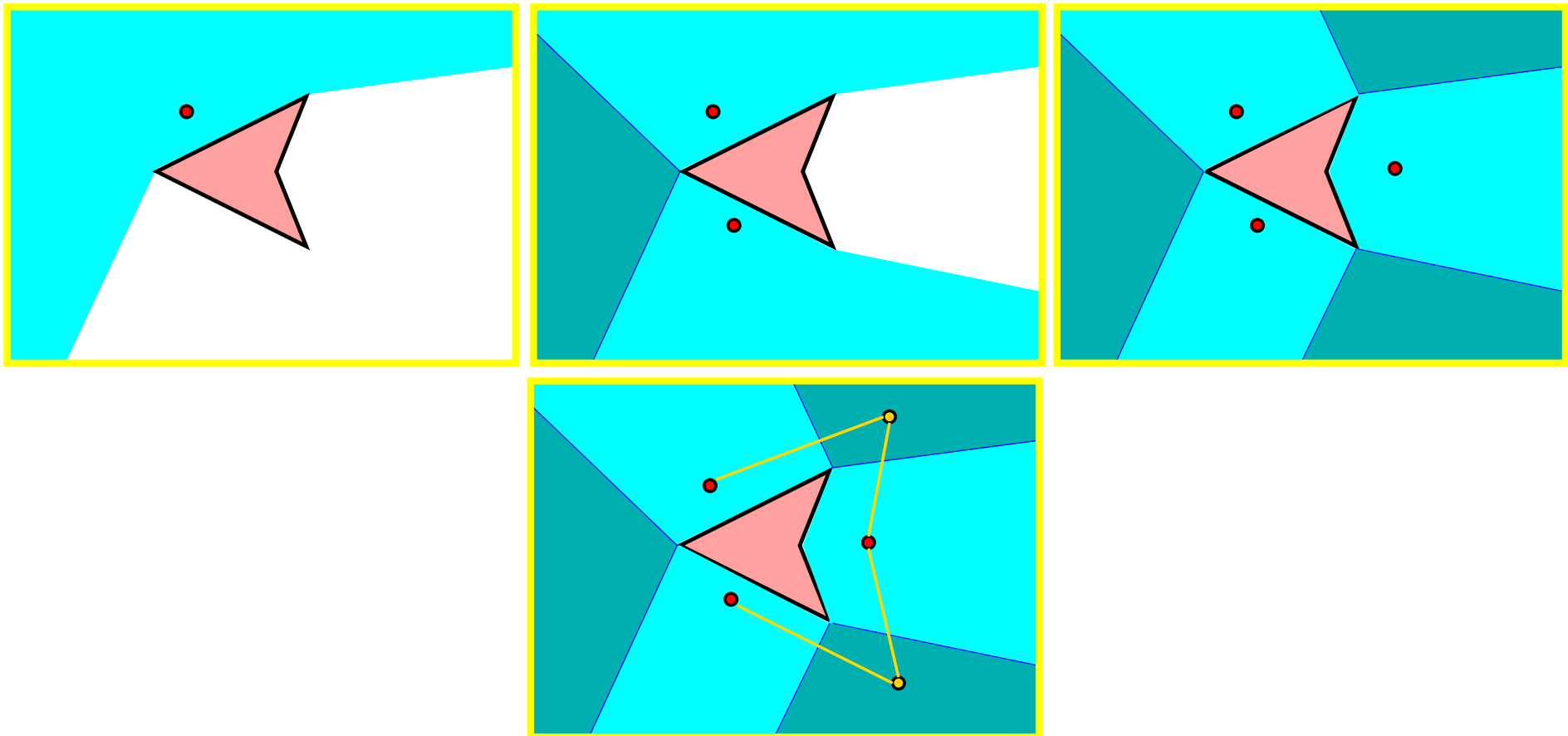
une phase de recherche

une phase d'optimisation et de lissage



Méthodes Probabilistes : Visibilité-PRM

- Capturer la connectivité de CS_{libre} par des gardiens et des connecteurs



Introduction

- Planification de tâches de manipulation

Définition :

Calcul de la séquence de mouvements permettant à un système mécanique de déplacer un ou plusieurs objets

Projets : HANDEY [[Mazer 87](#)], SHARP [[Laugier 88](#)] et SPARA [[Mazon 90](#)]

⇒ décomposition en actions élémentaires de “*Pick & Place*”

Approche originale [[Alami 89](#)] : formulation géométrique

⇒ décomposition en sous-tâches (changements de prises, poses intermédiaires) en même temps que la génération du mouvement

Plan de la présentation

- Problématique
- Introduction
- Formulation géométrique et approche adoptée
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes discrètes
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes continues
- Résultats et Analyse
- Conclusions et perspectives

Formulation géométrique

- **Contexte** → Environnement tridimensionnel contenant:

des obstacles statiques $(\mathcal{O}_1, \dots, \mathcal{O}_k)$

des objets déplaçables $(\mathcal{M}_1, \dots, \mathcal{M}_r)$

un robot \mathcal{R}

- **Espace composite :**

$$CS = CS_{\mathcal{R}} \times CS_{\mathcal{M}_1} \times \dots \times CS_{\mathcal{M}_r}$$

- **Problème de manipulation :**

Partant d'une configuration initiale du système composite q_c^i trouver un chemin dans CS_{libre} pour atteindre la configuration but q_c^b

Formulation géométrique

- **Solution de ce problème :**

Chemin de manipulation \rightarrow chemin particulier et contraint dans CS_{libre}

- **Contraintes:**

Positions stables des objets non-saisis

\Rightarrow contraintes de placement

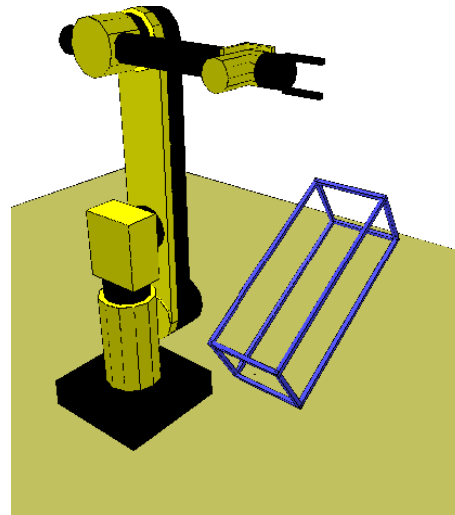
Mouvement d'objets induit par celui du robot

\Rightarrow contraintes de mouvement

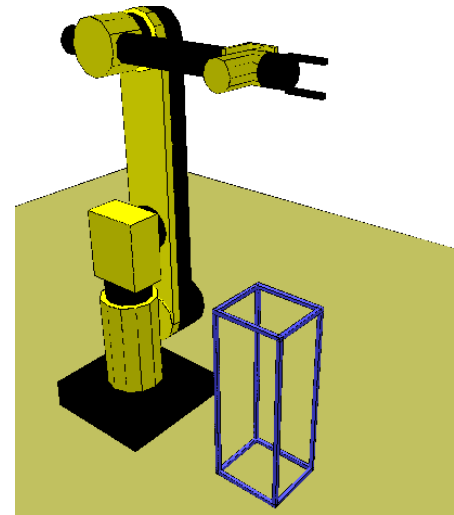
Formulation géométrique : Contraintes de manipulation

- Contraintes de placement

Notion de **stabilité**



placement non-stable



placement stable

$\mathcal{P} = \{ \text{placements stables définis comme entrée du problème} \}$

* placement discret : $\mathcal{P} = \{p_1, \dots, p_n\}$

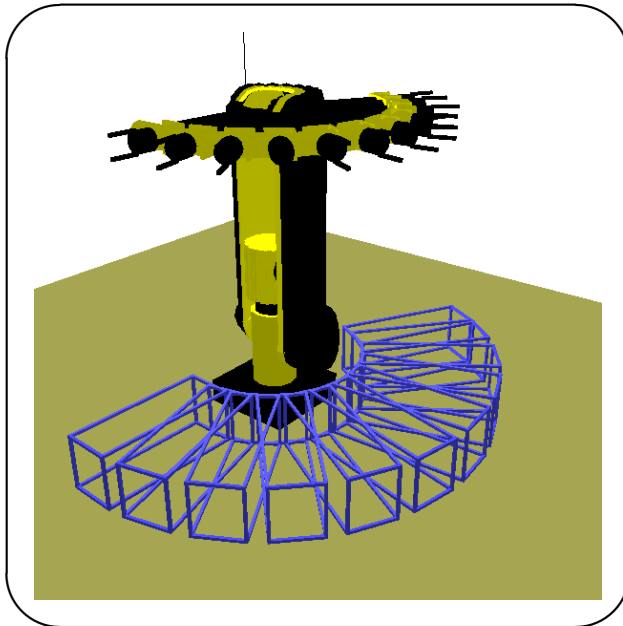
* placement continu : $\mathcal{P} = \bigcup(q_{place})$

Formulation géométrique : Contraintes de manipulation

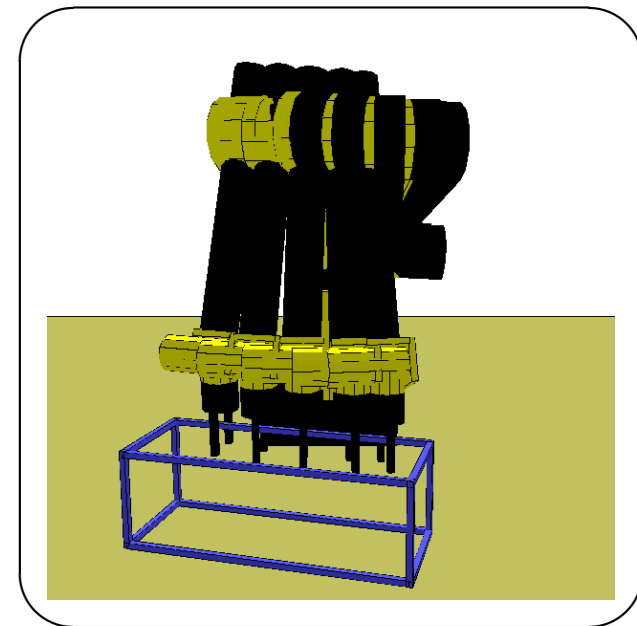
- **Contraintes de placement**

Le sous-espace **PLACEMENT** (\mathcal{CP}):

L'ensemble des configurations de CS_{libre} dans lesquelles tous les objets déplaçables occupent une configuration stable



Chemin dans \mathcal{CP} (non faisable)



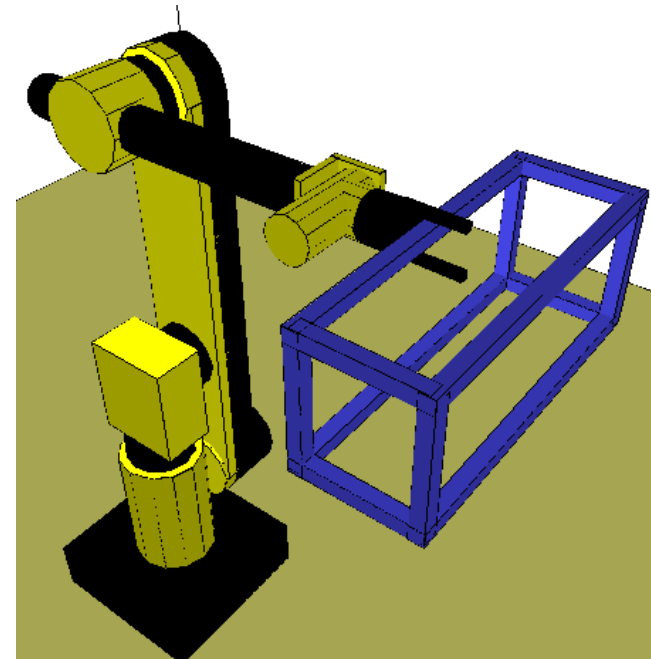
Chemin de transit

Formulation géométrique : Contraintes de manipulation

- **Contraintes de mouvement**

Notion de **prise**

$$\mathcal{G}_{\mathcal{M}_i}^T: \begin{array}{ccc} CS_{\mathcal{R}} & \longrightarrow & CS_{\mathcal{M}_i} \\ q_{\mathcal{R}} & \longmapsto & q_{\mathcal{M}_i} \end{array}$$



$\mathcal{G} = \{ \text{classes de prises définies comme entrée du problème} \}$

* prise discrète : $\mathcal{G} = \{g_1, \dots, g_n\}$

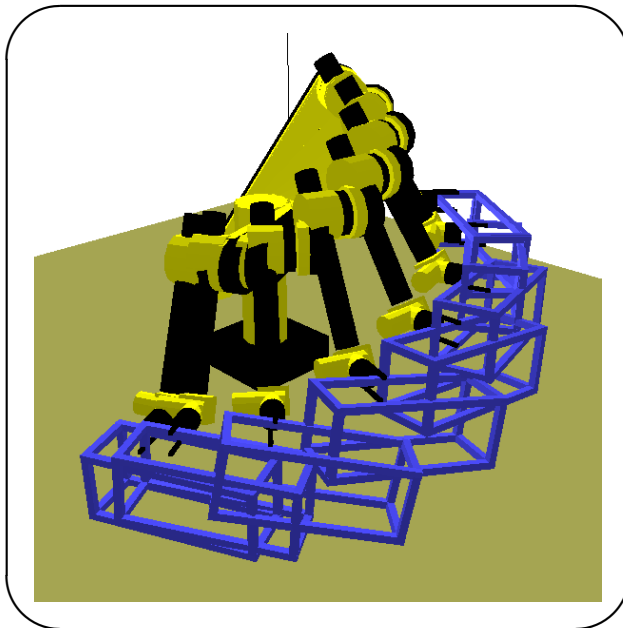
* prise continue : $\mathcal{G} = \bigcup(q_{grasp})$

Formulation géométrique : Contraintes de manipulation

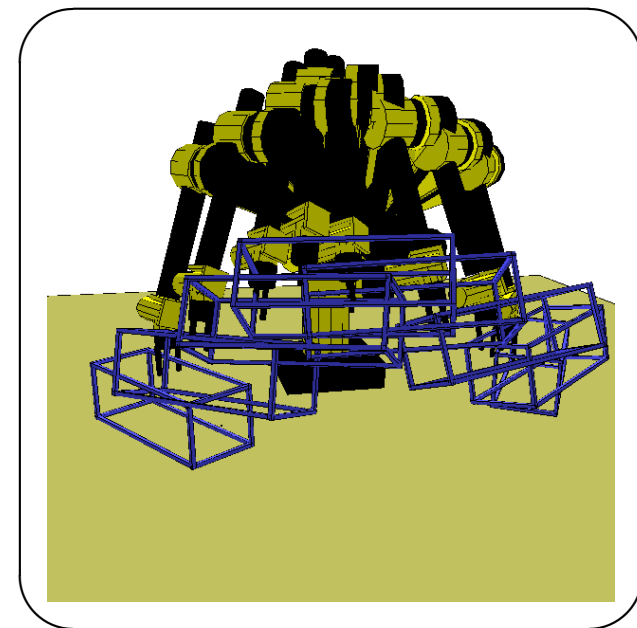
- **Contraintes de mouvement**

Le sous-espace **GRASP** (\mathcal{CG}):

L'ensemble des configurations de \mathcal{CS}_{libre} dans lesquelles le robot déplace un objet.
Les autres objets occupent des configurations stables



Chemin dans \mathcal{CG} (non faisable)



Chemin de transfert

Formulation géométrique

- Chemin de manipulation

Chemin contraint, respecte les contraintes de manipulation
 \implies inclus dans $\mathcal{CG} \cup \mathcal{CP}$ ■

Il est composé de deux types de sous-chemins:

