

Thèse de doctorat

Conception et Commande Collaborative de Manipulateurs Mobiles Modulaires (C^3M^3)

Présentée par :

M. Zine Elabidine CHEBAB

Soutenance devant le jury composé de :

M. Damien CHABLAT
M. Said ZEGHLOUL
M. Olivier COMPANY
Mme. Véronique PERDEREAU
M. Laurent SABOURIN
M. Nicolas BOUTON
M. Jean-Christophe FAUROUX
M. Youcef MEZOUAR

Directeur de recherche, LS2N (Nantes)
Professeur des universités, Pprime (Poitiers)
Maître de conférences, LIRMM (Montpellier)
Professeur des universités, ISIR (Paris)
Maître de conférences HDR, Institut Pascal
Maître de conférences, Institut Pascal
Maître de conférences HDR, Institut Pascal
Professeur des universités, Institut Pascal

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examinatrice
Directeur de thèse
Encadrant
Encadrant
Encadrant

11 décembre 2018 - SIGMA-Clermont

Sommaire

- 1 Introduction
- 2 Système robotique coopératif et analyse structurale
- 3 Synthèse structurale des manipulateurs mobiles
- 4 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles
- 5 Conclusions et perspectives

1 Introduction

- Présentation des manipulateurs mobiles
- Coopération en robotique
- Défis des manipulateurs mobiles
- Objectifs de la thèse

2 Système robotique coopératif et analyse structurale

3 Synthèse structurale des manipulateurs mobiles

4 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles

5 Conclusions et perspectives

Structure d'un manipulateur mobile

Manipulateur Mobile (MM)

Bras manipulateur

Classification selon l'architecture cinématique

■ Sériele ■ Parallèle



■ LWR iiwa,
Kuka



■ Quattro,
LIRMM
Adept-Omron



■ Tricept,
ABB

Plateforme mobile

Classification selon l'organe de locomotion

● Corps ● Pattes ● Chenilles ● Roues



● Serpent modulaire,
Wright et al., [2012]



● SpotMini,
Boston Dynamics



● Jaguar Lite,
Dr Robot



● SUMMIT-XL,
Robotnik



● OpenWheel i3R,
Fauroux et al., [2007]

Domaines d'utilisation des Manipulateurs Mobiles (MMs)

Environnement

- Extérieur
- Franchissement d'obstacles

Utilisation

- Manipulation
- Opérations industrielles



■ Parachèvement des pièces
Robot KMR Quantec, Kuka



■ ■ ■ ■ Exploration spatiale
Robot Curiosity, Jet Propulsion Lab



■ Polissage
Detert et al., [2017]



■ ■ Cueillette des pommes
MAGALI, IRSTEA



■ ■ ■ ■ Inspection et intervention
Packbot, Endeavor Robotics



■ Recherche scientifique



■ ■ ■ Robot Handle,
Boston Dynamics

Coopération Vs Collaboration

Coopération

- Interactions robot-robot

Collaboration

- Interactions homme-robot

- Plateformes mobiles
- Bras manipulateurs



■ Poussée coopérative
 Gerkey et al., [2002]



■ Manipulation coopérative
 Mannheim et al., [2013]



■● Transport collaboratif
 Hirata et al., [2009]



● Montage collaboratif
 Cherubini et al., [2013]

Coopération Vs Collaboration

Coopération

□ Interactions robot-robot

Collaboration

○ Interactions homme-robot

- Plateformes mobiles
 - Bras manipulateurs



■ Poussée coopérative
 Gerkey et al., [2002]



■ Manipulation coopérative
 Mannheim et al., [2013]



■● Transport collaboratif
 Hirata et al., [2009]



● Montage collaboratif
 Cherubini et al., [2013]

Objet des travaux :
 coopération des manipulateurs mobiles

■● Transport et manipulation
 coopérative
 Hirata et al., [2008]



Coopération des manipulateurs mobiles

- Extérieur
- MMs différents
- Plus de 2 MMs



Manipulation et transport
 Khatib et al., [1999]



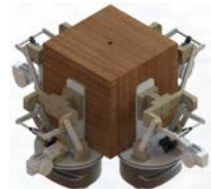
■ Transport de charges
 Sugar et al., [2000]



■ Transport de poutres
 Stroupe et al., [2006]



■ Manipulation et transport de charges lourdes
 Kume et al., [2002]



■ Transport de charges
 Hichri et al., [2015]

Coopération des manipulateurs mobiles

- Extérieur
- MMs différents
- Plus de 2 MMs



Manipulation et transport
Khatib et al., [1999]



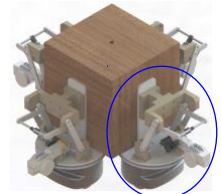
■ Transport de charges
Sugar et al., [2000]



■ Transport de poutres
Stroupe et al., [2006]



■ Manipulation et transport de charges lourdes
Kume et al., [2002]



Mono-robot (m-bot)

■ Transport de charges
Hichri et al., [2015]

Coopération des manipulateurs mobiles

- Extérieur
- MMs différents
- Plus de 2 MMs



Manipulation et transport
 Khatib et al., [1999]



■ Transport de charges
 Sugar et al., [2000]

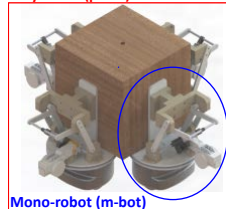


■ Transport de poutres
 Stroupe et al., [2006]



■ Manipulation et transport de charges lourdes
 Kume et al., [2002]

Poly-robot (p-bot)



Mono-robot (m-bot)

■ Transport de charges
 Hichri et al., [2015]

Limites des solutions actuelles des manipulateurs mobiles coopératifs

Besoins actuels

- **Accroître les performances** dans le domaine industriel et de service
- S'adapter aux besoins de **modularité et reconfigurabilité** de l'industrie 4.0

Limites des solutions actuelles des manipulateurs mobiles coopératifs

Besoins actuels

- **Accroître les performances** dans le domaine industriel et de service
- S'adapter aux besoins de **modularité et reconfigurabilité** de l'industrie 4.0

Limites des solutions existantes des MMs

- Manipulateurs mobiles formés par la concaténation de deux robots industriels :
 - ⇒ Architecture **redondante**
 - ⇒ Commande **complexe**
 - ⇒ **Coûts** de fonctionnement et de maintenance **élevés**

Limites des solutions actuelles des manipulateurs mobiles coopératifs

Besoins actuels

- **Accroître les performances** dans le domaine industriel et de service
- S'adapter aux besoins de **modularité et reconfigurabilité** de l'industrie 4.0

Limites des solutions existantes des MMs

- Manipulateurs mobiles formés par la concaténation de deux robots industriels :
 - ⇒ Architecture **redondante**
 - ⇒ Commande **complexe**
 - ⇒ **Coûts** de fonctionnement et de maintenance **élevés**

Amélioration possibles des manipulateurs mobiles

- Utiliser les MMs dans des **systèmes robotiques coopératifs**
- Arriver à **modéliser et à commander** un système robotique coopératif

Objectif 1 : identifier des tâches pouvant bénéficier des MMs coopératifs

- Considérer **différents domaines** : industrie, génie civil, logistique, ...
- Prendre en compte les exigences de **modularité et de reconfigurabilité**

Objectif 2 : concevoir des nouvelles architectures cinématiques

- **Analyse structurale** des manipulateurs mobiles en tenant compte de leur utilisation coopérative
- Proposition d'une **démarche générique de synthèse structurale** en minimisant le nombre d'actionneurs

Objectif 3 : Modéliser et commander les nouvelles architectures cinématiques

- **Modélisation** en vue de commander des nouvelles architectures issues de la synthèse structurale
- **Validation des lois de commande** avec des simulations

1 Introduction

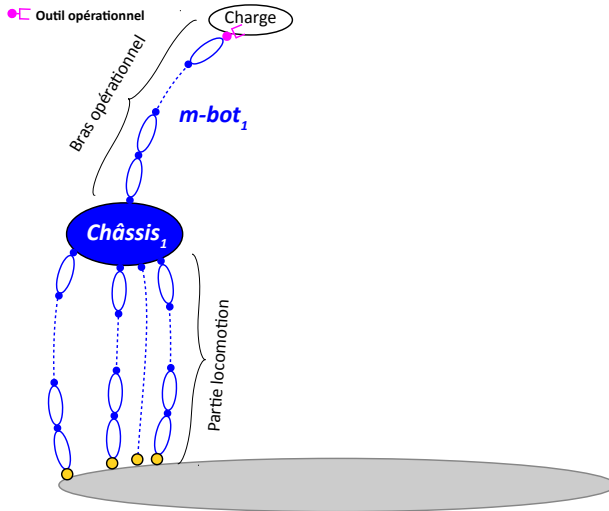
2 Système robotique coopératif et analyse structurale

- Présentation du système robotique coopératif
- Manipulation et transport d'objets en contexte industriel
- Paramètres structuraux des mécanismes
- Recherche de liaison équivalente du contact roue-sol
- Calcul des paramètres structuraux des manipulateurs mobiles

3 Synthèse structurale des manipulateurs mobiles

4 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles

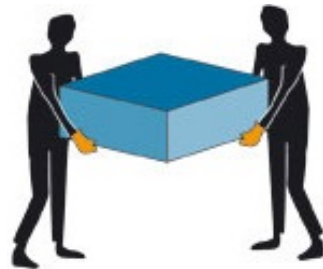
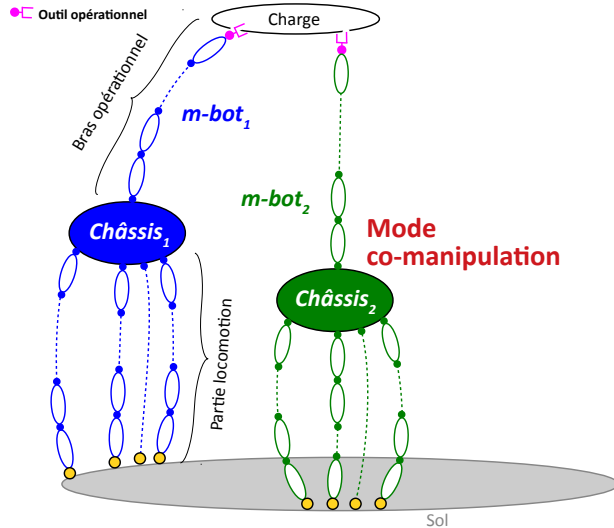
5 Conclusions et perspectives



Un opérateur humain transportant une charge



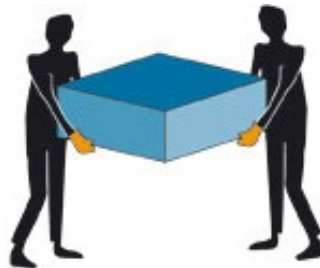
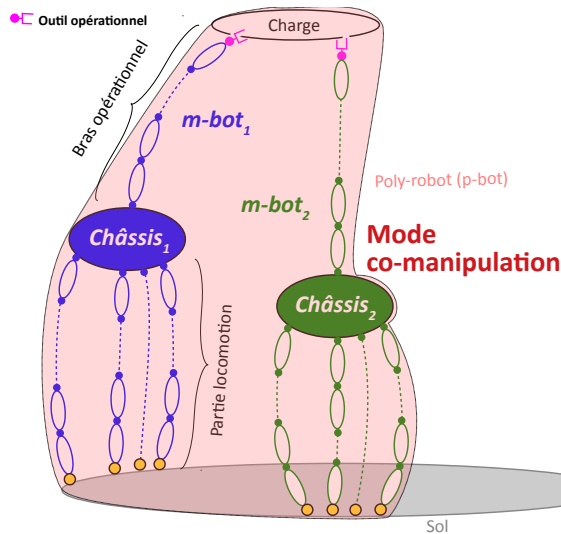
Une fourmi transportant une charge



Deux humains transportant une charge



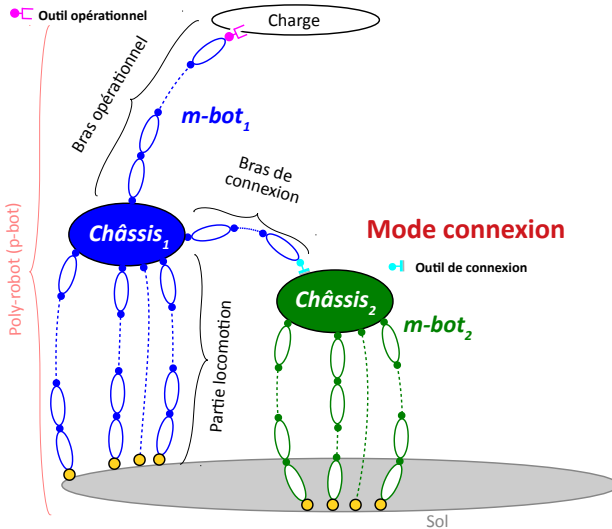
Deux fourmis transportant une charge



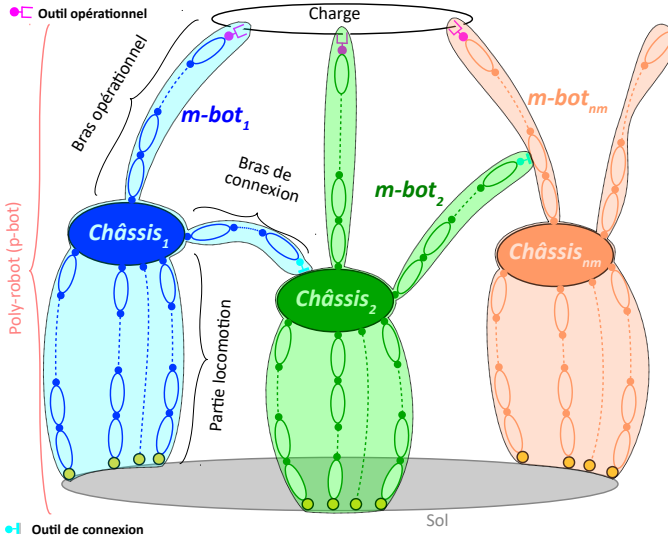
Deux humains transportant une charge



Deux fourmis transportant une charge



Des rugbymen dans une mêlée



Des rugbymen dans une mêlée

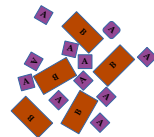


Plusieurs fourmis transportant une charge

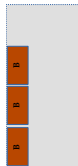
Avantages d'utilisation du système robotique coopératif