- * chemins de transit
- * chemins de transfert

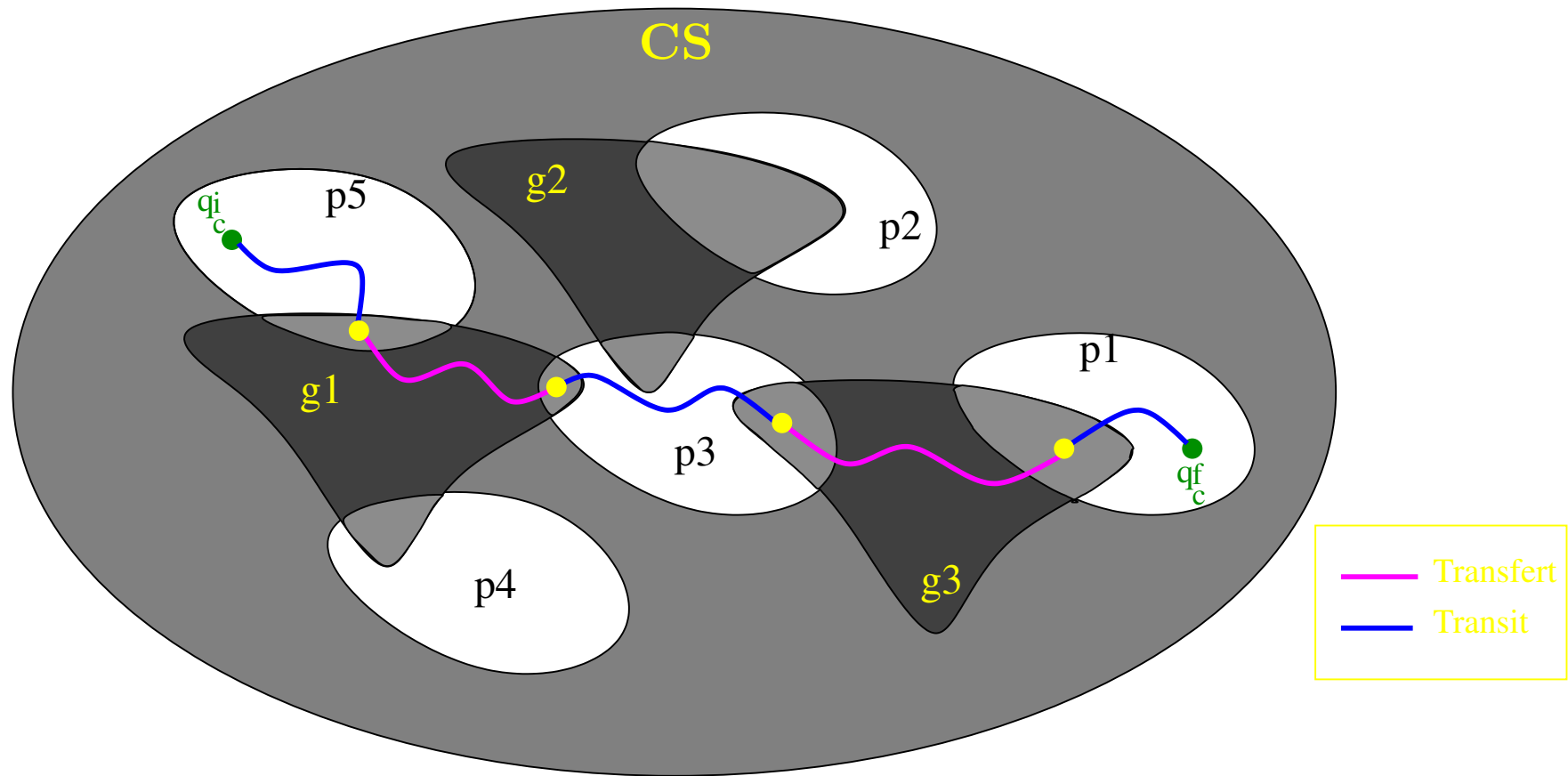
Séquence alternée finie $(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{2p+1})$ avec :

- * $\tau_1, \tau_3, \dots, \tau_{2p+1}$: chemins de transit
- * $\tau_2, \tau_4, \dots, \tau_{2p}$: chemins de transfert
- * $\forall l \in 1, \dots, 2p, \tau_l(1) = \tau_{l+1}(0)$

Formulation géométrique : Chemin de manipulation

- Problème de manipulation :

Étant donnés deux ensembles \mathcal{P} et \mathcal{G} , trouver un chemin de manipulation connectant deux configurations q_c^i et q_c^f de $\mathcal{CP} \cup \mathcal{CG}$



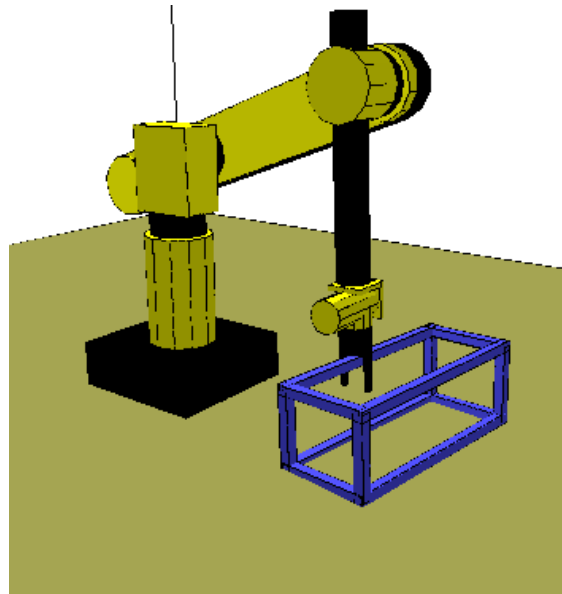
Formulation géométrique

- Le sous-espace $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$:

Contraintes de placement et contraintes de mouvement simultanément respectées

Lieu des connexions des chemins de transit et des chemins de transfert

La solution du problème de manipulation repose sur l'exploration de cette sous-variété



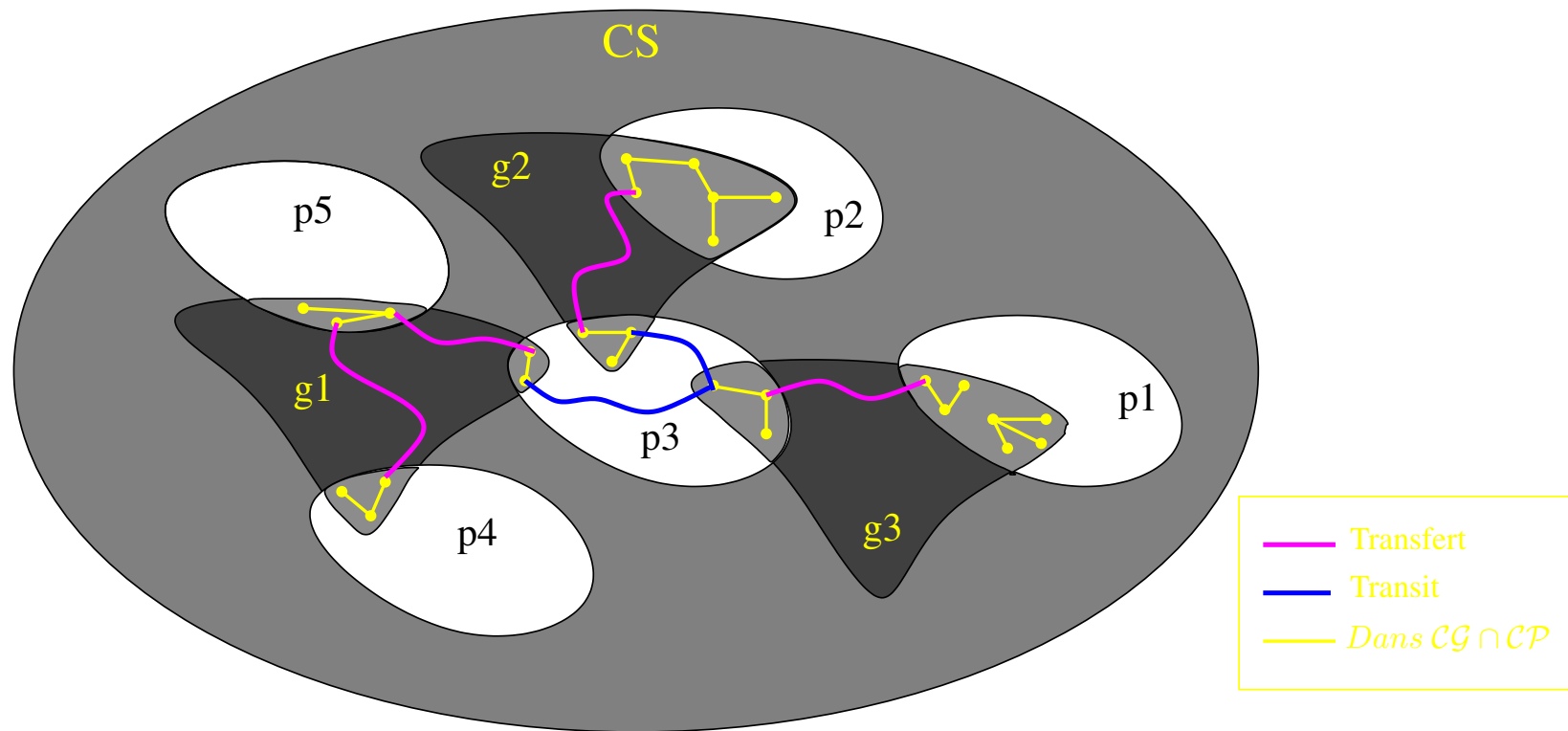
Configuration dans $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$

Approche adoptée

- Approche [Alami 89] : Graphe de manipulation

Calculer les différentes composantes connexes de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$

Déterminer leur connexion par des chemins de transfert et des chemins de transit



Plan de la présentation

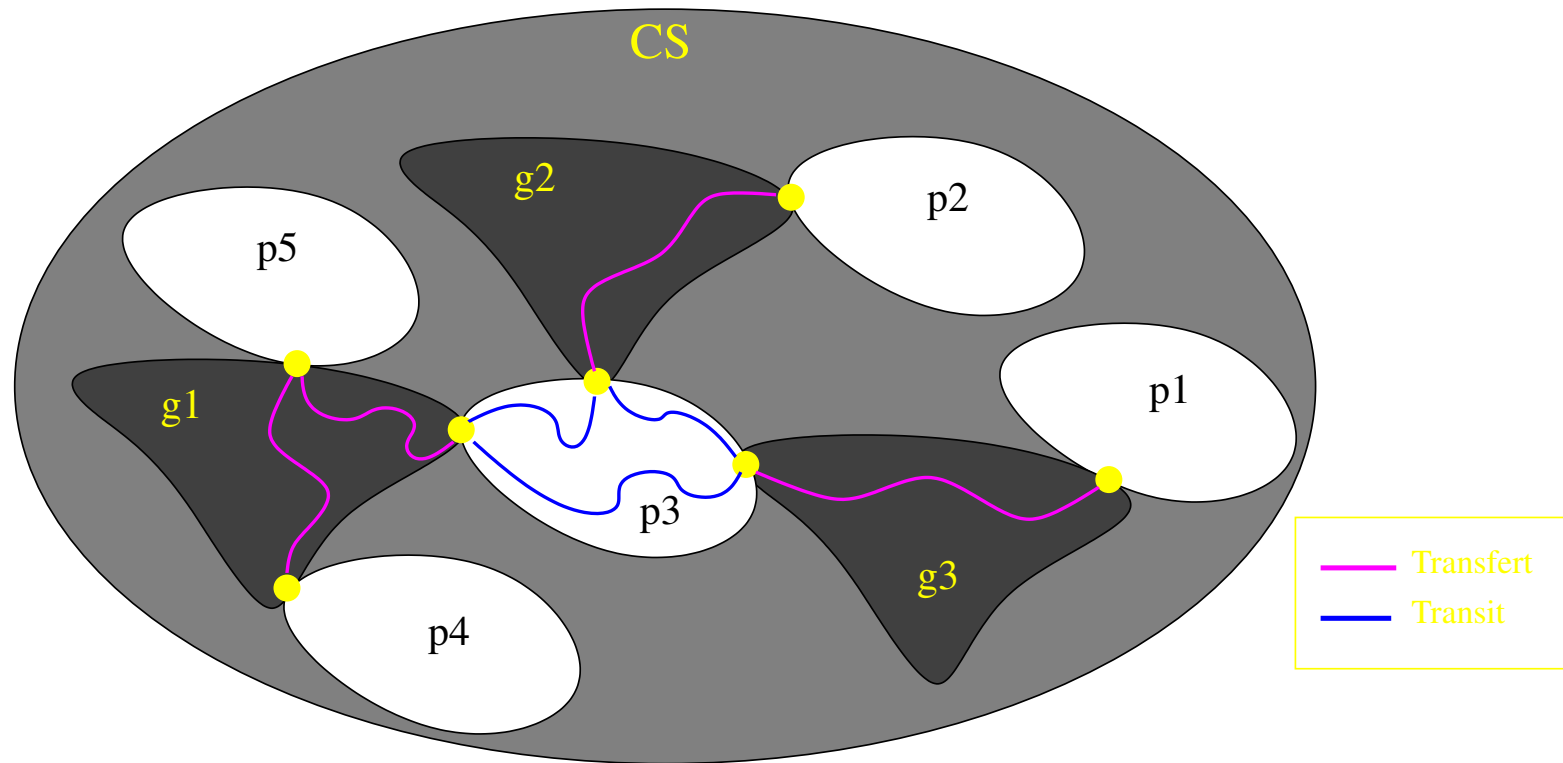
- Problématique
- Introduction
- Formulation géométrique et approche adoptée
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes discrètes
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes continues
- Résultats et Analyse
- Conclusions et perspectives

Cas de contraintes de manipulation discrètes

- $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$ est réduit à un ensemble fini de configurations
- Construction du graphe de manipulation

Calculer les différentes configurations formant $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$

Les connecter par des chemins de transit et des chemins de transfert



Cas de contraintes de manipulation discrètes

- Algorithmes existants

[Alami 94] : environnement 2D, robots polygonaux en translation

⇒ Limité à des problèmes simples de manipulation

[Koga 94] : extension à la manipulation multi-robots

[Barraquand 94] : contraintes progressives

⇒ Méthodes pragmatiques, basées sur des heuristiques, souffrent de problèmes liés à la non-complétude

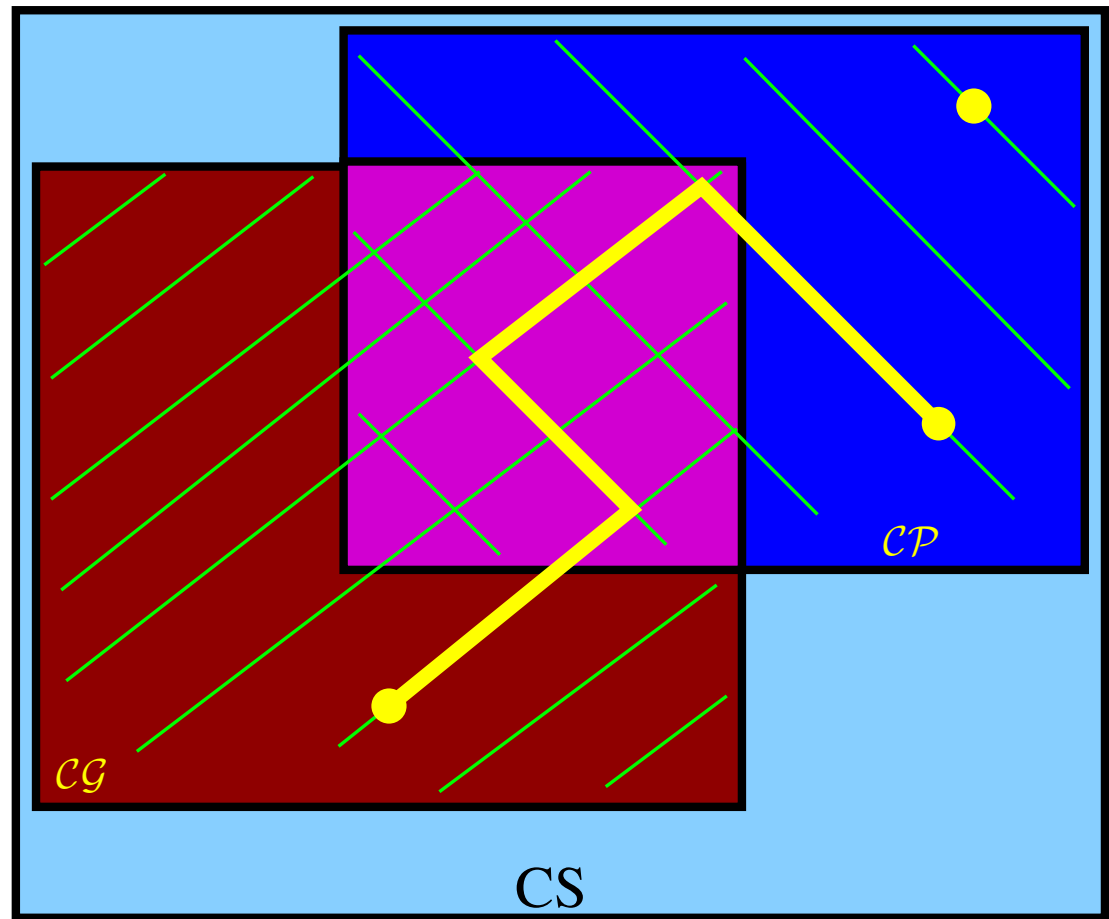
[Ahuactzin 98] : extension de l'algorithme "*Fil d'Ariane*"

⇒ Cas de robots redondants

[Nielsen 00] : Fuzzy PRM

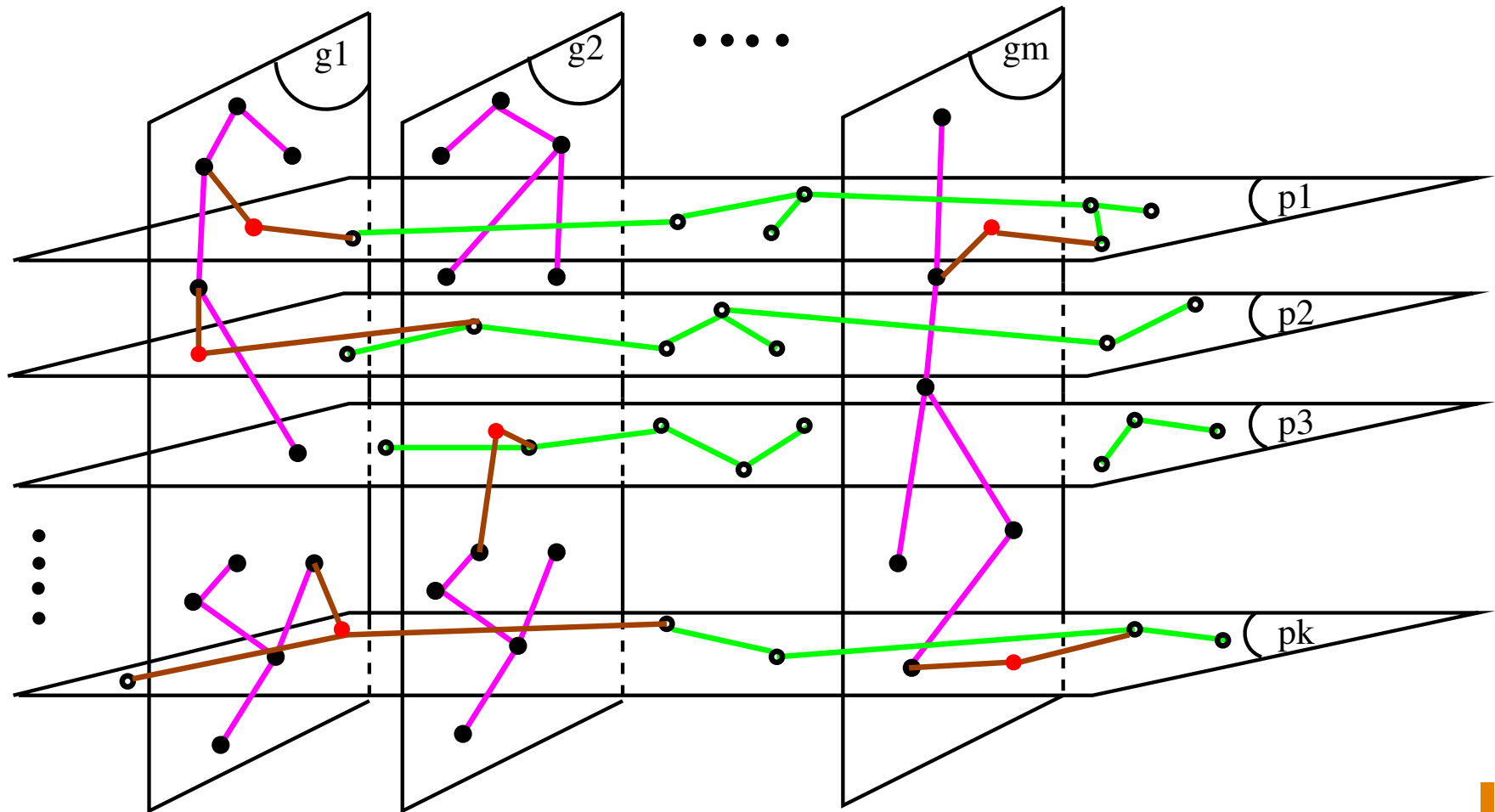
Cas de contraintes de manipulation discrètes

- Structuration de l'espace de recherche ■



Cas de contraintes de manipulation discrètes

- Utilisation directe des méthodes probabilistes ■



Utilisation directe des méthodes probabilistes

- Problèmes :

Forte combinatoire

Grand nombre de graphes calculés

Approche coûteuse en temps de calcul

- Constatation :

Requêtes de transit/transfert calculées dans un environnement partiellement changeant

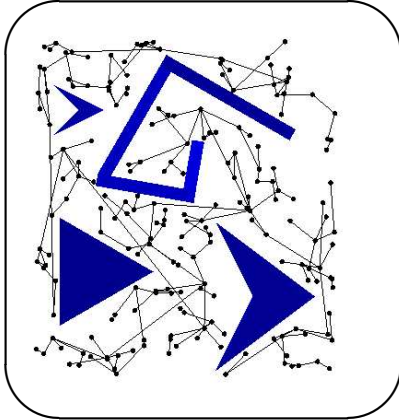
- * le placement des objets déplaçables

- * la prise courante

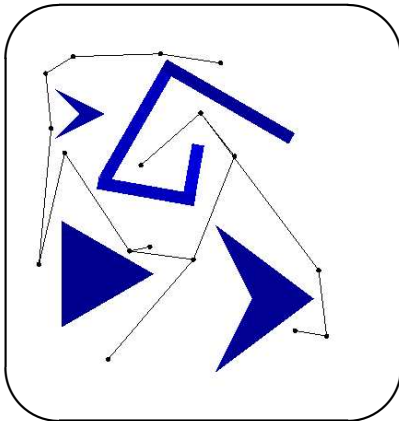
Les méthodes probabilistes

Échantillonnage aléatoire

PRM [[Kavraki 96](#), [Švestka 96](#)]

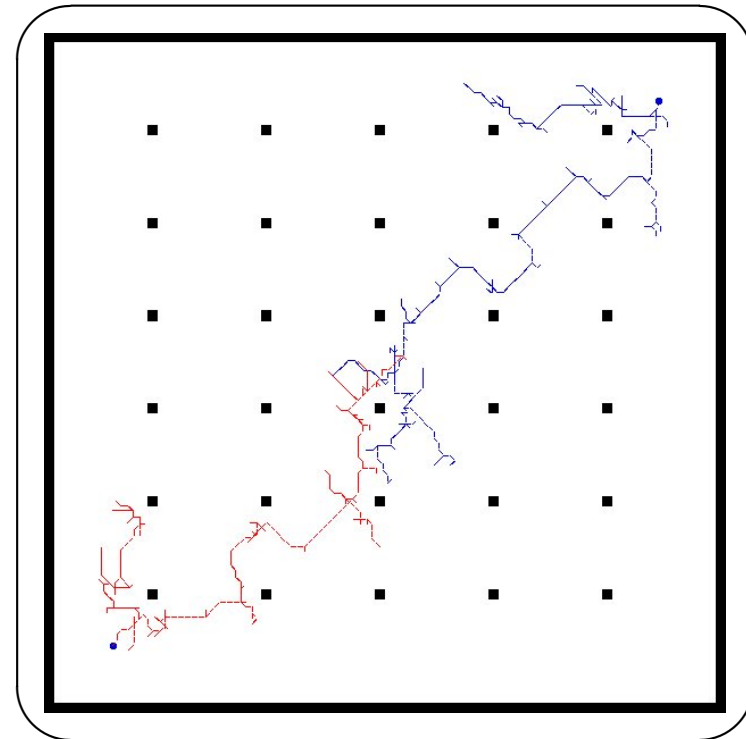


Visibilité-PRM [[Nissoux 99](#)]



Diffusion

RRT [[Lavalle 98](#)]



Extension des méthodes probabilistes

- Idée :

Combiner une méthode d'échantillonnage aléatoire avec une technique probabiliste par diffusion

Un graphe précalculé réutilisable d'une requête de planification à une autre (échantillonnage aléatoire)

Exploitation du changement **partiel** de l'environnement (diffusion)

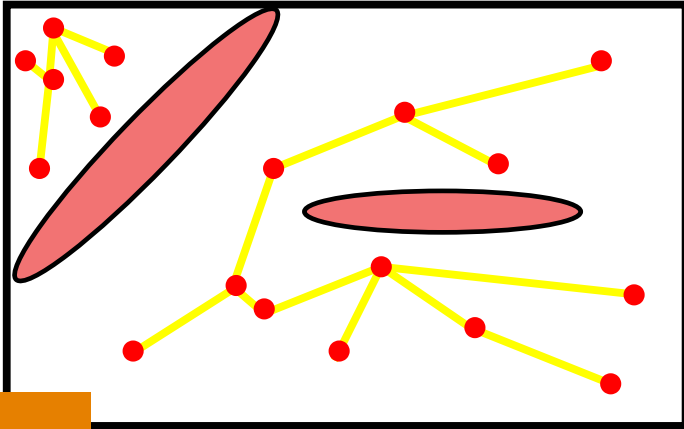
- Approche par graphe dynamique :

Une phase d'apprentissage → un ensemble de chemins

Une phase de recherche → mise à jour de cet ensemble

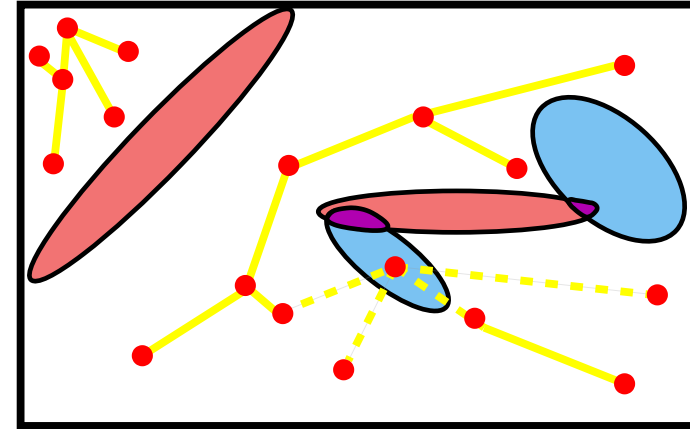
Approche par graphe dynamique

- Phase d'apprentissage



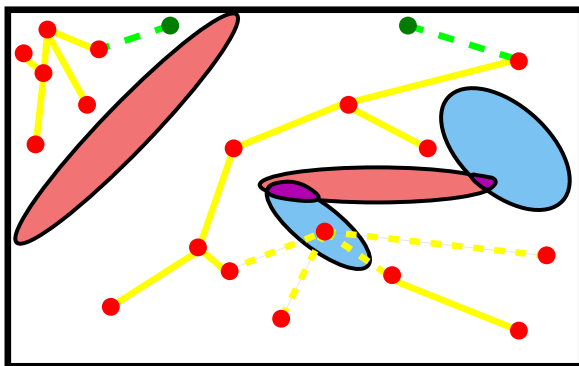
Graphe pour le robot seul

- Phase de recherche

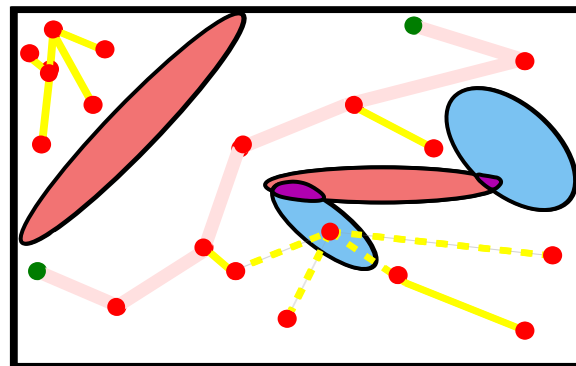


Marquage des arêtes

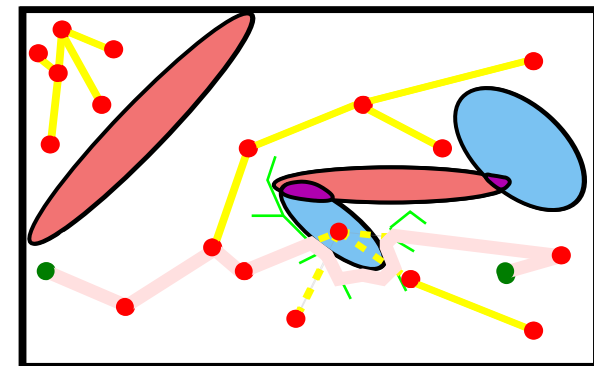
Trois cas possibles :