- **Modularité** : Le p-bot est composé de m-bots, composés de modules
 - ⇒ **Diminution** des coûts de maintenance
 - ⇒ **Adaptabilité** à la charge et à la tâche
- **Agilité** : Le système robotique est composé d'entités agiles
 - ⇒ **Reconfigurabilité** par rapport aux demandes variables
 - ⇒ **Flexibilité** des moyens de productions
- p-bot en mode **co-manipulation**
 - ⇒ Amélioration de la **stabilité** du p-bot
 - ⇒ Augmentation de la **capacité de charge**
- p-bot en mode **connexion**
 - ⇒ Amélioration de la **stabilité**
 - ⇒ Augmentation de la **poussée au sol**

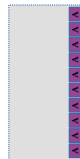
Utilisation dans la tâche de dévracage



Rack 2



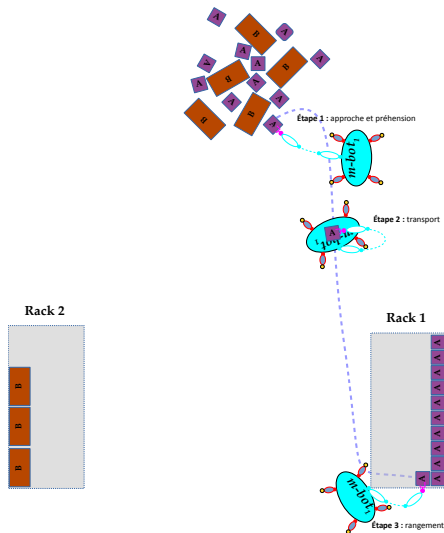
Rack 1



Utilisation dans la tâche de dévracage

Mode m-bot

- **m-bot₁** : manipulation des charges **A**
- Un seul bras opérationnel
- Outil de manipulation



Utilisation dans la tâche de dévissage

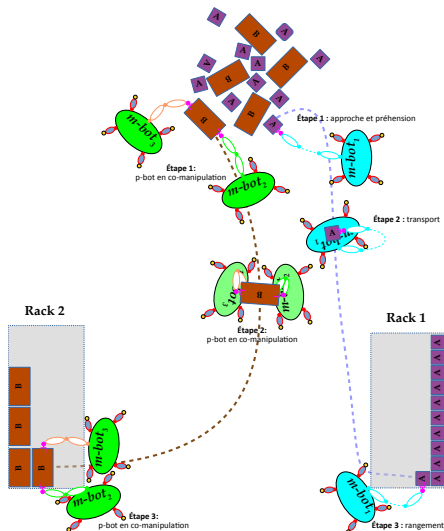
Mode m-bot

- **m-bot₁** : manipulation des charges **A**
- Un seul bras opérationnel
- Outil de manipulation

Mode p-bot en co-manipulation de la charge

- **m-bot₂** et **m-bot₃** en co-manipulation des charges **B**

Stabilité ↗ **Capacité de charge** ↗



Utilisation dans la tâche de dévissage

Mode m-bot

- **m-bot₁** : manipulation des charges **A**
- Un seul bras opérationnel
- Outil de manipulation

Mode p-bot en co-manipulation de la charge

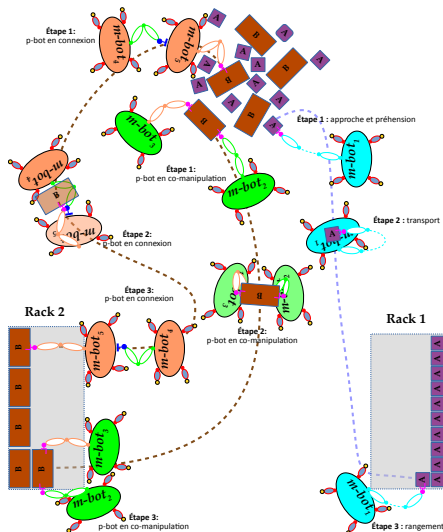
- **m-bot₂** et **m-bot₃** en co-manipulation des charges **B**

Stabilité ↗ **Capacité de charge** ↗

Mode p-bot en connexion

- Le **m-bot₄** se connecte à **m-bot₅** pour la manipulation des charges **A** ou **B**
- **Accessibilité** des zones difficiles

Stabilité ↗

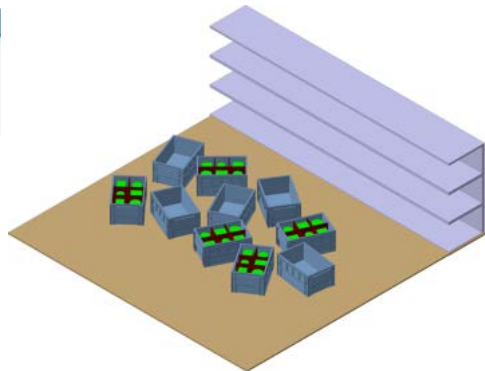


Exemple d'application

Défis N°5 du PSA Booster DAY 2016

- Levage depuis le sol
- Transport de charges
- Rangement dans des meubles

Étape initiale

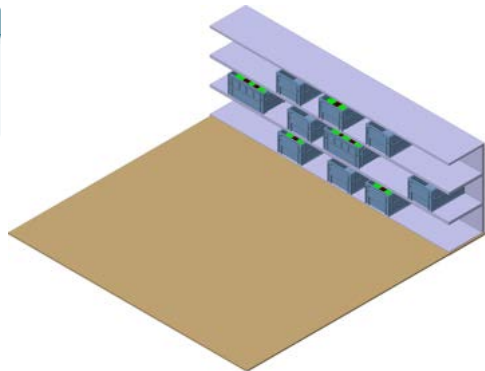


Exemple d'application

Défis N°5 du PSA Booster DAY 2016

- Levage depuis le sol
- Transport de charges
- Rangement dans des meubles

Étape finale



Exemple d'application

Défis N°5 du PSA Booster DAY 2016

- Levage depuis le sol
- Transport de charges
- Rangement dans des meubles

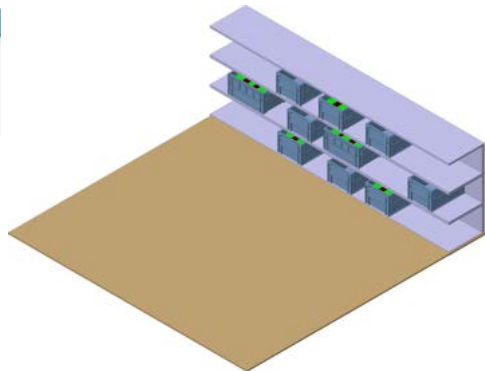
Étape finale



Caisses normalisées VDA
Axess Industries



Caisse remplie de pièces



Description des caisses

- Caisses normalisées utilisées dans le domaine de l'automobile
- Variétés des caisses et de leurs contenus

Réalisation de la tâche en m-bot



Outil de préhension



Outil en manipulation

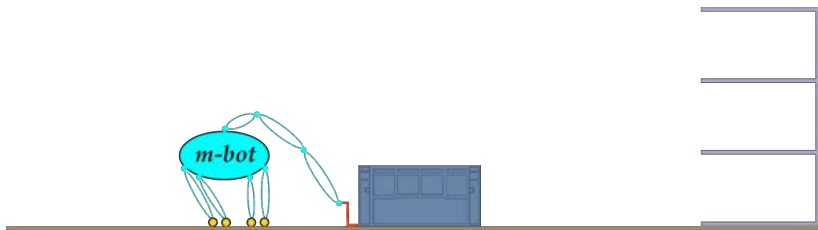
Outil opérationnel

- Forme spécifique minimisant le nombre de liaisons
- Adapté à toutes les caisses normalisées



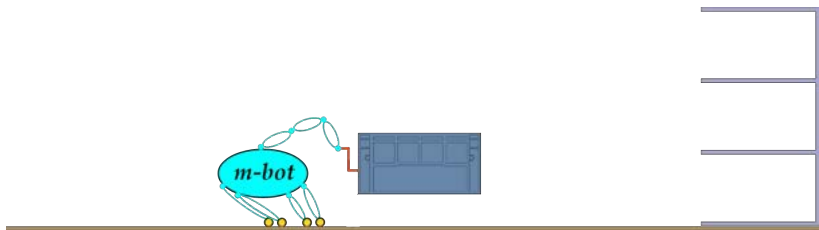
Étape 0 : Position initiale du m-bot face à la caisse

Réalisation de la tâche en m-bot



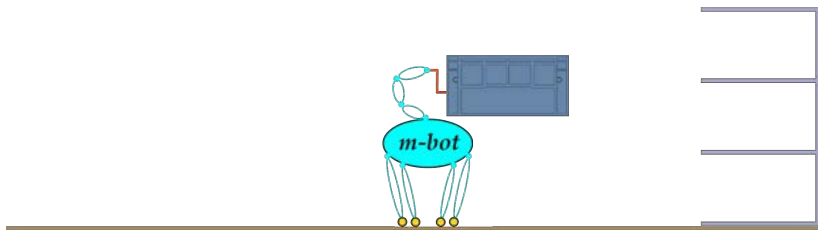
Étape 1 : Préhension de la caisse par l'outil de manipulation

Réalisation de la tâche en m-bot



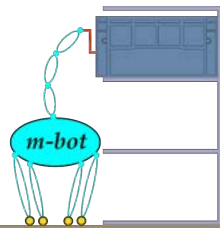
Étape 2 : Levage de la caisse

Réalisation de la tâche en m-bot



Étape 3 : Locomotion vers le rack

Réalisation de la tâche en m-bot

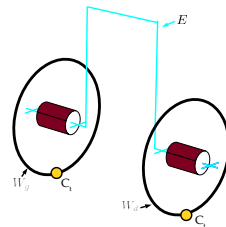


Étape 4 : Dépose de la caisse sur une étagère du rack

Structure cinématique des m-bots

Contraintes sur la partie locomotion

- **Emprise au sol** similaire à un opérateur
⇒ **Deux chaînes** cinématiques
- Locomotion efficace sur **terrain régulier**
⇒ **Roues** comme moyen de locomotion
- **Pas de franchissement** d'obstacles
⇒ **Pas de châssis** articulé

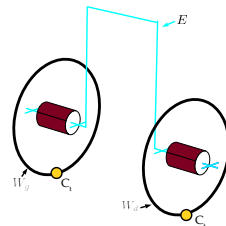


Partie locomotion du m-bot

Structure cinématique des m-bots

Contraintes sur la partie locomotion

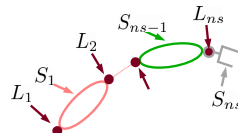
- **Emprise au sol** similaire à un opérateur
⇒ **Deux chaînes** cinématiques
- Locomotion efficace sur **terrain régulier**
⇒ **Roues** comme moyen de locomotion
- **Pas de franchissement** d'obstacles
⇒ **Pas de châssis** articulé



Partie locomotion du m-bot

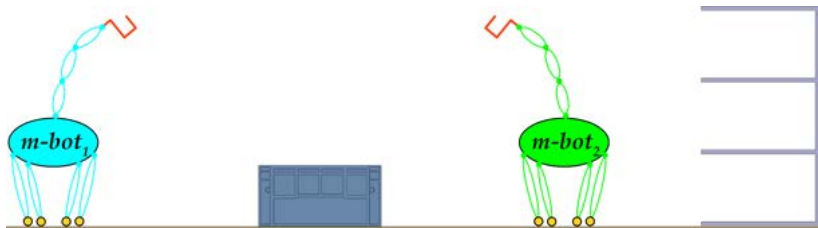
Contraintes sur la partie manipulation

- Manipulation de **caisse légère**
⇒ **Une seule** chaîne cinématique (bras opérationnel)



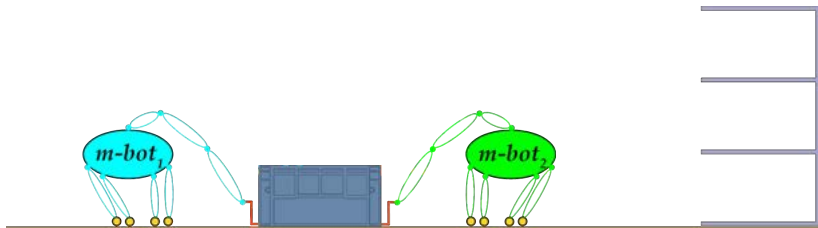
Partie manipulation du m-bot

Réalisation de la tâche en mode p-bot en co-manipulation



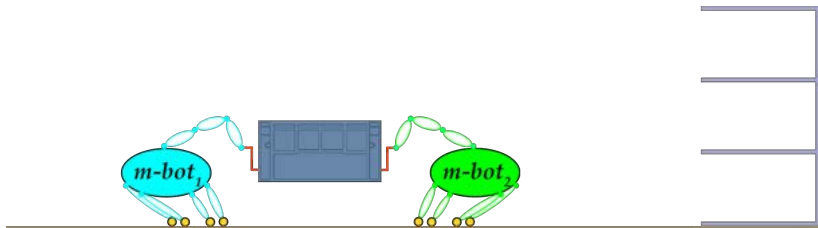
Étape 0 : Position initiale des deux m-bots

Réalisation de la tâche en mode p-bot en co-manipulation



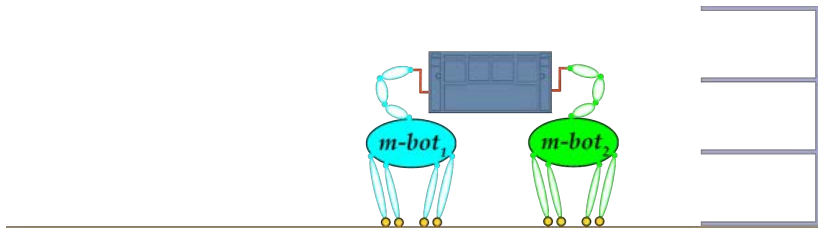
Étape 1 : Préhension de la caisse

Réalisation de la tâche en mode p-bot en co-manipulation



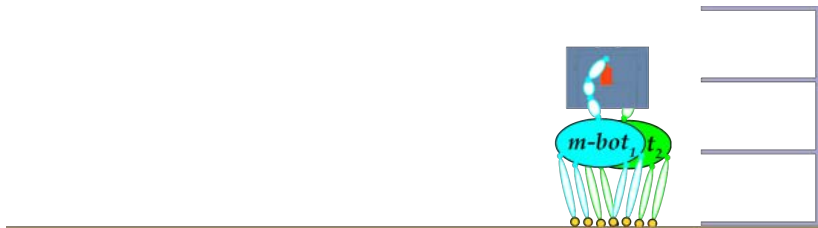
Étape 2 : Levage de la caisse

Réalisation de la tâche en mode p-bot en co-manipulation



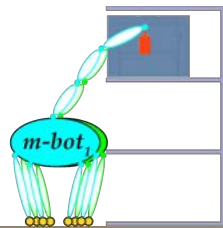
Étape 3 : Locomotion vers le rack

Réalisation de la tâche en mode p-bot en co-manipulation



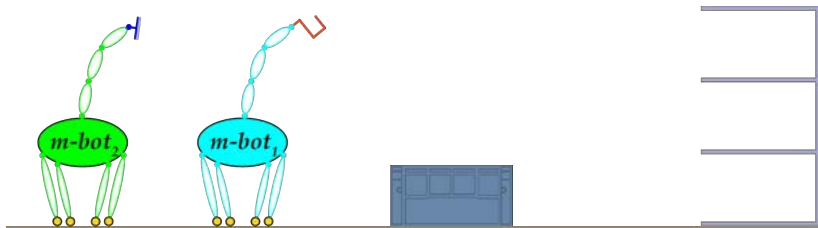
Étape 4 : Reconfiguration pour la dépose

Réalisation de la tâche en mode p-bot en co-manipulation



Étape 5 : Dépose de la caisse sur une étagère du rack

Réalisation de la tâche en mode p-bot en connexion



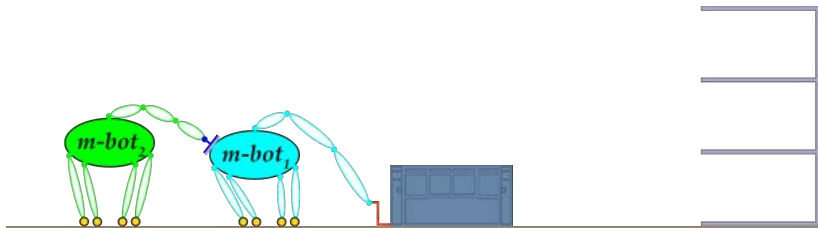
Étape 1 : Position initiale des deux m-bots

Réalisation de la tâche en mode p-bot en connexion



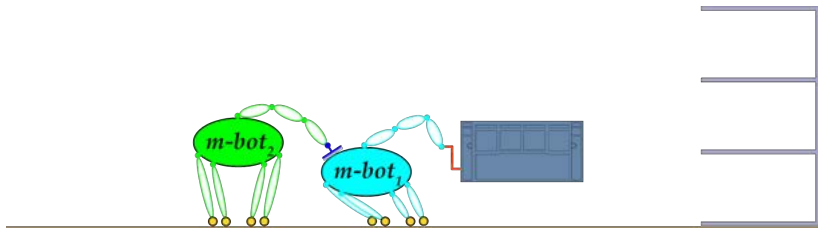
Étape 2 : Formation du p-bot

Réalisation de la tâche en mode p-bot en connexion



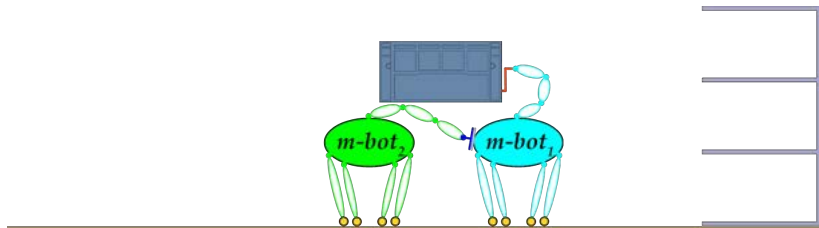
Étape 2 : Préhension de la caisse

Réalisation de la tâche en mode p-bot en connexion



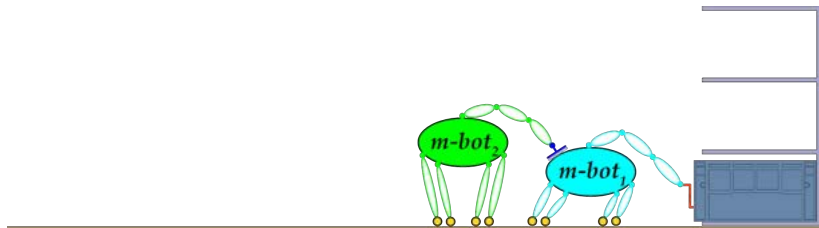
Étape 3 : Levage de la caisse

Réalisation de la tâche en mode p-bot en connexion



Étape 4 : Locomotion vers le rack

Réalisation de la tâche en mode p-bot en connexion

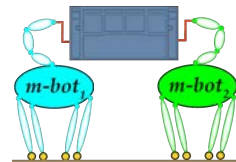


Étape 5 : Dépose de la caisse

Structure cinématique des p-bots

Contraintes sur le p-bot en co-manipulation

- **Économies** d'échelle et **modularité**
⇒ m-bots tous **identiques**
- Contraintes sur la partie **manipulation**
⇒ **m-bot₁** et **m-bot₂** équipés d'outils opérationnels
- Caisses comportant **2 poignées**
⇒ **2 m-bots** par p-bot

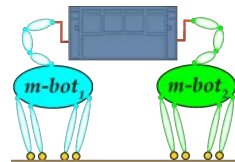


p-bot en co-manipulation

Structure cinématique des p-bots

Contraintes sur le p-bot en co-manipulation

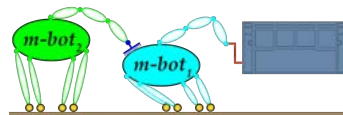
- **Économies** d'échelle et **modularité**
⇒ m-bots tous **identiques**
- Contraintes sur la partie **manipulation**
⇒ **m-bot₁** et **m-bot₂** équipés d'outils opérationnels
- Caisses comportant **2 poignées**
⇒ **2 m-bots** par p-bot



p-bot en co-manipulation

Contraintes sur le p-bot en connexion

- **Économies** d'échelle et **modularité**
⇒ m-bots tous **identiques**
- Contraintes sur la partie **manipulation**
⇒ **m-bot₁** avec outil opérationnel
⇒ **m-bot₂** avec outil de connexion
- Minimiser le nombre de **contacts au sol**
⇒ **2 m-bots** par p-bot



p-bot en connexion

Définition des paramètres structuraux (Gogu, [2008])

Connectivité S

Nombre de déplacements finis permis par le mécanisme entre l'effecteur et le bâti

$$0 < S < 6$$

Dimension de l'espace vectoriel des vitesses relatives entre l'effecteur (H) et le bâti (G)

$$S = \dim(R_{H/G})$$

$\Rightarrow S_m$: connectivité du m-bot

$\Rightarrow S_p$: connectivité du p-bot

Mobilité M

Nombre de coordonnées indépendantes définissant la configuration de la chaîne cinématique

$$M = \sum_i^p f_i - r$$

p : Nombre des liaisons dans le mécanisme

f_i : Mobilité de la $i^{\text{ème}}$ liaison du mécanisme

r : Nombre des paramètres qui perdent leur indépendance par fermeture de boucle

$\Rightarrow M_m$: mobilité du m-bot

$\Rightarrow M_p$: mobilité du p-bot

Définition des paramètres structuraux (Gogu, [2008])

Redondance T

Redondance structurelle : différence entre la dimension de l'espace articulaire et la dimension de l'espace opérationnel d'un mécanisme

$$T = M - S$$

$\Rightarrow T_m$: redondance du m-bot

$\Rightarrow T_p$: redondance du p-bot

Degré d'hyperstatisme N

Différence entre le nombre maximal de paramètres des liaisons qui peuvent perdre leur indépendance dans la boucle fermée, et le nombre de paramètres des liaisons qui perdent vraiment leur indépendance dans la boucle fermée

$$N = 6q - r$$

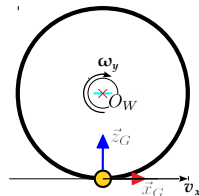
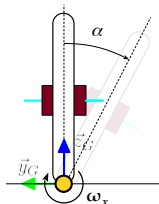
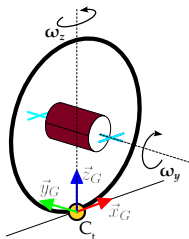
q : Nombre des boucles fermées dans la chaîne cinématique représentant le mécanisme

r : Nombre des paramètres qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée du mécanisme

$\Rightarrow N_m$: degré d'hyperstatisme du m-bot

$\Rightarrow N_p$: degré d'hyperstatisme du p-bot

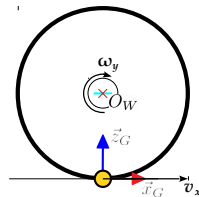
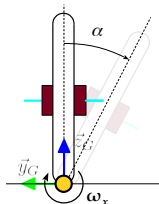
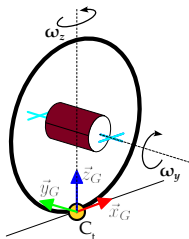
Description des mouvements d'une roue torique



- Mouvement d'avance (\mathbf{v}_x) : ✓
- Glissement latéral (\mathbf{v}_y) : ✗
- Décollage du sol (\mathbf{v}_z) : ✗

- Basculement latéral en carrossage (ω_x) : ✓
- Roulement de la roue (ω_y) : reliée à \mathbf{v}_x par **RSG**
RSG : condition de Roulement Sans Glissement
- Rotation verticale de braquage (ω_z) : ✓

Description des mouvements d'une roue torique



- Mouvement d'avance (\mathbf{v}_x) : ☒
- Glissement latéral (\mathbf{v}_y) : ☒
- Décollage du sol (\mathbf{v}_z) : ☒

- Basculement latéral en carrossage (ω_x) : ☒
- Roulement de la roue (ω_y) : reliée à \mathbf{v}_x par **RSG**
- RSG** : condition de Roulement Sans Glissement
- Rotation verticale de braquage (ω_z) : ☒

Description retenue

Base de l'espace vectoriel des vitesses relatives représentant le contact roue sol

$$(R_{W/G}) = (R_{C_t}) = (\mathbf{v}_x, \omega_x, \omega_z)$$

(R) : base de l'espace vectoriel des vitesses entre deux solides

W : roue, G : Sol, C_t : liaison représentant le contact roue-sol

m-bot avec deux contacts au sol

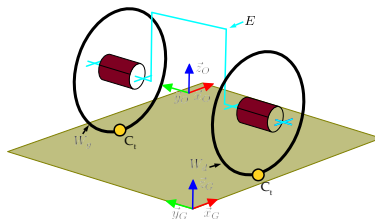
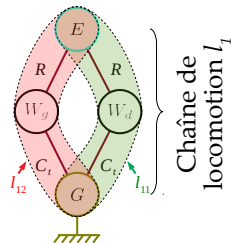


Diagramme structurel du m-bot

Chaîne de locomotion l_1 :

- Chaîne cinématique fermée



Graphe de liaison

m-bot avec deux contacts au sol

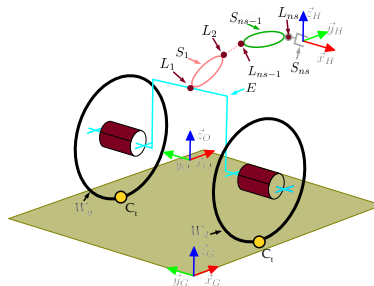


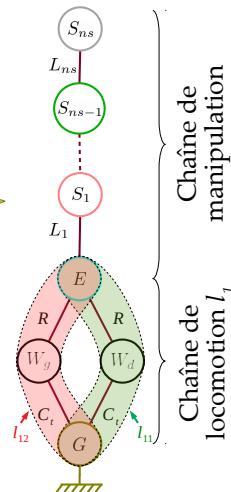
Diagramme structurel du m-bot

Chaîne de locomotion l_1 :