Pas de solution



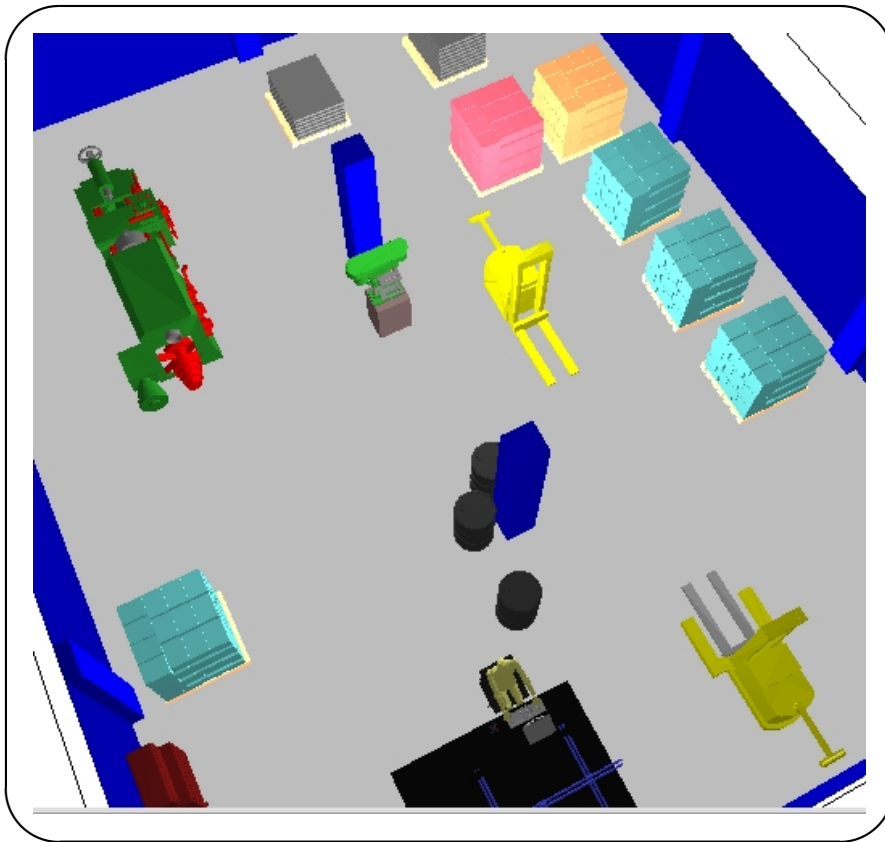
Solution



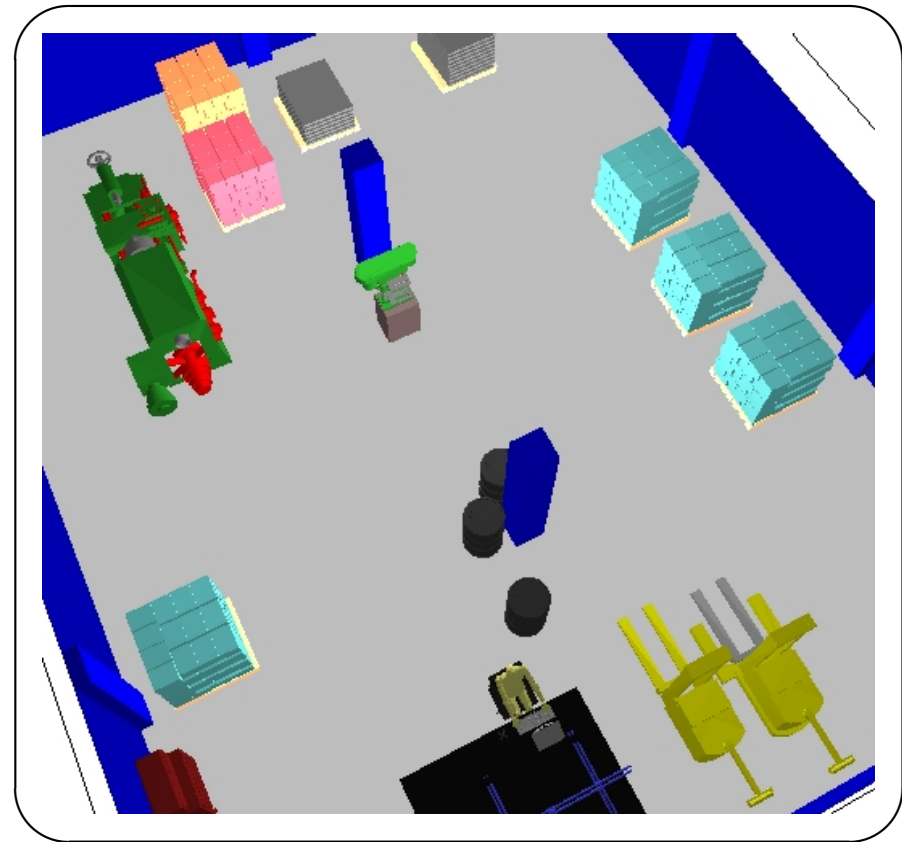
Mise à jour dynamique

Exemple d'un transpalette avec deux objets déplaçables

Entrées du problème



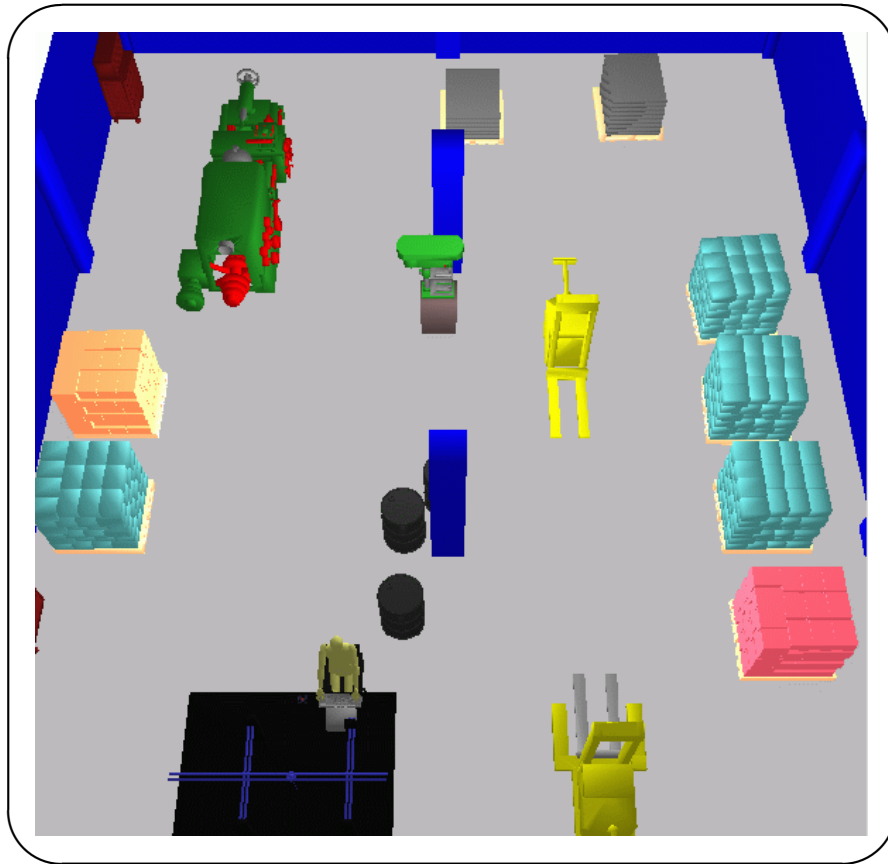
Configuration initiale



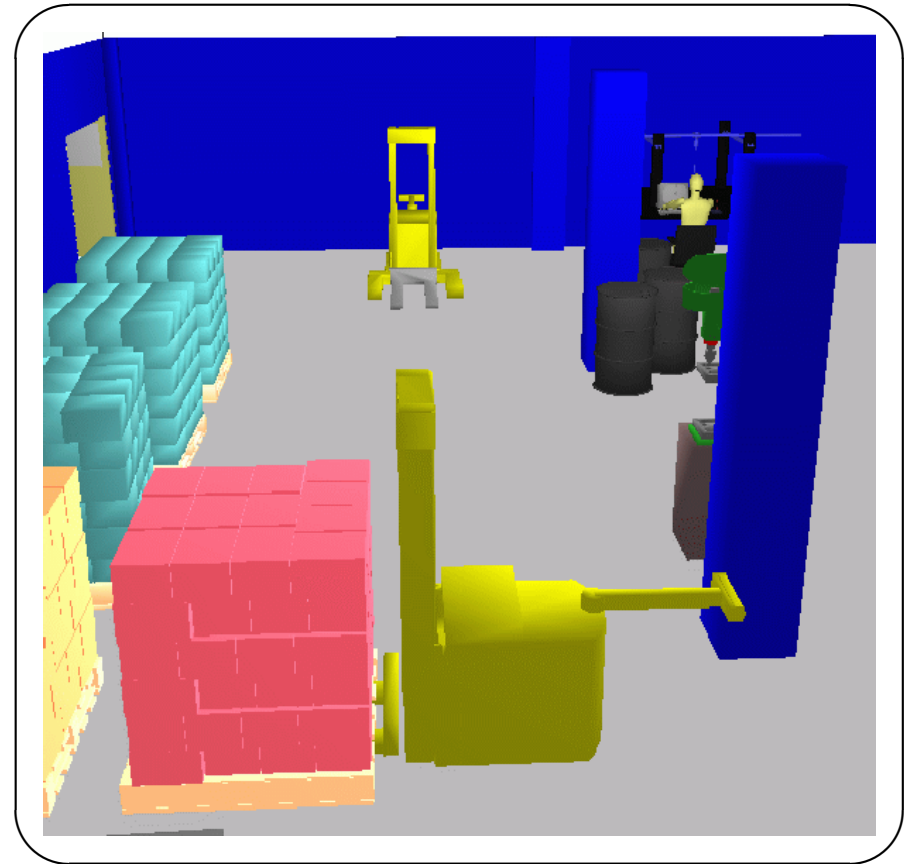
Configuration finale

Exemple d'un transpalette avec deux objets déplaçables

Entrées du problème



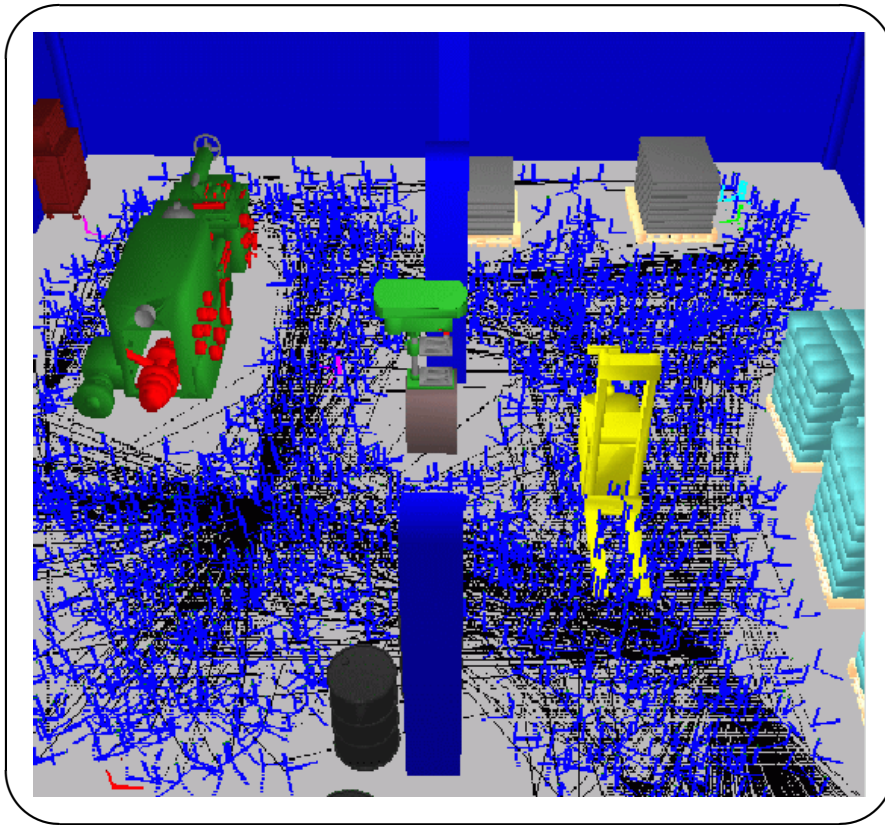
Placements intermédiaires



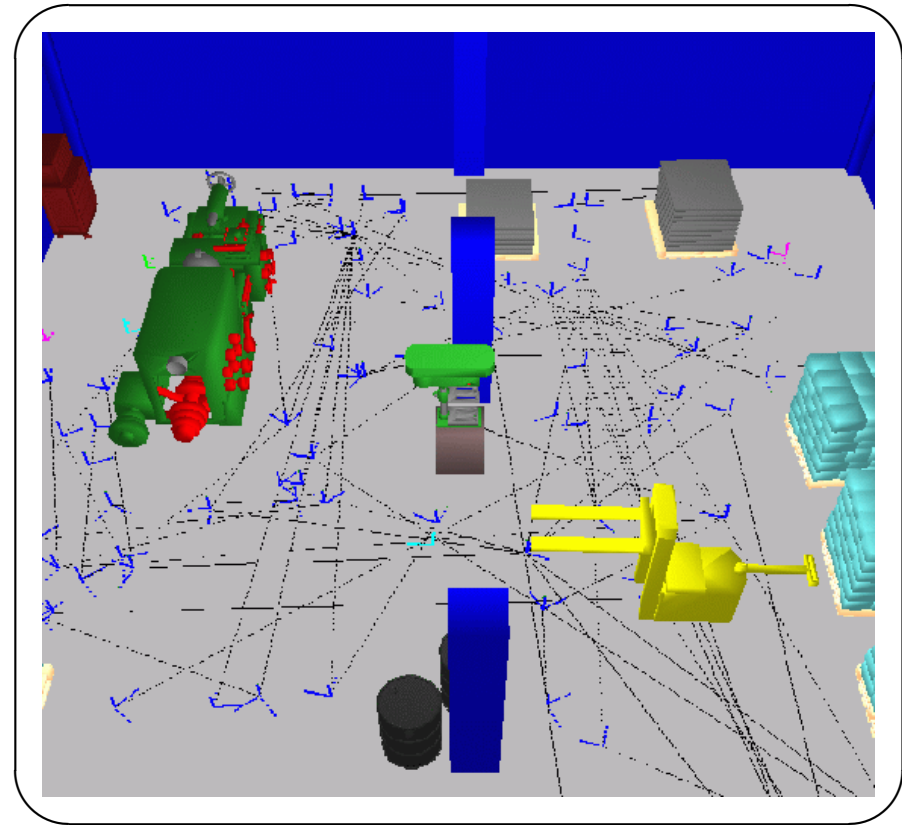
Prise possible

Exemple d'un transpalette avec deux objets déplaçables

Phase d'apprentissage



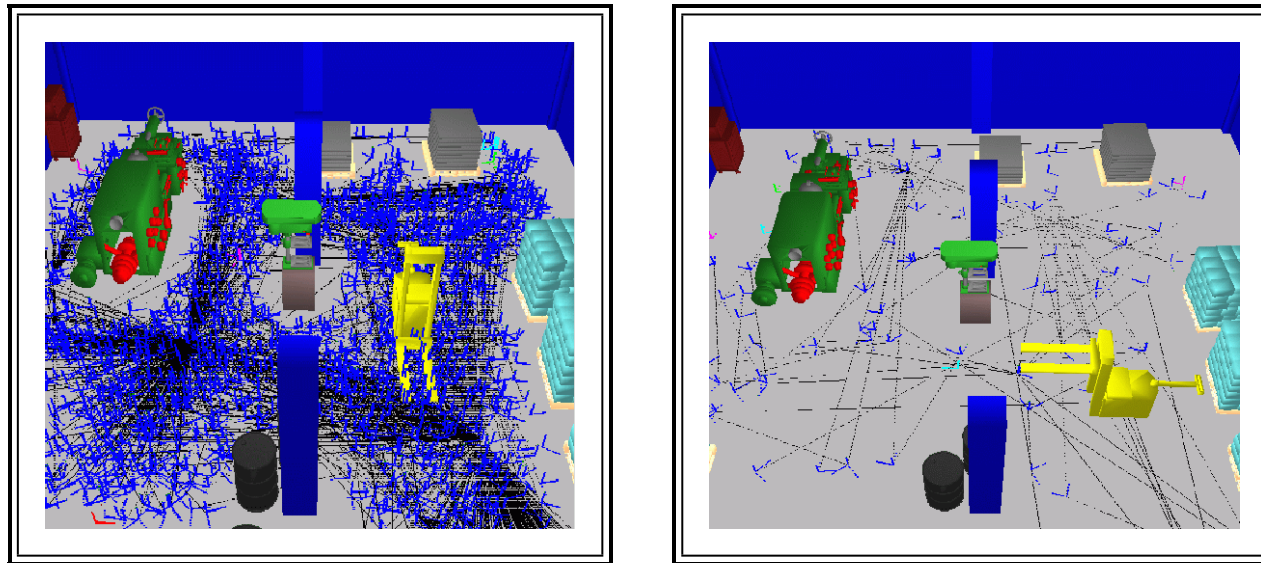
Graphe initial calculé par PRM



Graphe initial calculé par visibilité-PRM

Exemple d'un transpalette avec deux objets déplaçables

Phase de recherche



	PRM	Visibilité-PRM
<i>Taille du graphe</i>	1457	115
<i>Couverture de $C S_{libre}$</i>	99.43%	98.83%
<i>Temps de résolution</i>	326.5 sec	35.4 sec

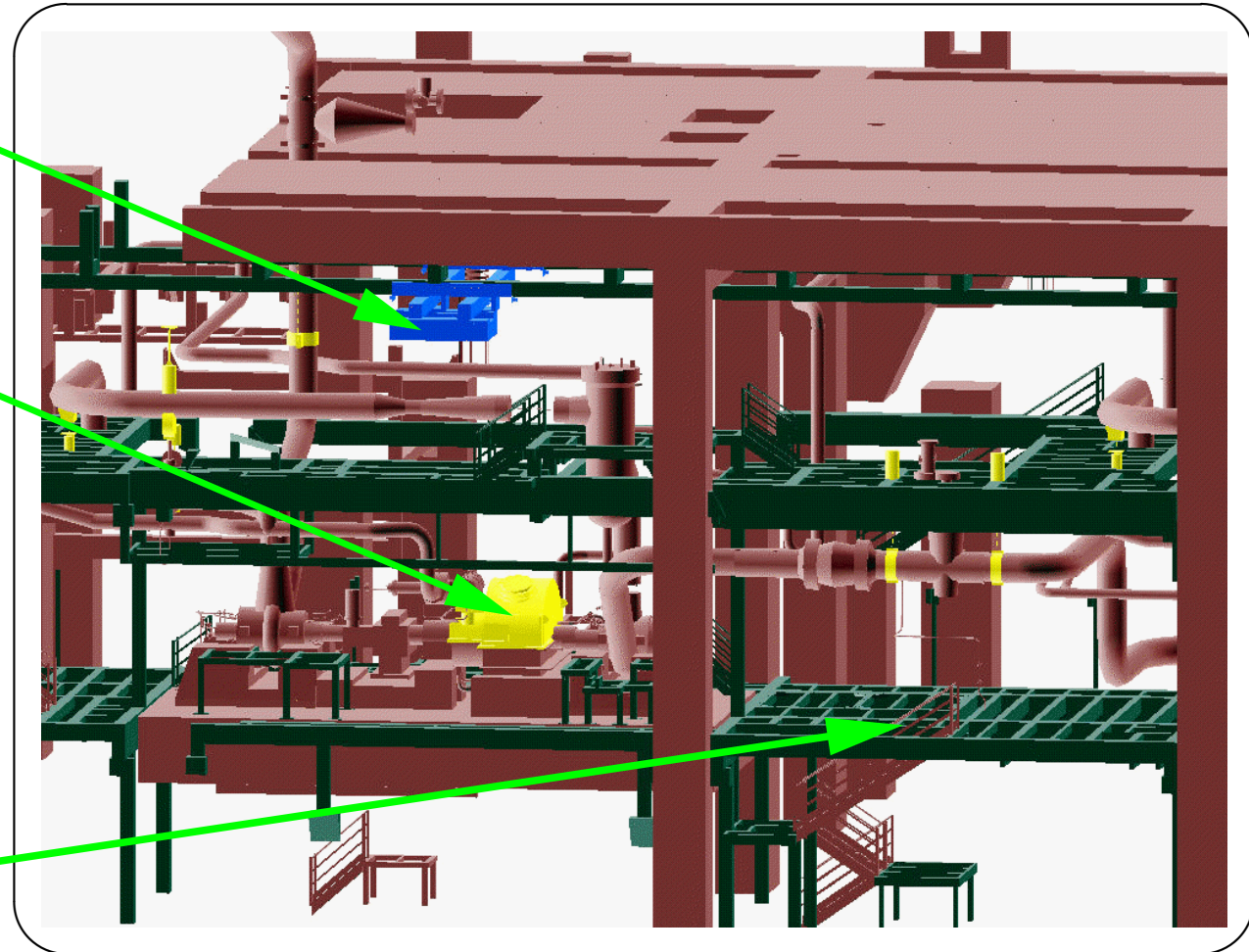
Pont roulant (exemple MOLOG)