- Chaîne cinématique fermée

Chaîne de manipulation l_1 :

- Chaîne cinématique ouverte



Graphe de liaison

m-bot avec deux contacts au sol

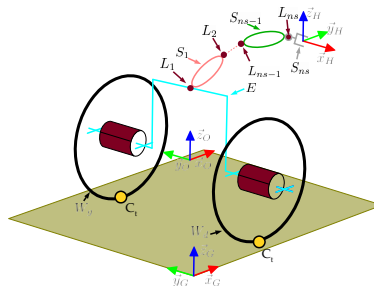


Diagramme structurel du m-bot

Chaîne de locomotion l_1 :

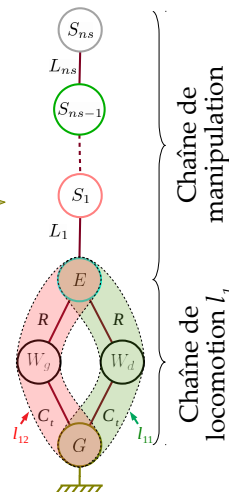
- Chaîne cinématique fermée

Chaîne de manipulation :

- Chaîne cinématique ouverte

Calcul des paramètres structuraux des m-bots

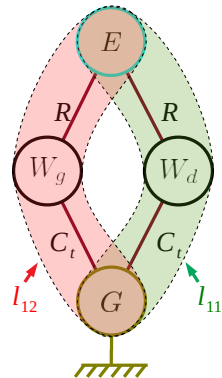
- 1ère étape : Calcul pour la partie locomotion
- 2ère étape : Calcul pour le m-bot



Graph de liaison

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour la partie locomotion

Structure de la chaîne de locomotion l_1 : 2 jambes simples l_{11} et l_{12}



Graphe de liaison de la locomotion l_1

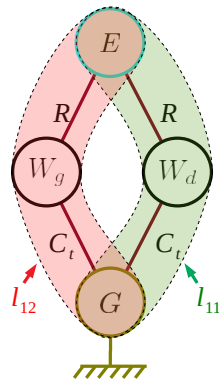
m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour la partie locomotion

Structure de la chaîne de locomotion l_1 : 2 jambes simples l_{11} et l_{12}

Connectivité S_{l_1} : $S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = \dim(R_{l_{11}} \cap R_{l_{12}})$

S'il existe plusieurs possibilités de choix des bases pour les espaces vectoriels $R_{l_{11}}$ et $R_{l_{12}}$, elles sont choisies afin d'obtenir la valeur minimale de la connectivité.

$$S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = 2$$



Graphe de liaison de la locomotion l_1

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour la partie locomotion

Structure de la chaîne de locomotion l_1 : 2 jambes simples l_{11} et l_{12}

Connectivité S_{l_1} : $S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = \dim(R_{l_{11}} \cap R_{l_{12}})$

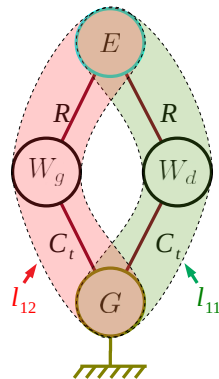
S'il existe plusieurs possibilités de choix des bases pour les espaces vectoriels $R_{l_{11}}$ et $R_{l_{12}}$, elles sont choisies afin d'obtenir la valeur minimale de la connectivité.

$$S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = 2$$

Mobilité M_{l_1} : $M_{l_1} = \sum_{i=1}^{p_{l_1}} f_i - r_{l_1}$

avec : $r_{l_1} = S_{l_{11}} + S_{l_{12}} - S_{l_1}$, et $S_{l_{11}} = S_{l_{12}} = 4 \Rightarrow r_{l_1} = 6$

$$M_{l_1} = 2$$



Graphe de liaison de la locomotion l_1

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour la partie locomotion

Structure de la chaîne de locomotion l_1 : 2 jambes simples l_{11} et l_{12}

Connectivité S_{l_1} : $S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = \dim(R_{l_{11}} \cap R_{l_{12}})$

S'il existe plusieurs possibilités de choix des bases pour les espaces vectoriels $R_{l_{11}}$ et $R_{l_{12}}$, elles sont choisies afin d'obtenir la valeur minimale de la connectivité.

$$S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = 2$$

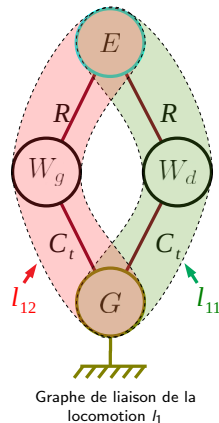
Mobilité M_{l_1} : $M_{l_1} = \sum_{i=1}^{p_{l_1}} f_i - r_{l_1}$

avec : $r_{l_1} = S_{l_{11}} + S_{l_{12}} - S_{l_1}$, et $S_{l_{11}} = S_{l_{12}} = 4 \Rightarrow r_{l_1} = 6$

$$M_{l_1} = 2$$

Redondance T_{l_1} : $T_{l_1} = M_{l_1} - S_{l_1}$

$$T_{l_1} = 0$$



m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour la partie locomotion

Structure de la chaîne de locomotion l_1 : 2 jambes simples l_{11} et l_{12}

Connectivité S_{l_1} : $S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = \dim(R_{l_{11}} \cap R_{l_{12}})$

S'il existe plusieurs possibilités de choix des bases pour les espaces vectoriels $R_{l_{11}}$ et $R_{l_{12}}$, elles sont choisies afin d'obtenir la valeur minimale de la connectivité.

$$S_{l_1} = \dim(R_{l_1}) = 2$$

Mobilité M_{l_1} : $M_{l_1} = \sum_{i=1}^{p_{l_1}} f_i - r_{l_1}$

avec : $r_{l_1} = S_{l_{11}} + S_{l_{12}} - S_{l_1}$, et $S_{l_{11}} = S_{l_{12}} = 4 \Rightarrow r_{l_1} = 6$

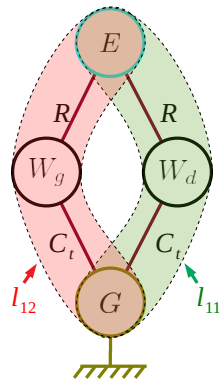
$$M_{l_1} = 2$$

Redondance T_{l_1} : $T_{l_1} = M_{l_1} - S_{l_1}$

$$T_{l_1} = 0$$

Degré d'hyperstatisme N_{l_1} : $N_{l_1} = 6q - r_{l_1}$

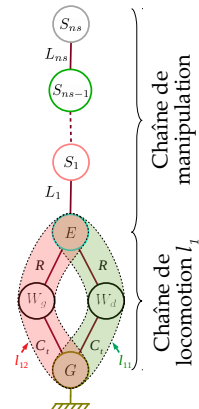
$$N_{l_1} = 0$$



Graphe de liaison de la locomotion l_1

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour le m-bot

Structure de la chaîne cinématique du m-bot : 1 jambe complexe



Graphe de liaison du m-bot

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour le m-bot

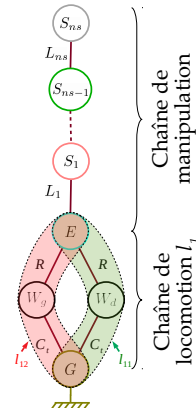
Structure de la chaîne cinématique du m-bot : 1 jambe complexe

Connectivité S_m : $S_m = \dim(R_m) = \dim(R_{H/G})$

- Structure cinématique ouverte $\Rightarrow S_m = \dim(R_{H_1} \cup R_{manip})$

- Connectivité composée : $S_m = S_{H_1} + S_{manip} - S_{com}$

$$S_m = 2 + S_{manip} - S_{com}$$



Graphe de liaison du m-bot

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour le m-bot

Structure de la chaîne cinématique du m-bot : 1 jambe complexe

Connectivité S_m : $S_m = \dim(R_m) = \dim(R_{H/G})$

- Structure cinématique ouverte $\Rightarrow S_m = \dim(R_{l_1} \cup R_{manip})$

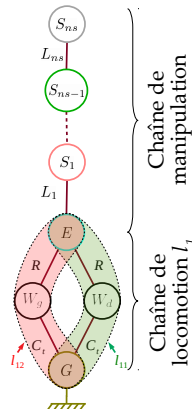
- Connectivité composée : $S_m = S_{l_1} + S_{manip} - S_{com}$

$$S_m = 2 + S_{manip} - S_{com}$$

Mobilité M_m : $M_{l_1} = \sum_{i=1}^{p_{l_1}} f_i - r_{l_1}$

- Structure cinématique ouverte $\Rightarrow M_m = M_{l_1} + M_{manip}$

$$M_{manip} = \sum_{i=1}^{p_{manip}} f_i \Rightarrow M_m = 2 + M_{manip}$$



Graphe de liaison du m-bot

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour le m-bot

Structure de la chaîne cinématique du m-bot : 1 jambe complexe

Connectivité S_m : $S_m = \dim(R_m) = \dim(R_{H/G})$

- Structure cinématique ouverte $\Rightarrow S_m = \dim(R_{l_1} \cup R_{manip})$

- Connectivité composée : $S_m = S_{l_1} + S_{manip} - S_{com}$

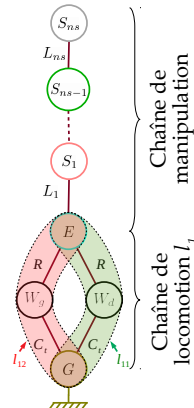
$$S_m = 2 + S_{manip} - S_{com}$$

Mobilité M_m : $M_{l_1} = \sum_{i=1}^{p_{l_1}} f_i - r_{l_1}$

- Structure cinématique ouverte $\Rightarrow M_m = M_{l_1} + M_{manip}$

$$M_{manip} = \sum_{i=1}^{p_{manip}} f_i \Rightarrow M_m = 2 + M_{manip}$$

Redondance T_m : $T_m = M_m - S_m$



Graphe de liaison du m-bot

m-bot avec deux contacts au sol - Calcul pour le m-bot

Structure de la chaîne cinématique du m-bot : 1 jambe complexe

Connectivité S_m : $S_m = \dim(R_m) = \dim(R_{H/G})$

- Structure cinématique ouverte $\Rightarrow S_m = \dim(R_{l_1} \cup R_{manip})$

- Connectivité composée : $S_m = S_{l_1} + S_{manip} - S_{com}$

$$S_m = 2 + S_{manip} - S_{com}$$

Mobilité M_m : $M_{l_1} = \sum_{i=1}^{p_{l_1}} f_i - r_{l_1}$

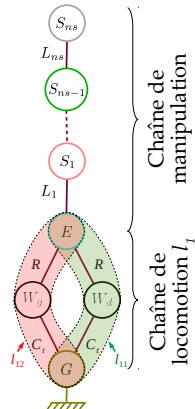
- Structure cinématique ouverte $\Rightarrow M_m = M_{l_1} + M_{manip}$

$$M_{manip} = \sum_{i=1}^{p_{manip}} f_i \Rightarrow M_m = 2 + M_{manip}$$

Redondance T_m : $T_m = M_m - S_m$

Degré d'hyperstatisme N_m : $N_m = N_{l_1}$

$$N_m = 0$$



Graphe de liaison du m-bot

p-bot en configuration co-manipulation de la charge



B

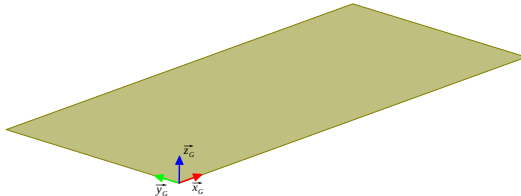


Diagramme structurel du p-bot en co-manipulation



Graphe de liaison

p-bot en configuration co-manipulation de la charge

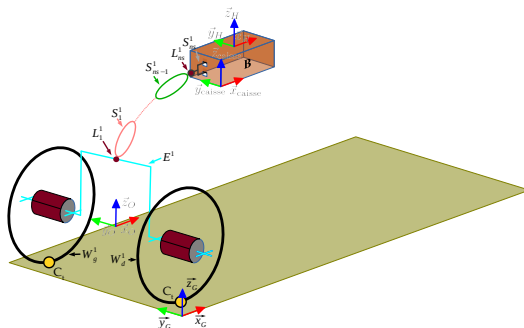
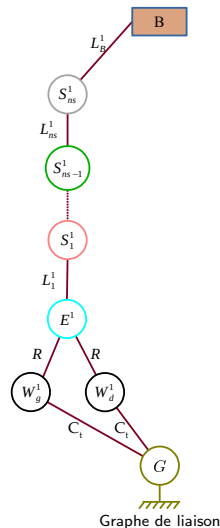