Pont roulant

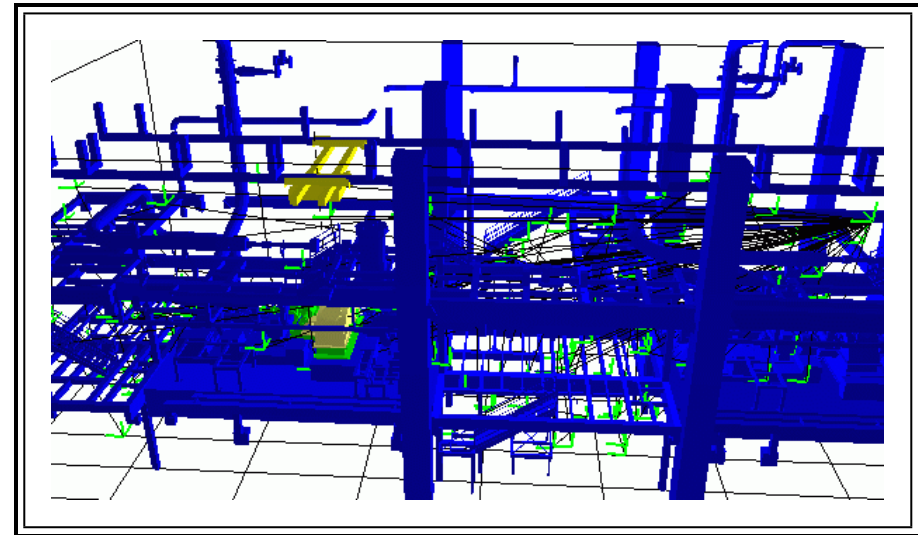
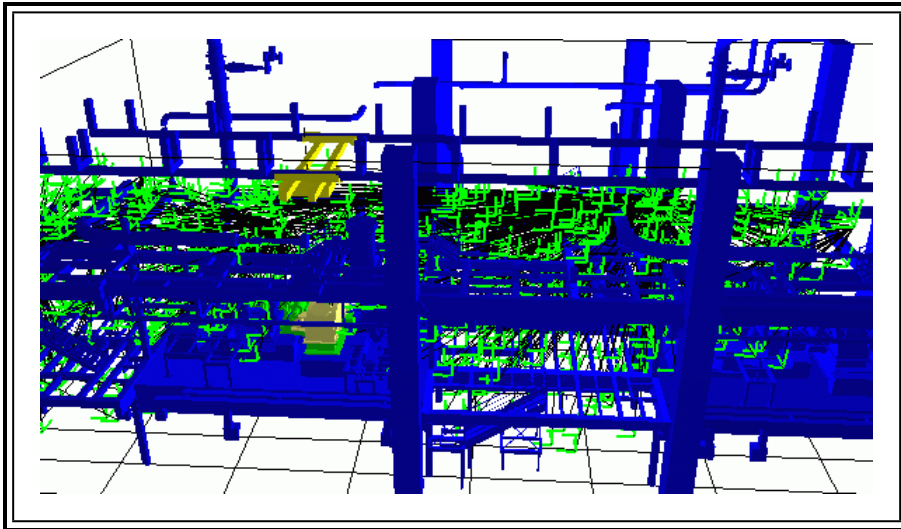
Turbo-pompe



Placement final du capot



Pont roulant (exemple MOLOG)



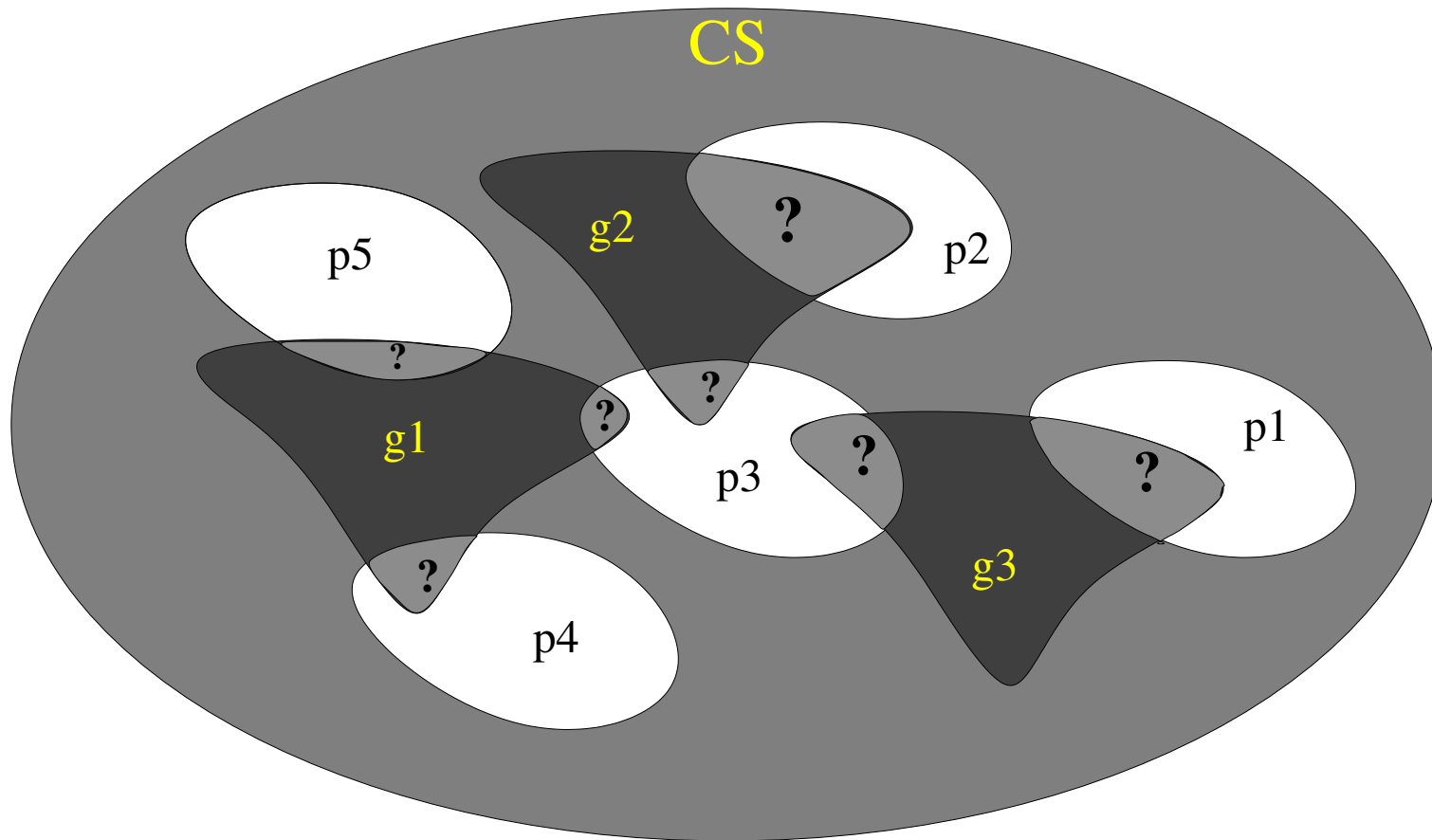
	PRM	Visibilité-PRM
<i>Taille du graphe</i>	1246	145
<i>Couverture de CS_{libre}</i>	99.15%	98.78%
<i>Temps de résolution</i>	23.5 sec	42.4 sec

Plan de la présentation

- Problématique
- Introduction
- Formulation géométrique et approche adoptée
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes discrètes
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes continues
- Résultats et Analyse
- Conclusions et perspectives

Cas de contraintes de manipulation continues

- $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$ est composé d'un ensemble fini de domaines continus



Cas de contraintes de manipulation continues

• Question :

La connectivité de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$ reflète -t- elle l'existence d'un chemin de manipulation ?

• Réponse :

Propriété de réduction : [Alami 89]

Deux configurations du système appartenant à la même composante connexe de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$ sont connectables par un chemin de manipulation

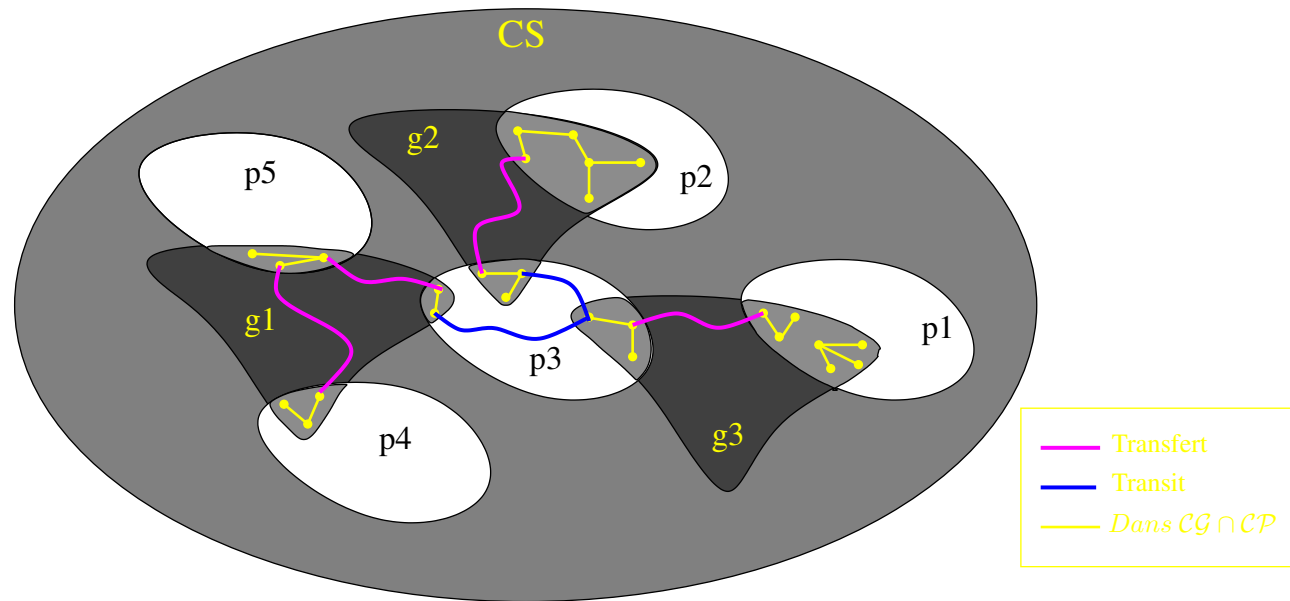
⇒ Tout chemin calculé dans $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$ peut être transformé en une séquence finie de chemins de transit/transfert

Cas de contraintes de manipulation continues

- Un algorithme en deux étapes:

Capturer la connectivité de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$ dans une structure de graphe

Connecter ses différentes composantes connexes par des chemins de transit/transfert

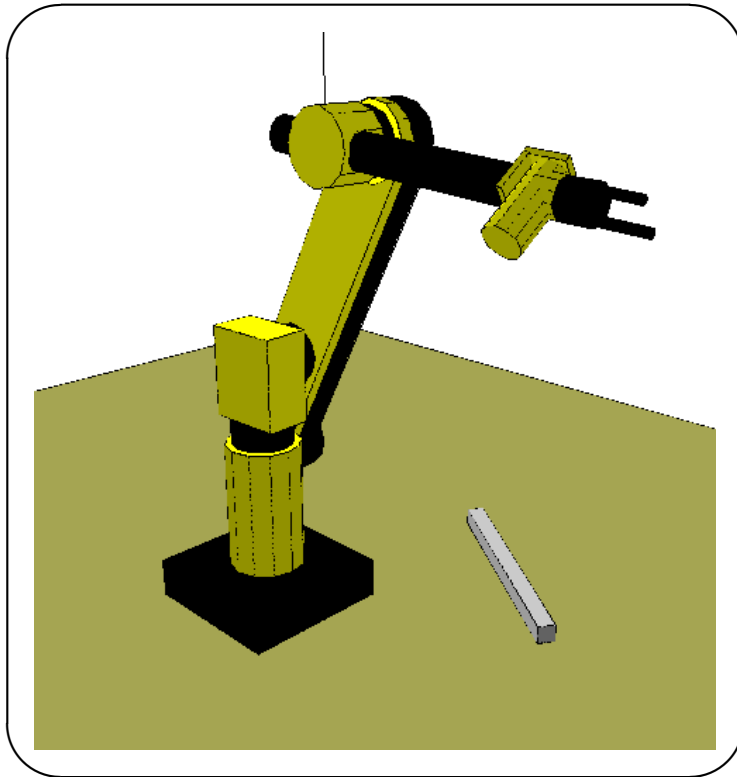


- Problème :

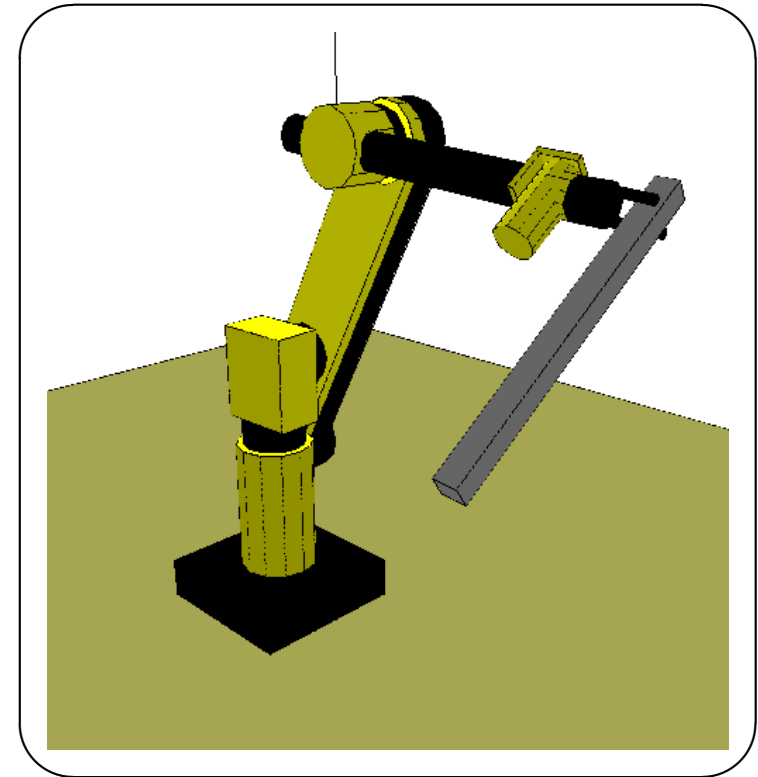
Comment calculer un graphe capturant la connectivité de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$?

Cas de contraintes de manipulation continues

Le sous-espace $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$



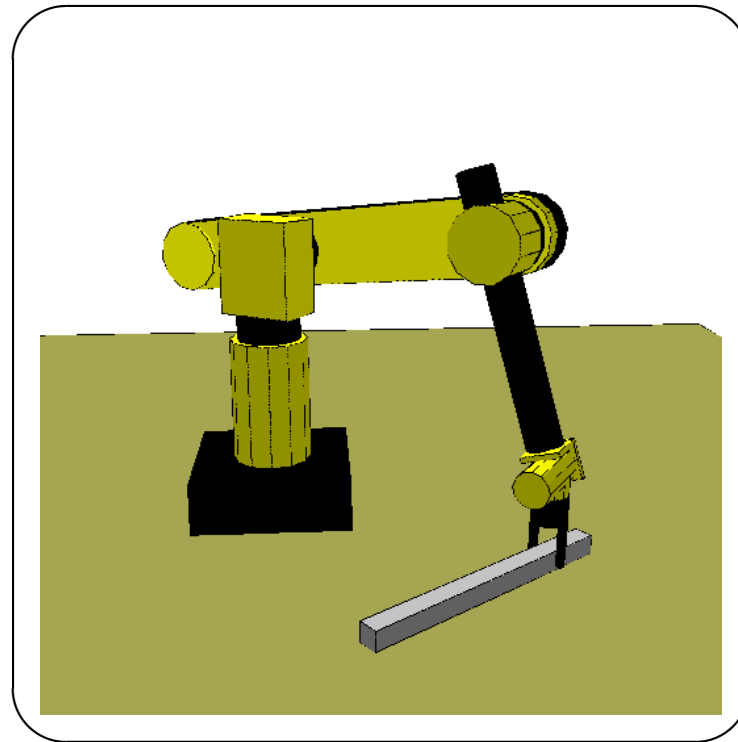
PLACEMENT (\mathcal{CP})



GRASP (\mathcal{CG})

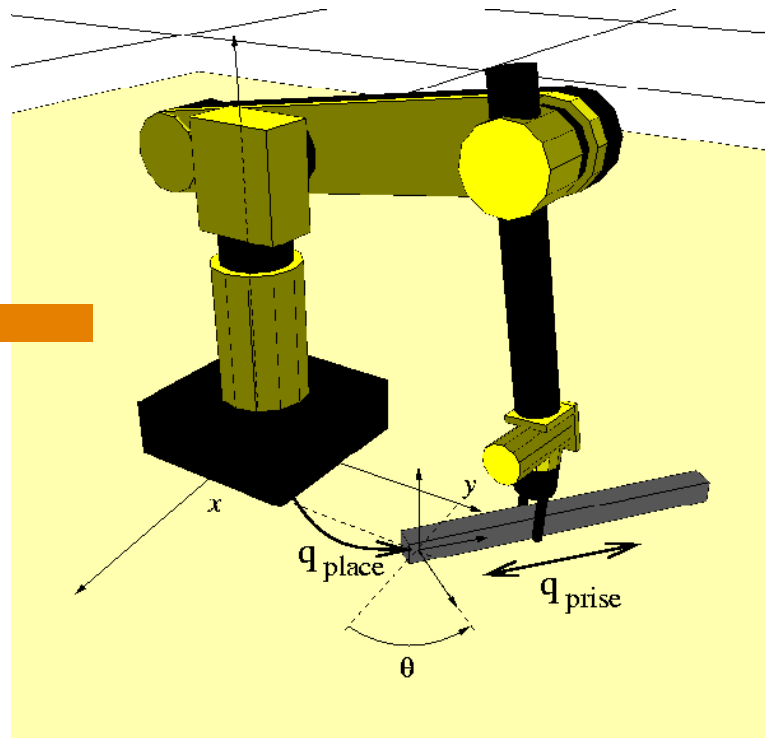
Cas de contraintes de manipulation continues

Le sous-espace $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$



GRASP \cap PLACEMENT ($\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$)

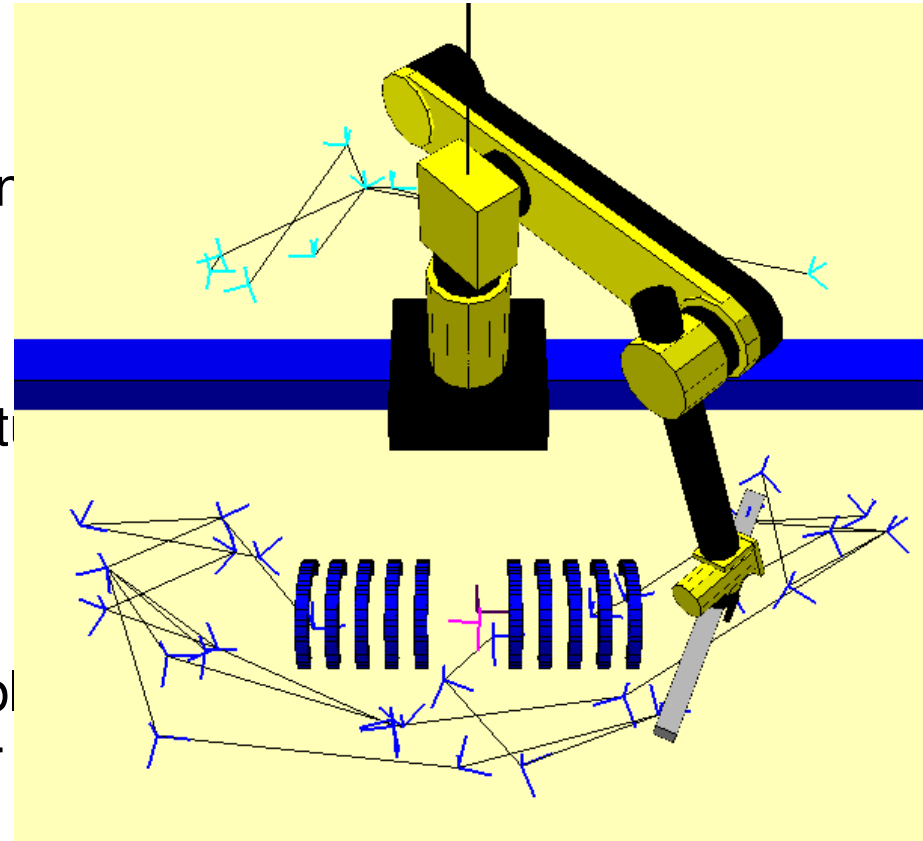
Composantes connexes de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$



Chaîne

Capt

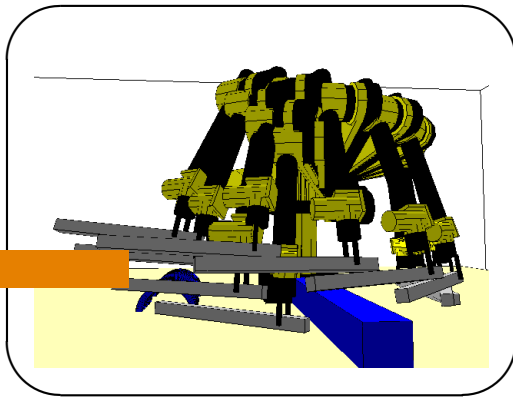
Probl
pour



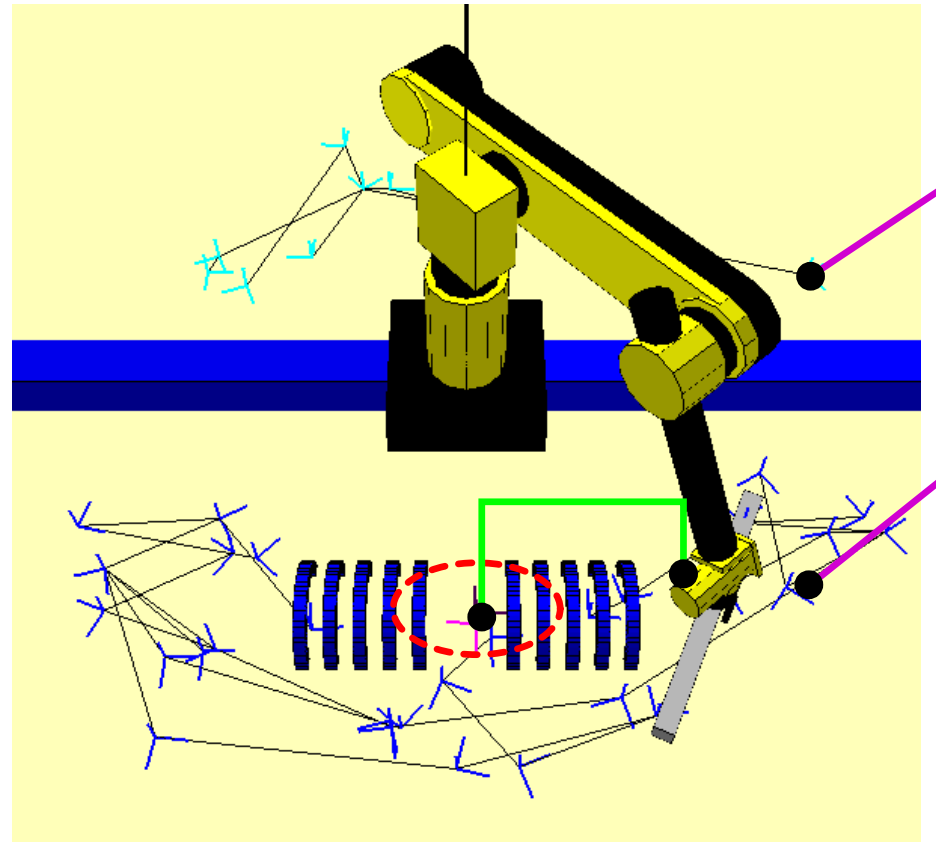
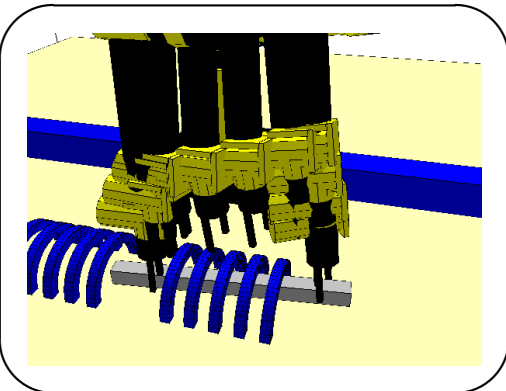
- ★ RLG : planificateur pour des chaînes fermées [Cortés 02]
- ★ Visibilité-PRM (graphe de taille réduite) [Nissoux 99]

Connexions par des chemins de transit et de transfert

- Graphe dans $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$
- Connexions par chemins de transfert



- Connexions par chemins de transit

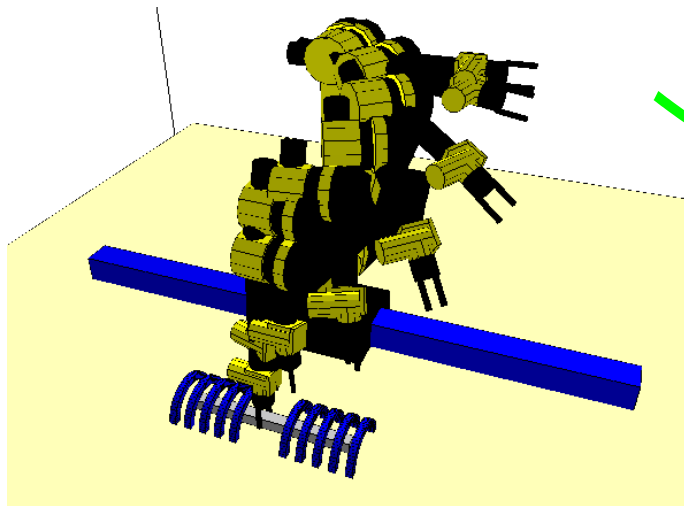
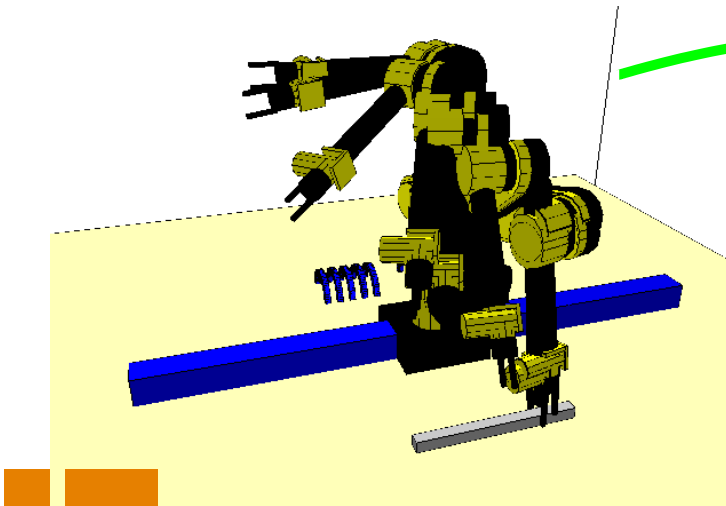


Plusieurs requêtes de planification dans un environnement partiellement changeant