Diagramme structurel du p-bot en co-manipulation



Graphe de liaison

p-bot en configuration co-manipulation de la charge

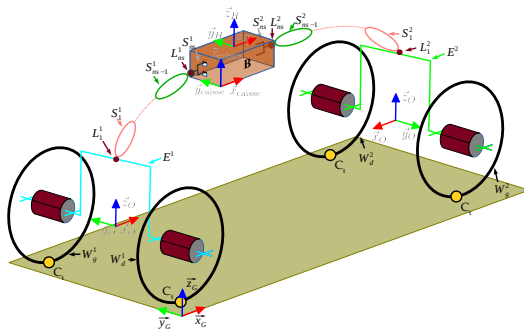
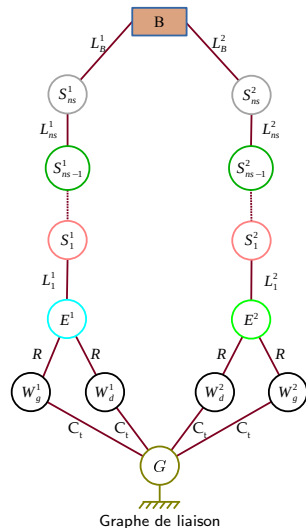


Diagramme structurel du p-bot en co-manipulation

Structure de la chaîne cinématique du p-bot : Fermée avec deux jambes complexes



p-bot en configuration co-manipulation de la charge

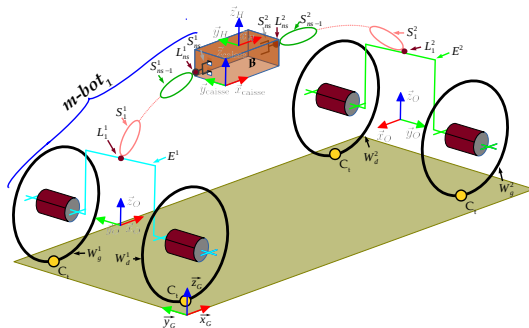
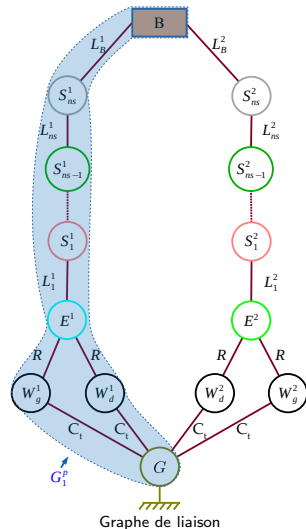


Diagramme structurel du p-bot en co-manipulation

Structure de la chaîne cinématique du p-bot :
Fermée avec deux jambes complexes G_1^p



Graphe de liaison

p-bot en configuration co-manipulation de la charge

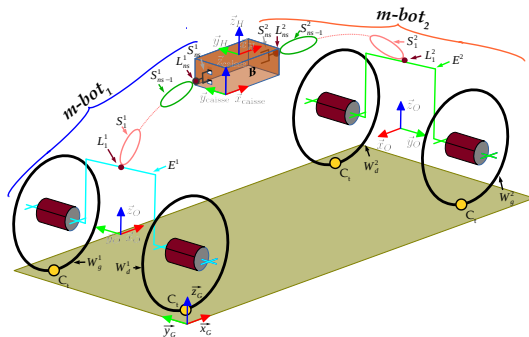
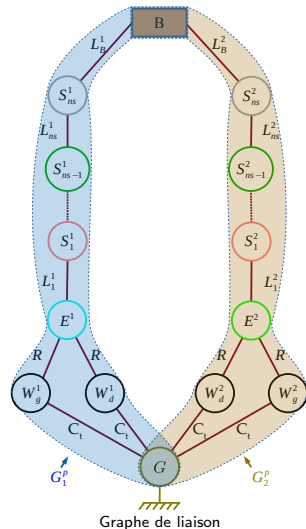


Diagramme structurel du p-bot en co-manipulation

Structure de la chaîne cinématique du p-bot :

Fermée avec deux jambes complexes G^p_1 et G^p_2

- Structure cinématique ressemblante à la locomotion l_1
- Utilisation des éléments déjà calculés pour les m-bots



Graphe de liaison

p-bot en configuration connexion

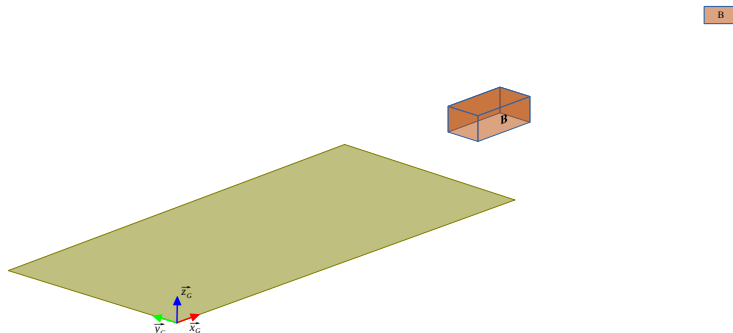


Diagramme structurel du p-bot en connexion



Graphe de liaison

p-bot en configuration connexion

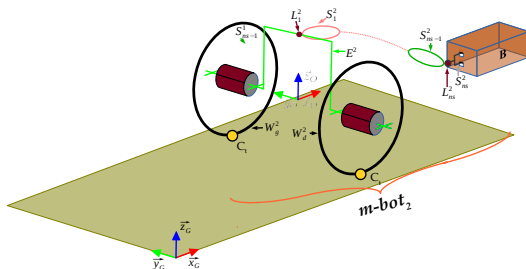
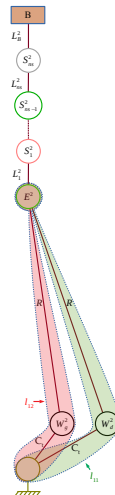


Diagramme structurel du p-bot en connexion



Graphe de liaison

p-bot en configuration connexion

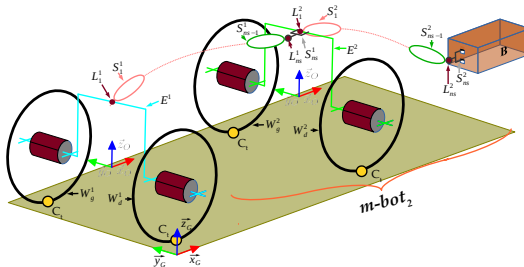
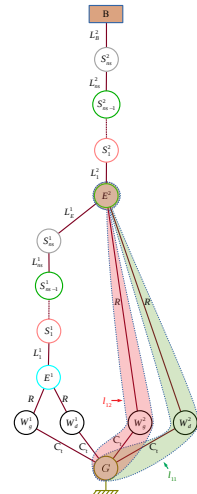


Diagramme structurel du p-bot en connexion



Graphe de liaison

p-bot en configuration connexion

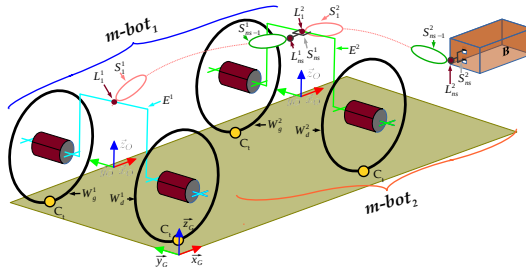
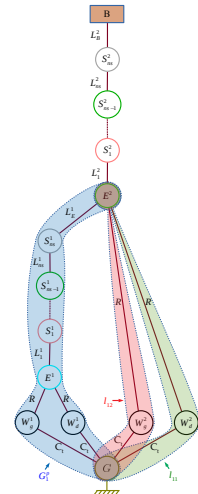


Diagramme structurel du p-bot en connexion



Graphe de liaison

p-bot en configuration connexion

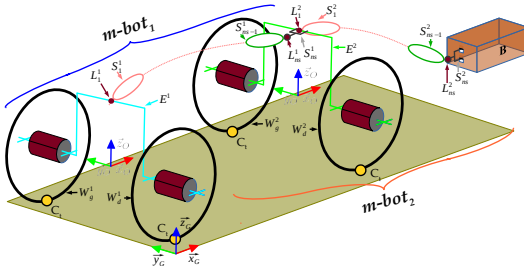
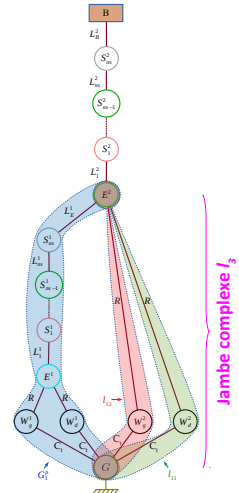


Diagramme structurel du p-bot en connexion



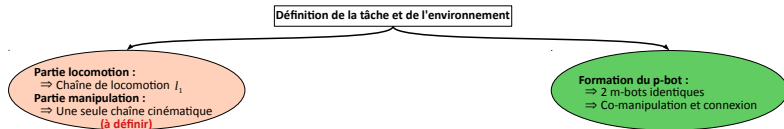
Graphe de liaison

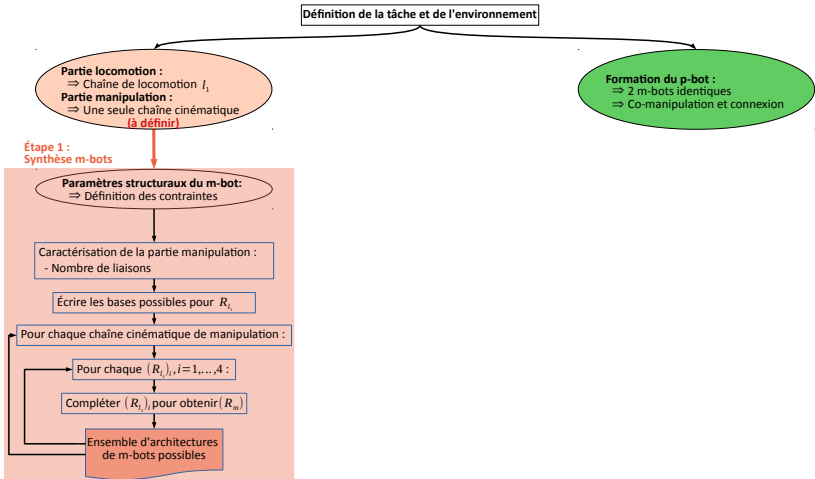
Structure de la chaîne cinématique du p-bot :

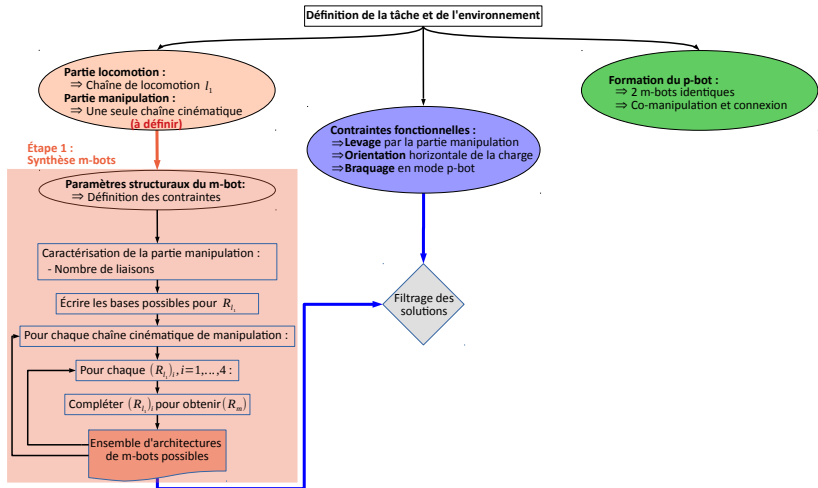
Ouverte avec une jambe complexe I_3

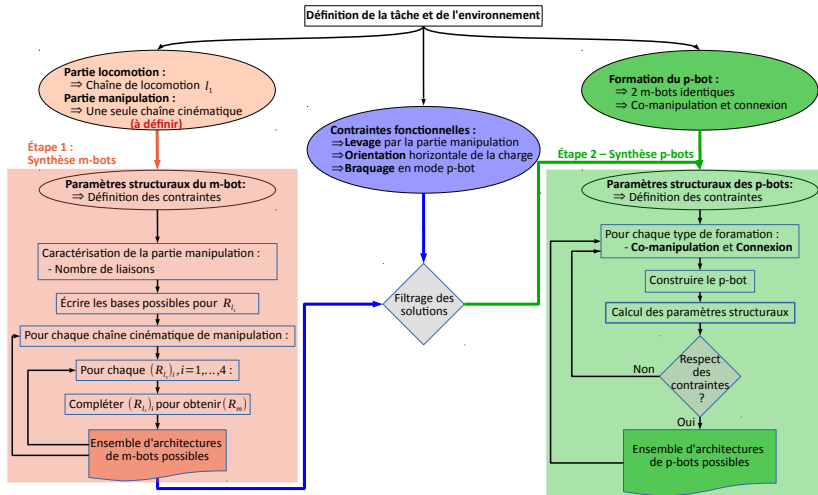
- Structure cinématique ressemblante au m-bot
- Utilisation des éléments déjà calculés pour les m-bots

- 1 Introduction
- 2 Système robotique coopératif et analyse structurale
- 3 Synthèse structurale des manipulateurs mobiles
 - Démarche de synthèse structurale
 - Synthèse structurale des m-bots
 - Synthèse structurale des p-bots
- 4 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles
- 5 Conclusions et perspectives









Vitesses nécessaires à la réalisation de la tâche \Rightarrow Locomotion dans le plan $(\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \omega_z)$
 \Rightarrow Levage de la charge (\mathbf{v}_z)

Paramètres structuraux désirés pour le m-bot

- **Connectivité désirée** S_m^d : Capacité à la réalisation de la tâche $\Rightarrow S_m^d \geq 4$
- **Redondance désirée** T_m^d : Objectif de légèreté et de rigidité $\Rightarrow T_m^d = 0$
- **Mobilité désirée** M_m^d : Déduite par la relation entre S_m et $T_m \Rightarrow M_m^d = S_m$
- **Degré d'hyperstatisme désiré** N_m^d : Contact constant au sol $\Rightarrow N_m^d = 0$

Vitesses nécessaires à la réalisation de la tâche \Rightarrow Locomotion dans le plan ($\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \omega_z$)
 \Rightarrow Levage de la charge (\mathbf{v}_z)

Paramètres structuraux désirés pour le m-bot

- **Connectivité désirée** $S_m^d \geq 4$
- **Redondance désirée** $T_m^d = 0$
- **Mobilité désirée** $M_m^d = S_m$
- **Degré d'hyperstatisme désiré** $N_m^d = 0$

Objectif :

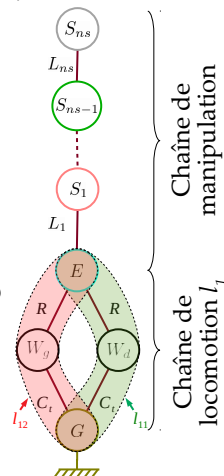
Obtenir un m-bot de connectivité entre $S_m^{\min} = 4$ et $S_m^{\max} = 6$

- Analyse structurale $\Rightarrow S_{manip} = S_m - S_{l_1} + S_{com}$
- Partie locomotion $\Rightarrow S_{l_1} = 2$
- Redondance nulle $\Rightarrow S_{com} = 0$

$$2 \leq S_{manip} \leq 4$$

Caractéristiques des liaisons

Prismatiques ou rotoïdes



Graphe de liaison d'un m-bot

Partir des bases possible de la locomotion l_1 , $(R_{l_1})_i, i = 1, \dots, 4$, pour atteindre (R_m) :

$$(R_{l_1})_1 = (\mathbf{v}_x, \omega_y)$$

$$(R_{l_1})_2 = (\mathbf{v}_x, \omega_z)$$

$$(R_{l_1})_3 = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_z)$$

$$(R_{l_1})_4 = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y)$$

Partir des bases possible de la locomotion l_1 , $(R_{l_1})_i, i = 1, \dots, 4$, pour atteindre (R_m) :

$$(R_{l_1})_1 = (\mathbf{v}_x, \omega_y)$$

$$(R_{l_1})_2 = (\mathbf{v}_x, \omega_z)$$

$$(R_{l_1})_3 = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_z)$$

$$(R_{l_1})_4 = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y)$$

Manipulateurs à 2 liaisons

$$S_{manip} = 2$$

Une base possible :

$$\Rightarrow (R_m^4) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_z)$$

► Nombre de solutions : 11

Manipulateurs à 3 liaisons

$$S_{manip} = 3$$

Deux bases possibles :

$$\Rightarrow (R_m^{5a}) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_x, \omega_z)$$

$$\Rightarrow (R_m^{5b}) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_y, \omega_z)$$

► Nombre de solutions : 27

Manipulateurs à 4 liaisons

$$S_{manip} = 4$$

Une seule base possible :

$$\Rightarrow (R_m^6) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

► Nombre de solutions : 17

► Nombre total de solutions : 55

Partir des bases possible de la locomotion l_1 , $(R_{l_1})_i, i = 1, \dots, 4$, pour atteindre (R_m) :

$$(R_{l_1})_1 = (\mathbf{v}_x, \omega_y)$$

$$(R_{l_1})_2 = (\mathbf{v}_x, \omega_z)$$

$$(R_{l_1})_3 = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_z)$$

$$(R_{l_1})_4 = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y)$$

Manipulateurs à 2 liaisons

$$S_{manip} = 2$$

Une base possible :

$$\Rightarrow (R_m^4) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_z)$$

► Nombre de solutions : 11

Manipulateurs à 3 liaisons

$$S_{manip} = 3$$

Deux bases possibles :

$$\Rightarrow (R_m^{5a}) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_x, \omega_z)$$

$$\Rightarrow (R_m^{5b}) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_y, \omega_z)$$

► Nombre de solutions : 27

Manipulateurs à 4 liaisons

$$S_{manip} = 4$$

Une seule base possible :

$$\Rightarrow (R_m^6) = (\mathbf{v}_x, \mathbf{v}_y, \mathbf{v}_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$$

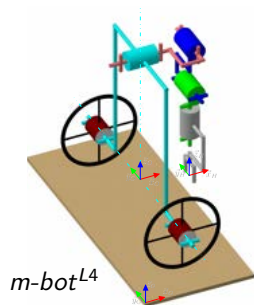
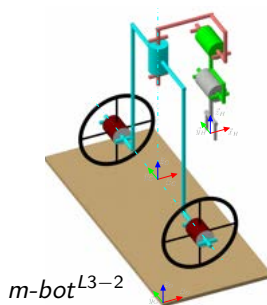
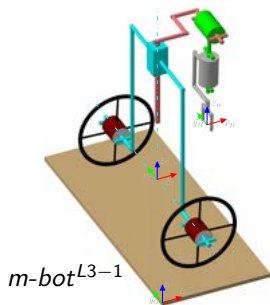
► Nombre de solutions : 17

► Nombre total de solutions : 55

Filtrage des solutions des m-bots - partie manipulation

- Règle 1 : **Levage** de la caisse → Levage par la chaîne cinématique de manipulation
 \Rightarrow **Solutions retenues** : contenant \mathbf{v}_z ou ω_y
- Règle 2 : **Orientation** de la caisse → Manipulation dans le plan sagittal
 \Rightarrow **Solutions retenues** : contenant \mathbf{v}_z ou ω_y
- Règle 3 : **Braquage** en mode p-bot → Assurer un braquage d'axe perpendiculaire au sol
 \Rightarrow **Solutions retenues** : pouvoir positionner une liaison pivot en z

Solutions retenues après application des règles de sélection



| | $m\text{-bot}^{L3-1}$ | $m\text{-bot}^{L3-2}$ | $m\text{-bot}^{L4}$ |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|
| Connectivité S_m | 5 | 5 | 6 |
| Mobilité M_m | 5 | 5 | 6 |
| Redondance T_m | 0 | 0 | 0 |
| Degré d'hyperstatisme N_m | 0 | 0 | 0 |

► Toutes les architectures respectent les contraintes

Synthèse structurale des p-bots

Paramètres structuraux désirés pour le p-bot

- **Connectivité désirée** S_p^d : Capacité à la réalisation de la tâche $\Rightarrow S_p^d \geq 4$
- **Redondance désirée** T_p^d : Objectif de légèreté et de rigidité $\Rightarrow T_p^d \rightarrow 0$
- **Mobilité désirée** M_p^d : Dédue par la relation entre S_p et $T_p \Rightarrow M_p^d \rightarrow S_p$
- **Degré d'hyperstatisme désiré** N_p^d : Contact constant au sol $\Rightarrow N_p^d \rightarrow 0$

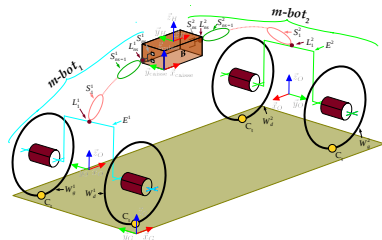


Diagramme structurel du p-bot en co-manipulation

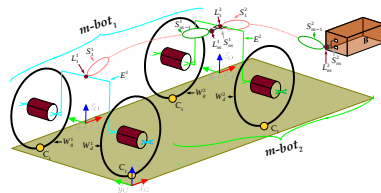


Diagramme structurel du p-bot en connexion

Vérification des paramètres structuraux des p-bots

Paramètres structuraux des p-bots en co-manipulation :

| | $p\text{-bot}_{\text{comanip}}^{L3-1}$ | $p\text{-bot}_{\text{comanip}}^{L3-2}$ | $p\text{-bot}_{\text{comanip}}^{L4}$ |
|--|--|--|--------------------------------------|
| Connectivité $S_{p\text{-comanip}}$ | 5 | 5 | 6 |
| Mobilité $M_{p\text{-comanip}}$ | 5 | 5 | 6 |
| Redondance $T_{p\text{-comanip}}$ | 0 | 0 | 0 |
| Degré d'hyperstatisme $N_{p\text{-comanip}}$ | 1 | 1 | 0 |

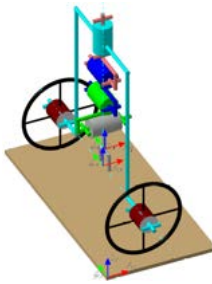
Paramètres structuraux des p-bots en connexion :

| | $p\text{-bot}_{\text{connex}}^{L3-1}$ | $p\text{-bot}_{\text{connex}}^{L3-2}$ | $p\text{-bot}_{\text{connex}}^{L4}$ |
|---|---------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Connectivité $S_{p\text{-connex}}$ | 5 | 5 | 6 |
| Mobilité $M_{p\text{-connex}}$ | 5 | 5 | 6 |
| Redondance $T_{p\text{-connex}}$ | 0 | 0 | 0 |
| Degré d'hyperstatisme $N_{p\text{-connex}}$ | 1 | 1 | 0 |

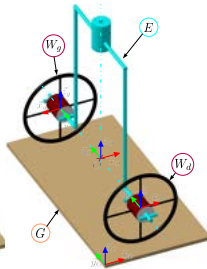
Toutes les architectures respectent les contraintes

► Préférence pour l'architecture m-bot^{L4}

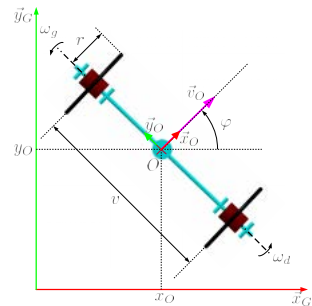
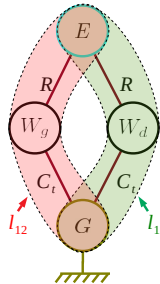
- 1 Introduction
- 2 Système robotique coopératif et analyse structurale
- 3 Synthèse structurale des manipulateurs mobiles
- 4 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles
 - Modélisation des MMs
 - Synthèse dimensionnelle des MMs
 - Lois de commande
- 5 Conclusions et perspectives



Manipulateur mobile unitaire
 retenu : m-bot^{L4}



Chaîne cinématique de locomotion



Vue de dessus de la chaîne
 cinématique de locomotion

Modélisation de la chaîne cinématique de locomotion

Modélisation cinématique avec condition de roulement sans glissement

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_O \\ \dot{y}_O \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \varphi & \frac{r}{2} \cos \varphi \\ \frac{r}{2} \sin \varphi & -\frac{r}{2} \sin \varphi \\ \frac{r}{v} & -\frac{r}{v} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\omega}_d \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix}$$

Modélisation de la chaîne cinématique manipulation

Paramétrage Denavit-Hartenberg

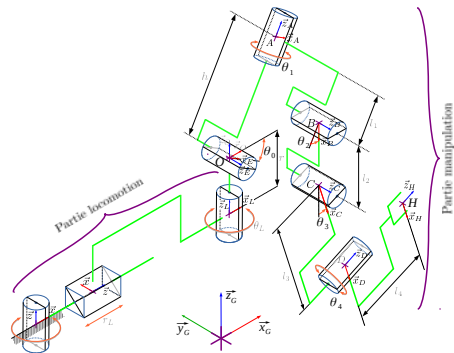
| Point | i | σ_i | α_i | d_i | θ_i | r_i |
|-------|-----|------------|------------|-------|------------|-------|
| O | 1 | 0 | $+\pi/2$ | 0 | θ_0 | 0 |
| A | 2 | 0 | $-\pi/2$ | 0 | θ_1 | h |
| B | 3 | 0 | $+\pi/2$ | l_1 | θ_2 | 0 |
| C | 4 | 0 | 0 | l_2 | θ_3 | 0 |
| D | 5 | 0 | $-\pi/2$ | l_3 | θ_4 | l_4 |

Vecteur des coordonnées opérationnelles par rapport au point O :

$$X_H = [x_H \ y_H \ z_H \ \beta_y \ \beta_z]^T$$

Vecteur des coordonnées articulaires de la partie manipulation :

$$\Theta_M = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$$



Représentation cinématique du m-bot

Modélisation géométrique

Modèle géométrique direct : $X_H = f_{MGD}(\Theta_M)$

Modèle géométrique inverse : $\Theta_M = f_{MGI}(X_H)$

Modélisation cinématique

$$\dot{X}_H = J(\Theta) \dot{\Theta}_M$$

Modélisation de la chaîne cinématique manipulation

Paramétrage Denavit-Hartenberg

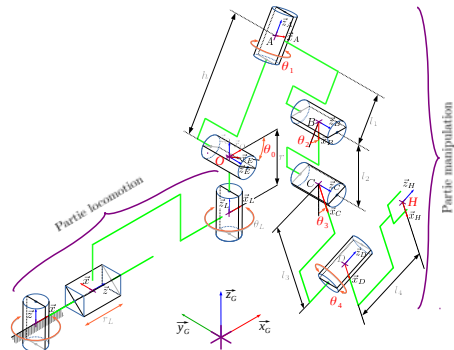
| Point | i | σ_i | α_i | d_i | θ_i | r_i |
|-------|-----|------------|------------|-------|------------|-------|
| O | 1 | 0 | $+\pi/2$ | 0 | θ_0 | 0 |
| A | 2 | 0 | $-\pi/2$ | 0 | θ_1 | h |
| B | 3 | 0 | $+\pi/2$ | l_1 | θ_2 | 0 |
| C | 4 | 0 | 0 | l_2 | θ_3 | 0 |
| D | 5 | 0 | $-\pi/2$ | l_3 | θ_4 | l_4 |