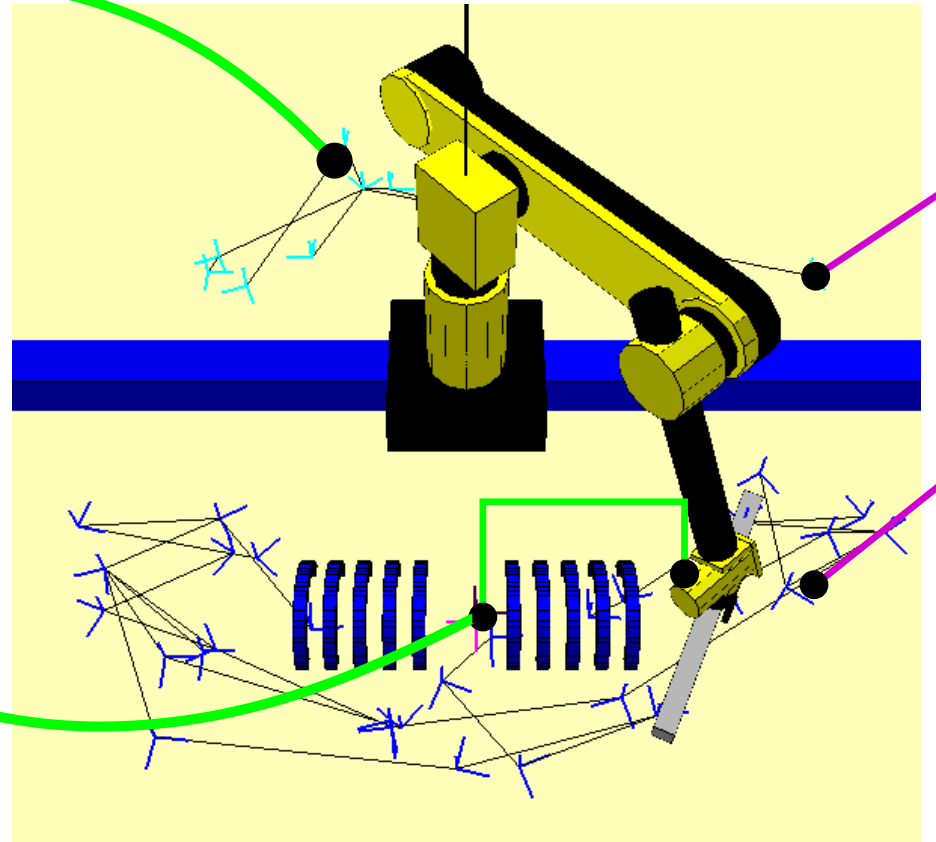
⇒ Approche par graphe dynamique

Recherche de chemin de manipulation

Chemin de Transit



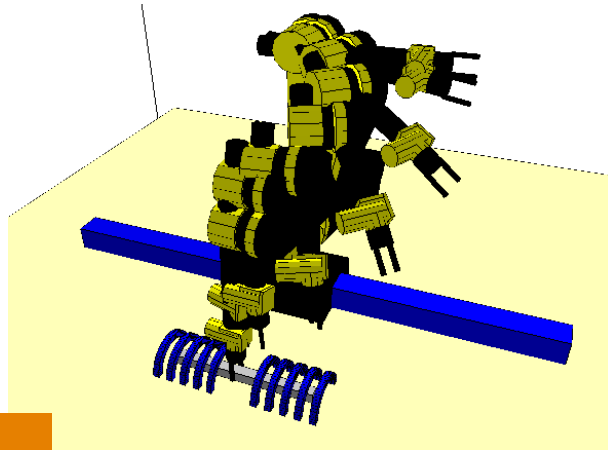
Chemin de Transit



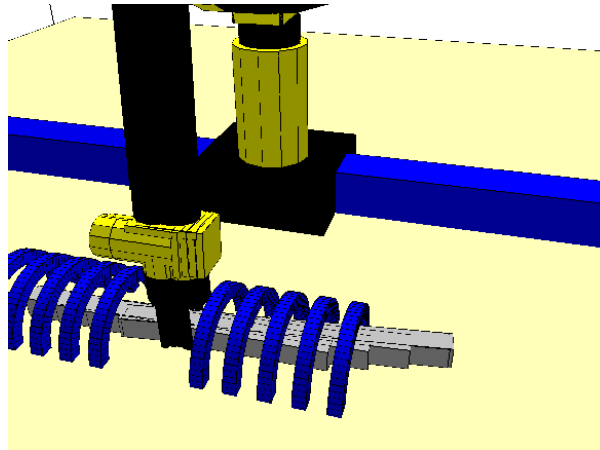
Graphe de Manipulation

Recherche de chemin de manipulation

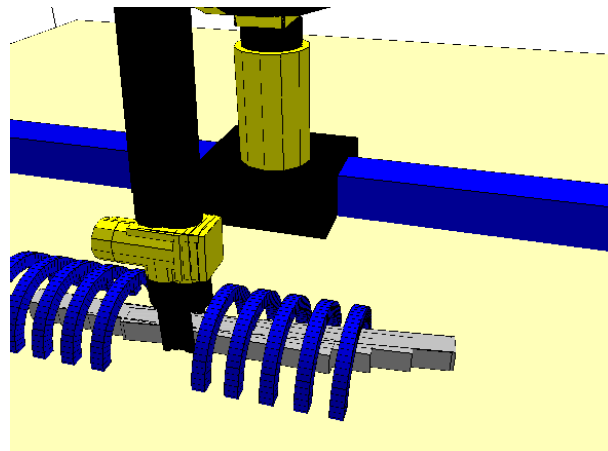
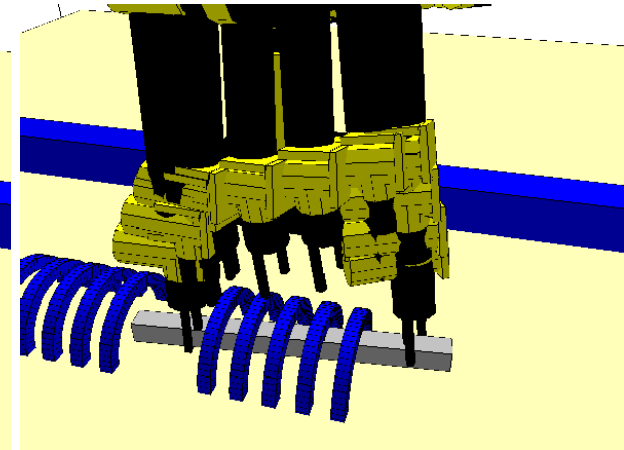
Chemin de transit



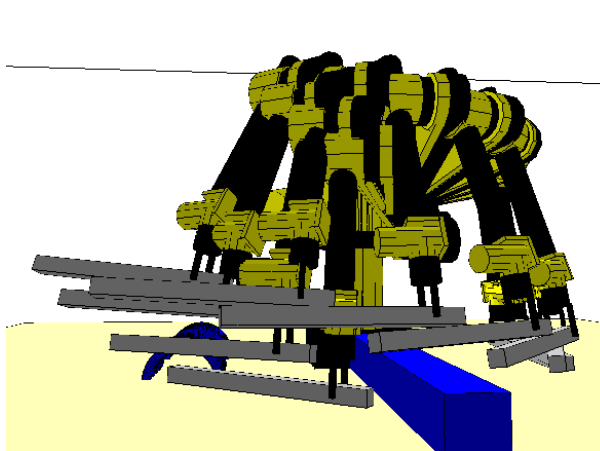
Chemin dans $CG \cap CP$



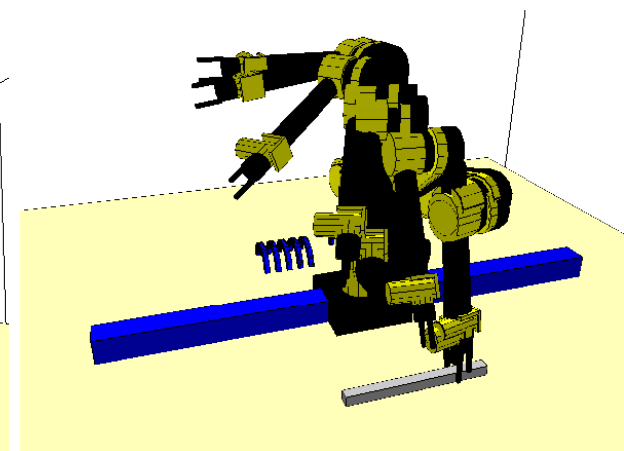
Chemin de transit



Chemin dans $CG \cap CP$



Chemin de transfert



Chemin de transit

Chemins dans $CG \cap CP \Rightarrow$ Séquences finies de chemins de transit/transfert

Phase d'optimisation et de lissage

- Après transformation des chemins dans $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$

Chemin de manipulation admissible (séquence alternée de chemins de transit/transfert)

Contient des séquences de prises et de poses inutiles

- Minimisation des séquences de prise/pose

Éliminer les placements intermédiaires inutiles

Remplacer les longues séquences de transit/transfert par une séquence simple

- Lissage du chemin solution

Lisser le chemin long et irrégulier issu de la phase de minimisation

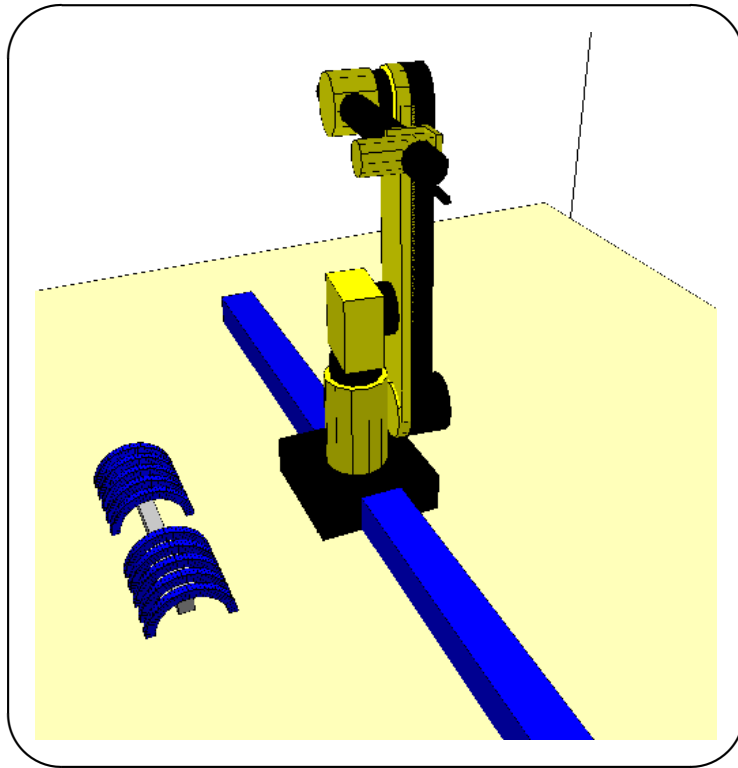
Optimisation locale et non globale (une seule classe d'homotopie)

Plan de la présentation

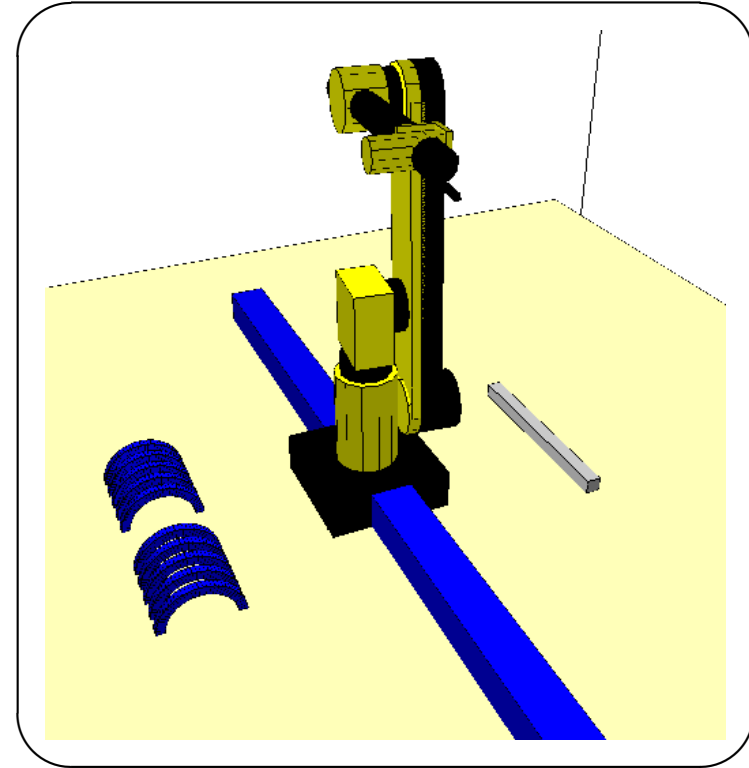
- Problématique
- Introduction
- Formulation géométrique et approche adoptée
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes discrètes
- Planification de tâches de manipulation sous contraintes continues
- Résultats et Analyse
- Conclusions et perspectives

Résultats et Analyse

Exemple Cage



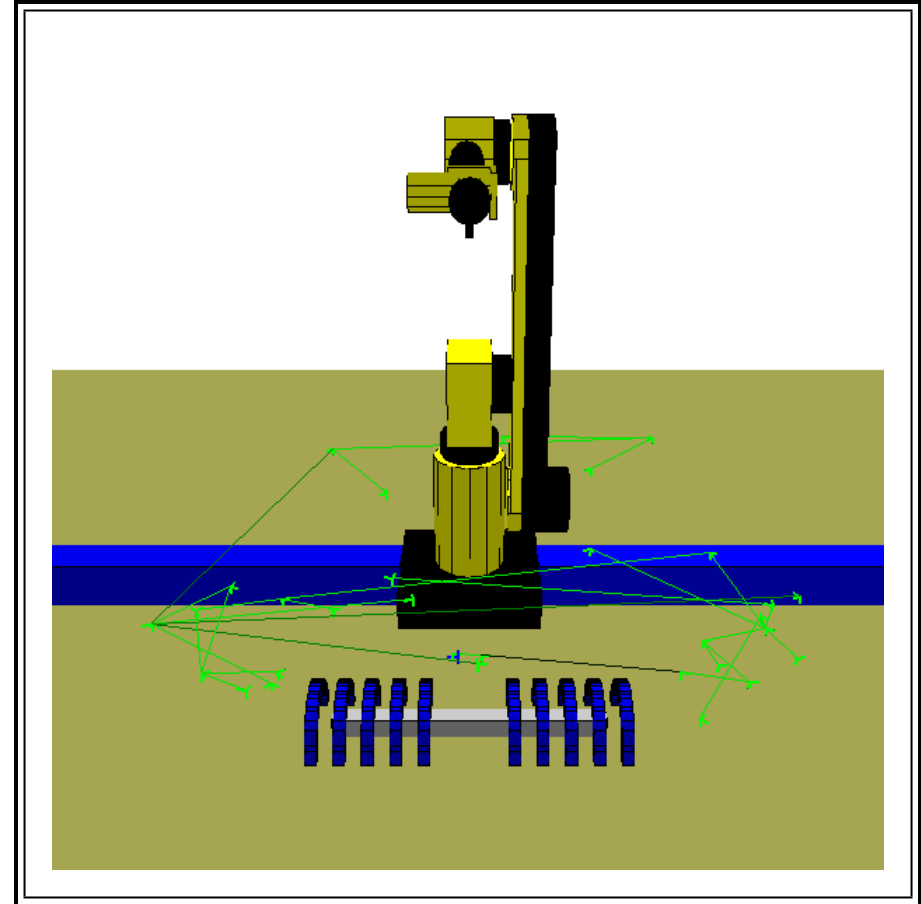
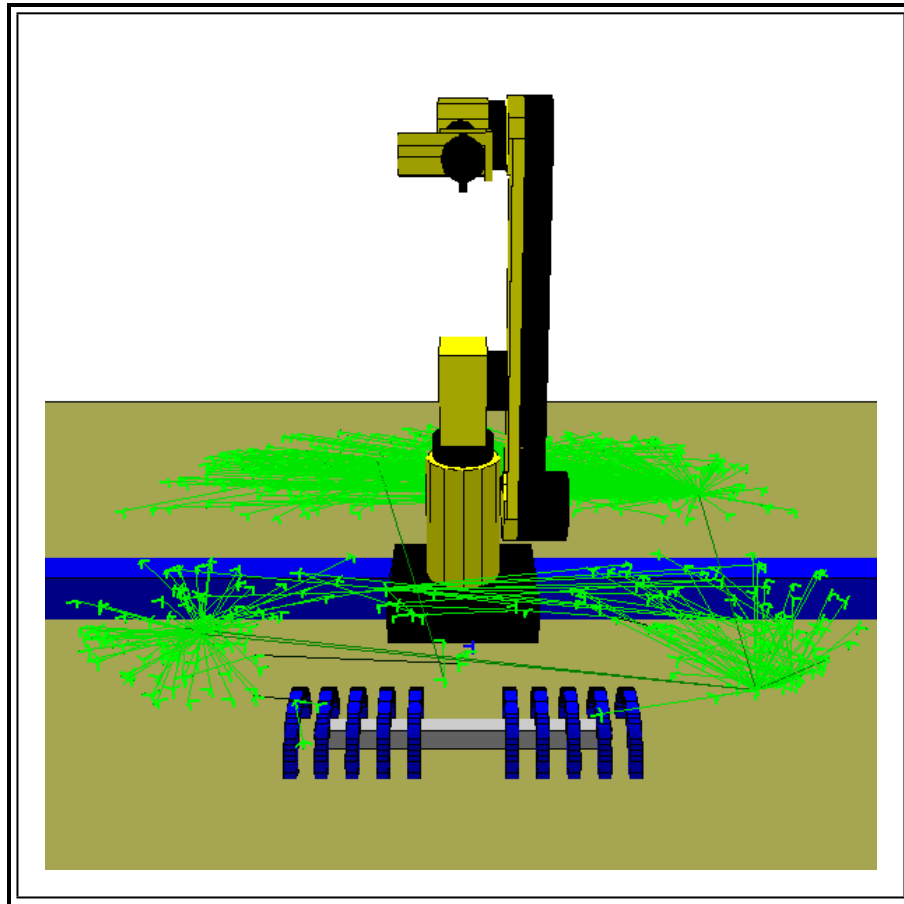
Configuration initiale



Configuration finale

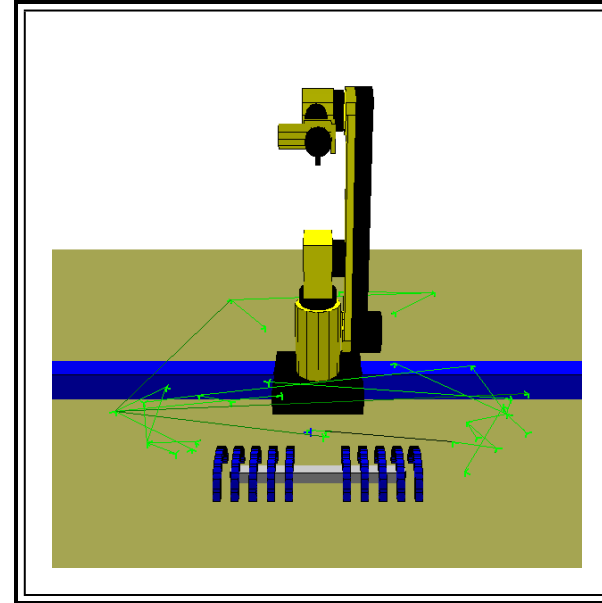
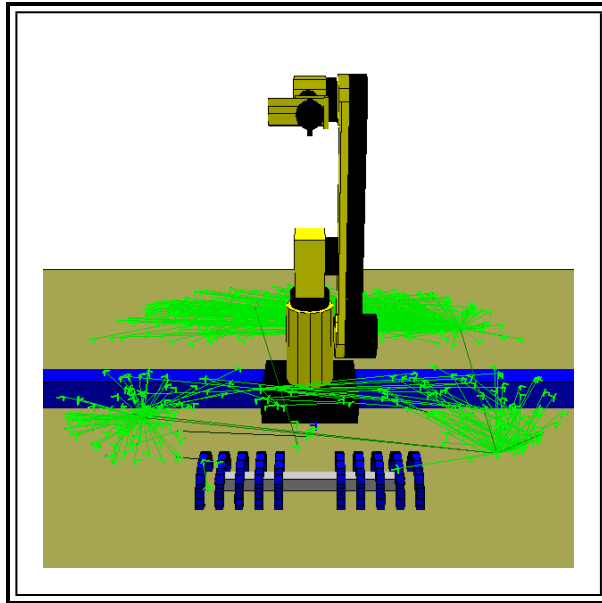
Exemple Cage