Vecteur des coordonnées opérationnelles par rapport au point O :

$$X_H = [x_H \ y_H \ z_H \ \beta_y \ \beta_z]^T$$

Vecteur des coordonnées articulaires de la partie manipulation :

$$\Theta_M = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4]^T$$



Représentation cinématique du m-bot

Modélisation géométrique

Modèle géométrique direct : $X_H = f_{MGD}(\Theta_M)$

Modèle géométrique inverse : $\Theta_M = f_{MGI}(X_H)$

Modélisation cinématique

$$\dot{X}_H = J(\Theta)\dot{\Theta}_M$$

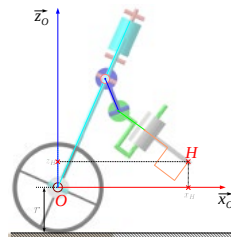
Modélisation simplifiée des manipulateurs mobiles

Contraintes sur le m-bot

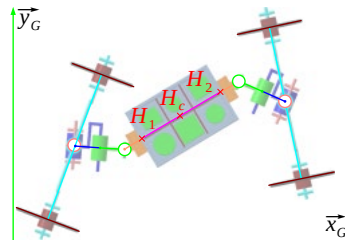
- Rotation dans le **plan du sol**
 \Rightarrow Assurée par la **partie locomotion**
- Manipulation dans le **plan sagittal**
 \Rightarrow **Blocage** des liaisons θ_1 et θ_4

Contraintes sur le p-bot en co-manipulation

- Réalisation de la tâche en **deux phases** :
 - 1- **Levage** dans le plan sagittal
 - 2- **Orientation** des m-bots dans le plan du sol
- Capacité de **rotation dans le plan du sol**
 $\Rightarrow \theta_0 = 0$ et $\theta_H = 0$
- Condition de **maintien horizontal de la charge**
 $\Rightarrow \theta_2 + \theta_3 = \frac{\pi}{2}$



Vue de côté du m-bot



Modélisation géométrique du p-bot

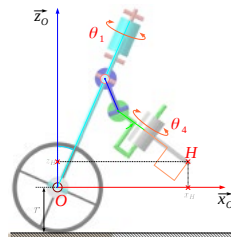
Modélisation simplifiée des manipulateurs mobiles

Contraintes sur le m-bot

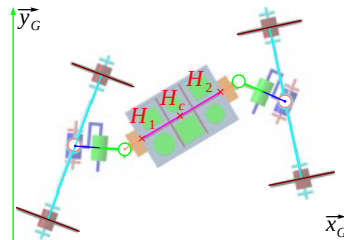
- Rotation dans le **plan du sol**
 \Rightarrow Assurée par la **partie locomotion**
- Manipulation dans le **plan sagittal**
 \Rightarrow **Blocage** des liaisons θ_1 et θ_4

Contraintes sur le p-bot en co-manipulation

- Réalisation de la tâche en **deux phases** :
 - 1- **Levage** dans le plan sagittal
 - 2- **Orientation** des m-bots dans le plan du sol
- Capacité de **rotation dans le plan du sol**
 $\Rightarrow \theta_0 = 0$ et $\theta_H = 0$
- Condition de **maintien horizontal de la charge**
 $\Rightarrow \theta_2 + \theta_3 = \frac{\pi}{2}$



Vue de côté du m-bot



Modélisation géométrique du p-bot

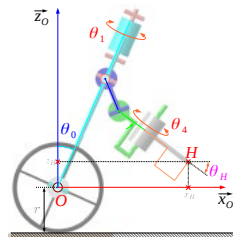
Modélisation simplifiée des manipulateurs mobiles

Contraintes sur le m-bot

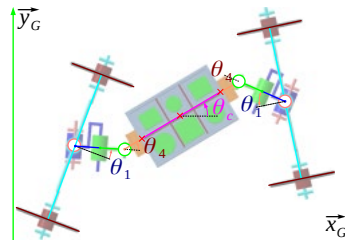
- Rotation dans le **plan du sol**
 \Rightarrow Assurée par la **partie locomotion**
- Manipulation dans le **plan sagittal**
 \Rightarrow **Blocage** des liaisons θ_1 et θ_4

Contraintes sur le p-bot en co-manipulation

- Réalisation de la tâche en **deux phases** :
 - 1- **Levage** dans le plan sagittal
 - 2- **Orientation** des m-bots dans le plan du sol
- Capacité de **rotation dans le plan du sol**
 $\Rightarrow \theta_0 = 0$ et $\theta_H = 0$
- Condition de **maintien horizontal de la charge**
 $\Rightarrow \theta_2 + \theta_3 = \frac{\pi}{2}$



Vue de côté du m-bot



Modélisation géométrique du p-bot

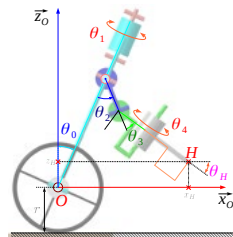
Modélisation simplifiée des manipulateurs mobiles

Contraintes sur le m-bot

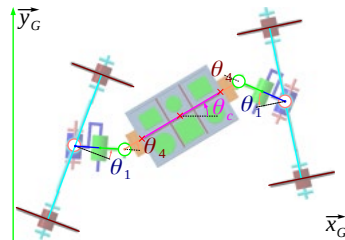
- Rotation dans le **plan du sol**
 \Rightarrow Assurée par la **partie locomotion**
- Manipulation dans le **plan sagittal**
 \Rightarrow **Blocage** des liaisons θ_1 et θ_4

Contraintes sur le p-bot en co-manipulation

- Réalisation de la tâche en **deux phases** :
 - 1- **Levage** dans le plan sagittal
 - 2- **Orientation** des m-bots dans le plan du sol
- Capacité de **rotation dans le plan du sol**
 $\Rightarrow \theta_0 = 0$ et $\theta_H = 0$
- Condition de **maintien horizontal de la charge**
 $\Rightarrow \theta_2 + \theta_3 = \frac{\pi}{2}$



Vue de côté du m-bot

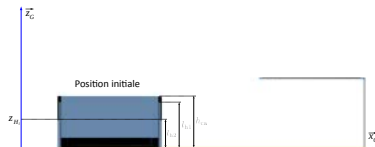


Modélisation géométrique du p-bot

Objectif : Réaliser un démonstrateur à petite échelle

Contraintes sur le m-bot

- Pouvoir **prendre la caisse** au sol
⇒ Définition de z_{H_l}
- Pouvoir **déposer la caisse** sur l'étagère
⇒ Définition de z_{H_d}
- **Enjamber** la caisse
⇒ $v > l_{caisse}$ et $h > h_{caisse}$

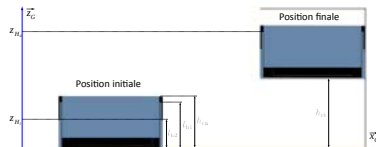


Vue de côté de la réalisation de la tâche

Objectif : Réaliser un démonstrateur à petite échelle

Contraintes sur le m-bot

- Pouvoir **prendre la caisse** au sol
⇒ Définition de z_{H_l}
- Pouvoir **déposer la caisse** sur l'étagère
⇒ Définition de z_{H_d}
- **Enjamber** la caisse
⇒ $v > l_{caisse}$ et $h > h_{caisse}$

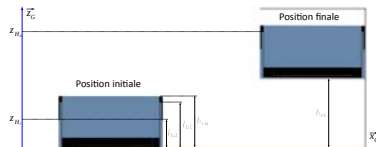


Vue de côté de la réalisation de la tâche

Objectif : Réaliser un démonstrateur à petite échelle

Contraintes sur le m-bot

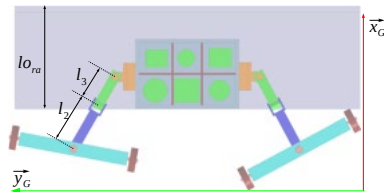
- Pouvoir **prendre la caisse** au sol
⇒ Définition de z_{H_l}
- Pouvoir **déposer la caisse** sur l'étagère
⇒ Définition de z_{H_d}
- **Enjamber** la caisse
⇒ $v > l_{caisse}$ et $h > h_{caisse}$



Vue de côté de la réalisation de la tâche

Contraintes sur le p-bot en co-manipulation

- Pouvoir **déposer la caisse** sur l'étagère
⇒ Relation entre l_{ra} et l_2, l_3



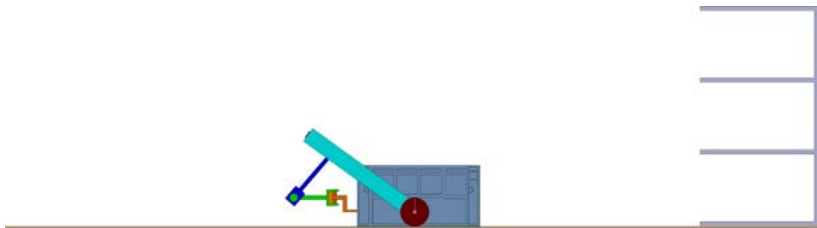
Vue de dessus du p-bot en co-manipulation

Réalisation de la tâche en m-bot



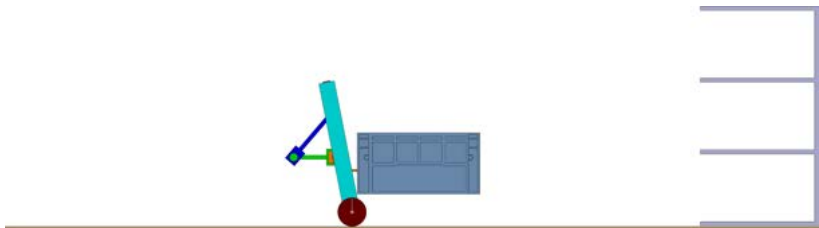
Étape 0 : Position initiale du m-bot face à la caisse

Réalisation de la tâche en m-bot



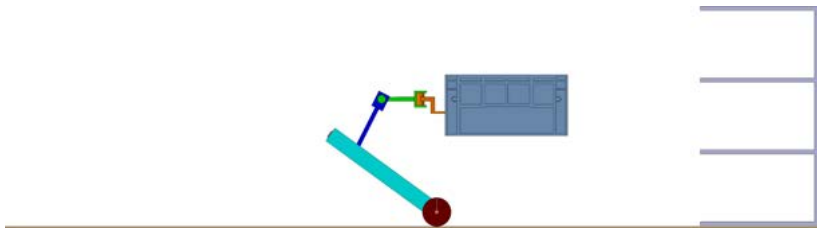
Étape 1 : Préhension de la caisse par l'outil de manipulation

Réalisation de la tâche en m-bot



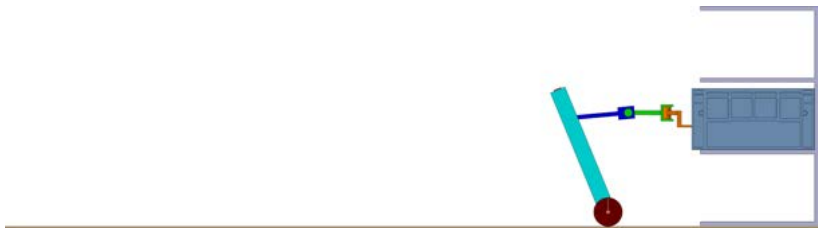
Étape 2 : Levage de la caisse

Réalisation de la tâche en m-bot



Étape 3 : Locomotion vers le rack

Réalisation de la tâche en m-bot

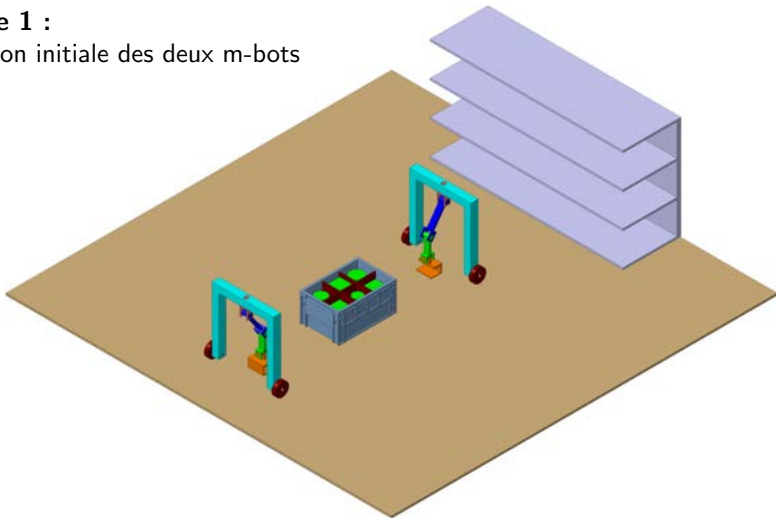


Étape 4 : Dépose de la caisse sur une étagère du rack

Réalisation de la tâche en p-bot

Étape 1 :