Comparaison entre PRM et Visibilité-PRM pour l'exploration de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$



Exemple Cage

Comparaison entre PRM et Visibilité-PRM pour l'exploration de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$



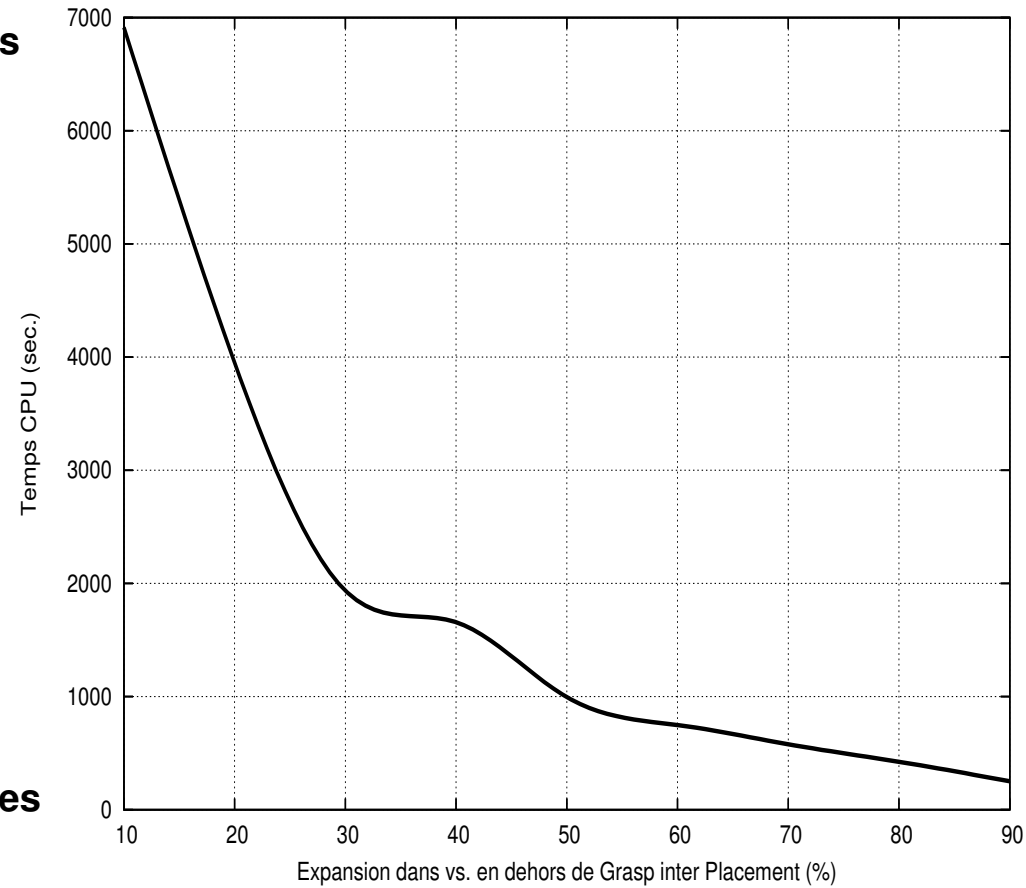
	PRM	Visibilité-PRM
<i>Temps moyen de résolution</i>	61.59 sec	45.82 sec
<i>Temps max. de résolution</i>	385.04 sec	183.58 sec
<i>Temps min. de résolution</i>	4.18 sec	13.13 sec

Performance

Temps (sec.)

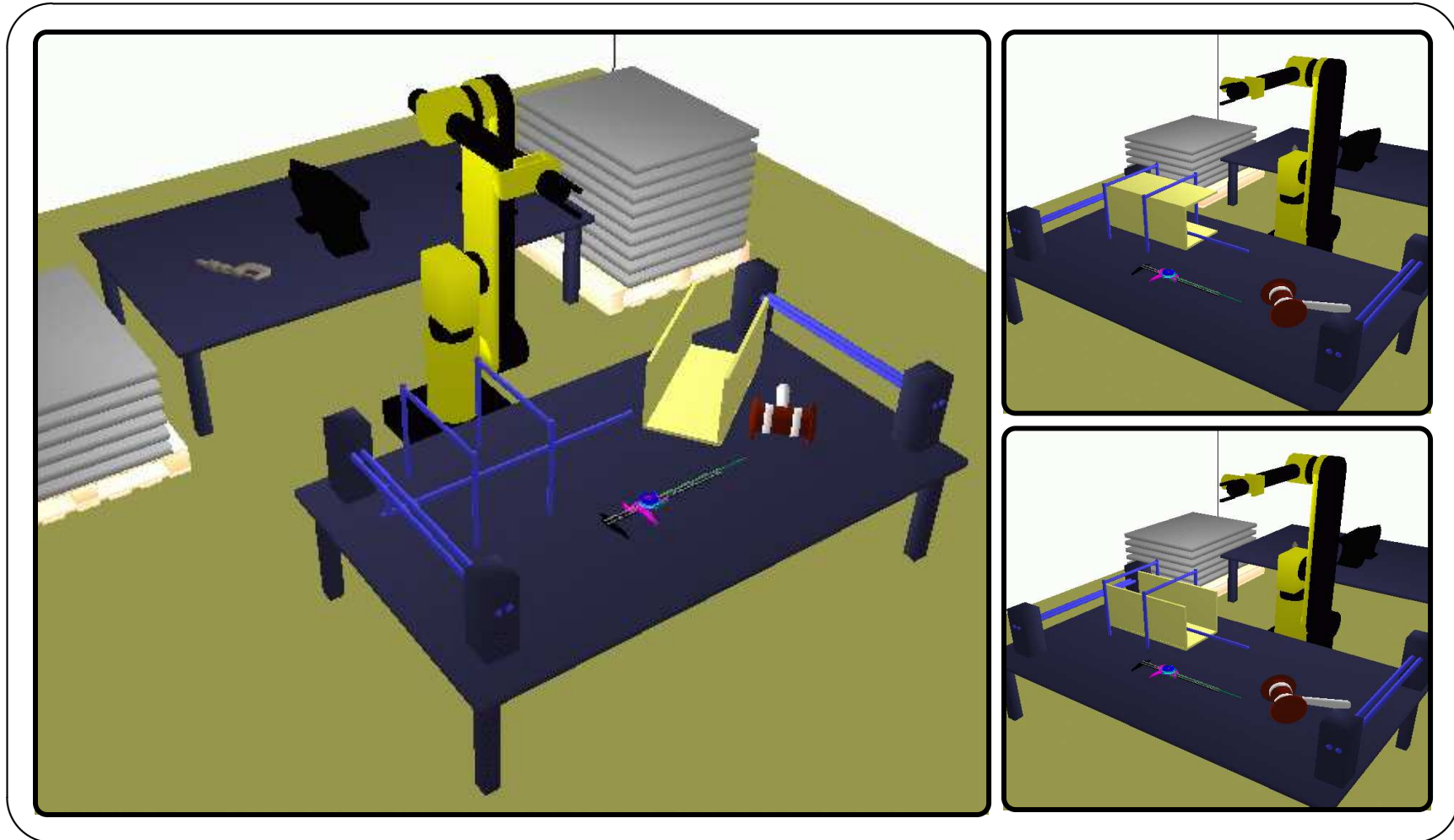
~ 2 heures

< 2 minutes

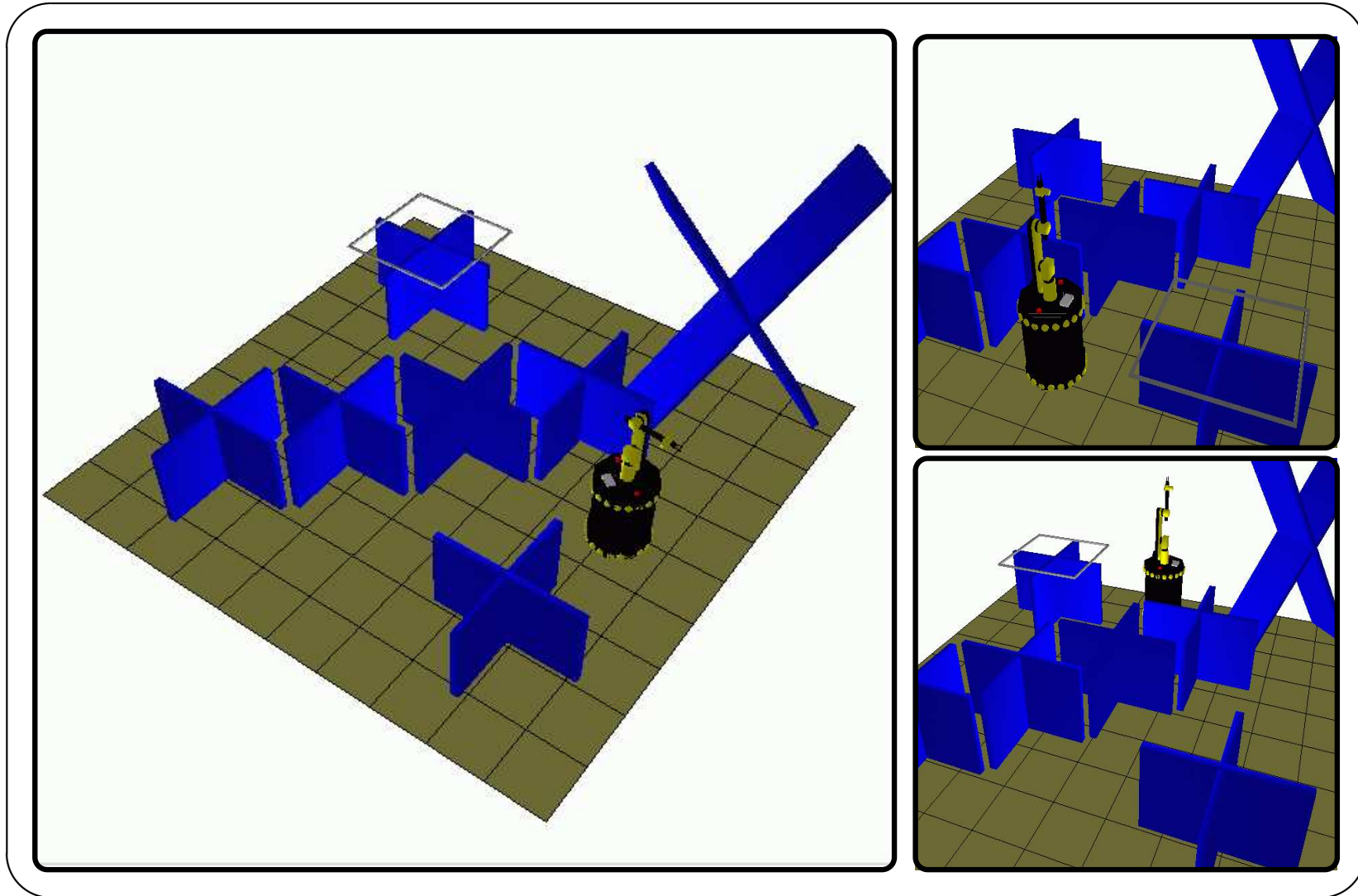


Discret \Longleftarrow Exploration de $\mathcal{CG} \cap \mathcal{CP}$ \Longrightarrow Continu

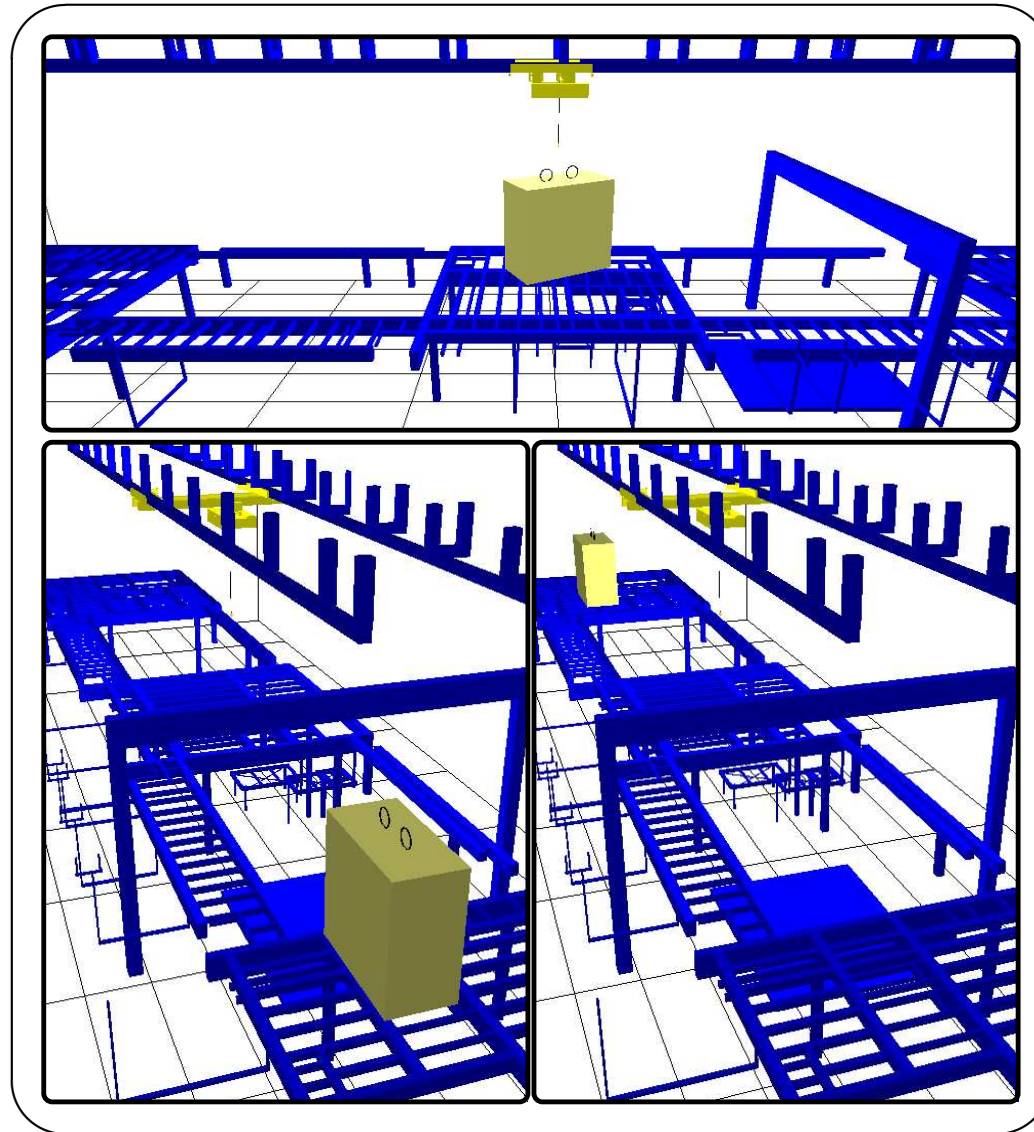
Exemple avec multi - poses/prises



Exemple d'un manipulateur mobile



Pont roulant



Travaux en cours

- Quatre bras manipulateurs déplaçant un objet
- Trois robot manipulateurs déplaçant un piano
- Manipulation dextre en absence d'obstacles
- Manipulation dextre en présence d'obstacles