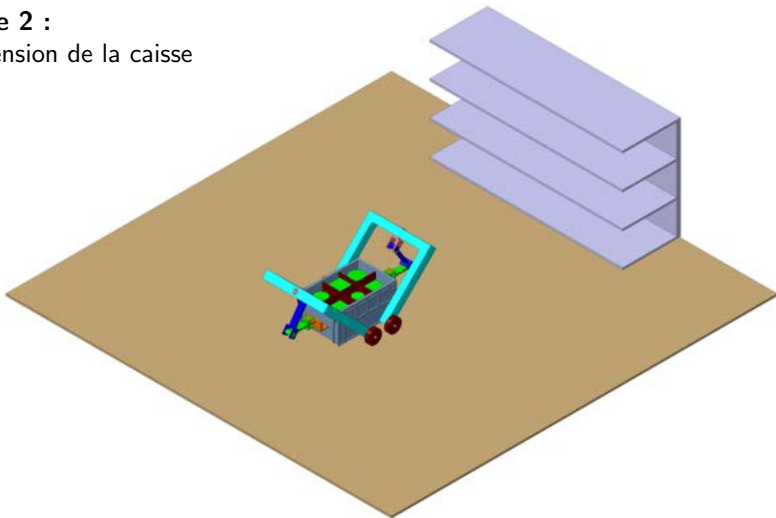
Position initiale des deux m-bots



Réalisation de la tâche en p-bot

Étape 2 :

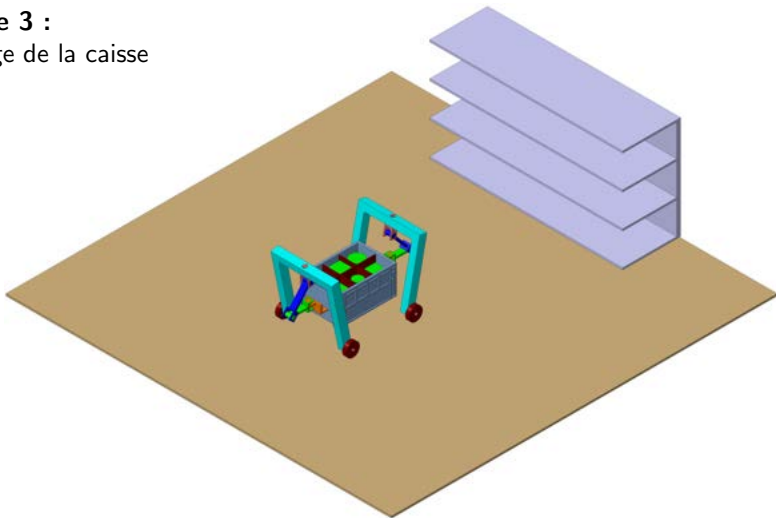
Préhension de la caisse



Réalisation de la tâche en p-bot

Étape 3 :

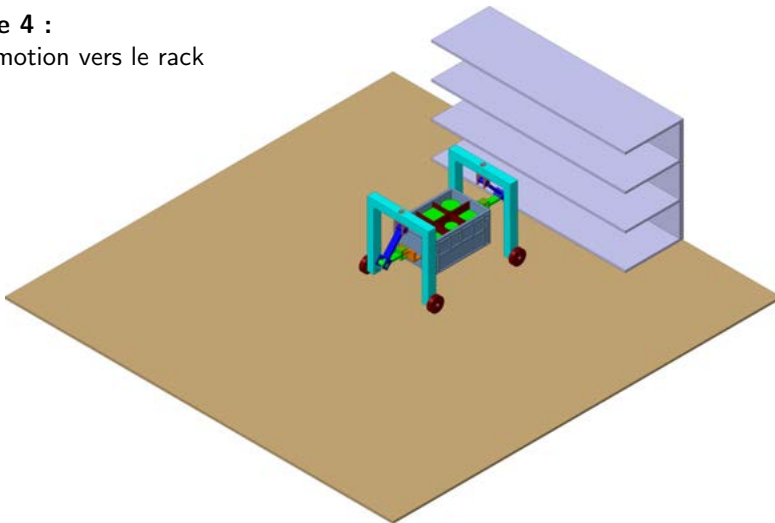
Levage de la caisse



Réalisation de la tâche en p-bot

Étape 4 :

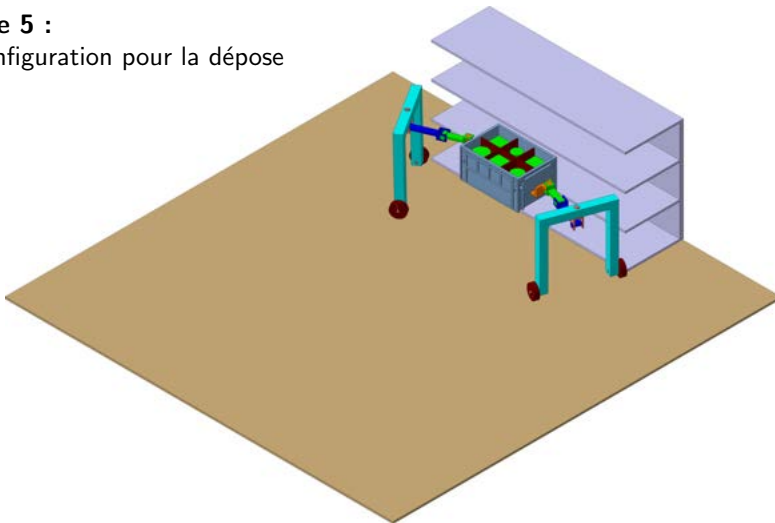
Locomotion vers le rack



Réalisation de la tâche en p-bot

Étape 5 :

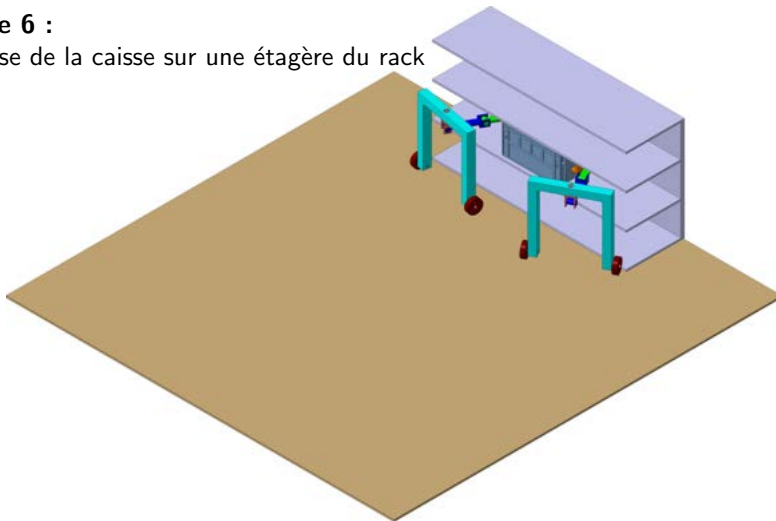
Reconfiguration pour la dépose



Réalisation de la tâche en p-bot

Étape 6 :

Dépose de la caisse sur une étagère du rack



Objectif 1 : locomotion du m-bot à 3 contacts au sol

- Partie **locomotion** :

⇒ Commande cinématique (unicycle)

- Partie **manipulation** :

⇒ Commande en position (PID)

$$\Gamma = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon + K_d \cdot \dot{\varepsilon}$$

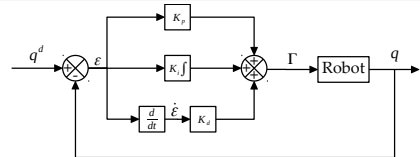


Schéma-bloc de la commande en position articulaire

Objectif 1 : locomotion du m-bot à 3 contacts au sol

- Partie **locomotion** :
 \Rightarrow Commande cinématique (unicycle)
 - Partie **manipulation** :
 \Rightarrow Commande en position (PID)
- $$\Gamma = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon + K_d \cdot \dot{\varepsilon}$$

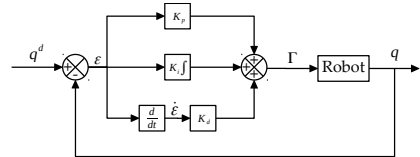


Schéma-bloc de la commande en position articulaire

Validation de la loi de commande :



Validation de la phase d'approche en m-bot : position initiale

Objectif 1 : locomotion du m-bot à 3 contacts au sol

- Partie **locomotion** :

⇒ Commande cinématique (unicycle)

- Partie **manipulation** :

⇒ Commande en position (PID)

$$\Gamma = K_p \cdot \varepsilon + K_i \cdot \int \varepsilon + K_d \cdot \dot{\varepsilon}$$

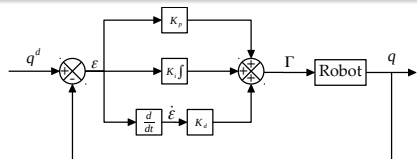
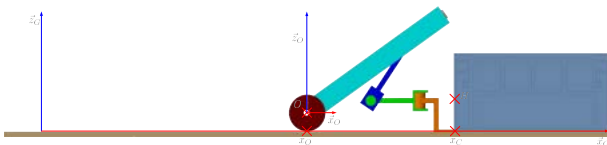


Schéma-bloc de la commande en position articulaire

Validation de la loi de commande :



Validation de la phase d'approche en m-bot : position finale

Objectif 2 : levage de la caisse en co-manipulation

- Partie locomotion :
⇒ Roues bloquées
- Partie manipulation :
⇒ Loi de commande hybride force-position.

Se basant sur le modèle statique $\Gamma = J_H^T \cdot F$:

$$F = F_1 + F_2 = S \cdot CP + S' \cdot CF$$

avec :

S et S' : matrices de sélection

CP : loi de commande en position (PID)

CF : loi de commande en effort ($CF = F_H^d + K_i \int \varepsilon_F$)

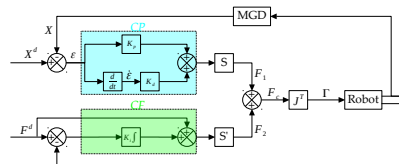


Schéma-bloc de la commande hybride force-position

Objectif 2 : levage de la caisse en co-manipulation

- Partie locomotion :
⇒ Roues bloquées
- Partie manipulation :
⇒ Loi de commande hybride force-position.

Se basant sur le modèle statique $\Gamma = J_H^T \cdot F$:

$$F = F_1 + F_2 = S \cdot CP + S' \cdot CF$$

avec :

S et S' : matrices de sélection

CP : loi de commande en position (PID)

CF : loi de commande en effort ($CF = F_H^d + K_i \int \varepsilon_F$)

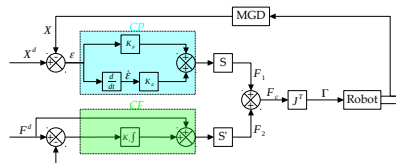
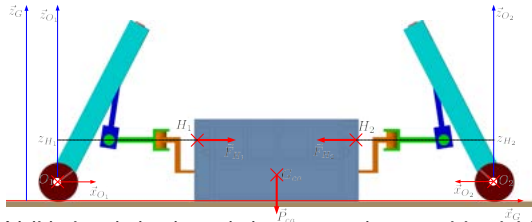


Schéma-bloc de la commande hybride force-position

Validation

de la loi de commande :



Validation de la phase de levage en p-bot : position initiale

Objectif 2 : levage de la caisse en co-manipulation

- Partie locomotion :
 - ⇒ Roues bloquées
- Partie manipulation :
 - ⇒ Loi de commande hybride force-position.

Se basant sur le modèle statique $\Gamma = J_H^T \cdot F$:

$$F = F_1 + F_2 = S.CP + S'.CF$$

avec :

S et S' : matrices de sélection

CP : loi de commande en position (PID)

CF : loi de commande en effort ($CF = F_H^d + K_i \int \varepsilon_F$)

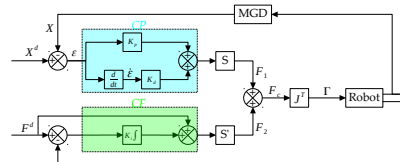
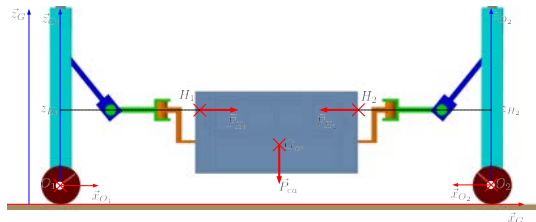


Schéma-bloc de la commande hybride force-position

Validation

de la loi de commande :

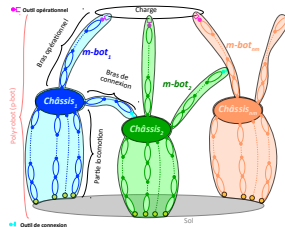
Validation de la phase de levage en p-bot : position finale x_G

- 1 Introduction
- 2 Système robotique coopératif et analyse structurale
- 3 Synthèse structurale des manipulateurs mobiles
- 4 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles
- 5 Conclusions et perspectives
 - Conclusions
 - Production scientifique
 - Perspectives

- Étude de l'**état de l'art** des manipulateurs mobiles coopératifs

- Étude de l'**état de l'art** des manipulateurs mobiles coopératifs

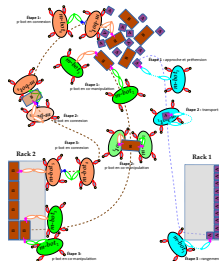
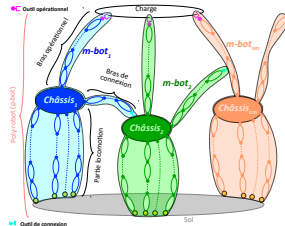
- Présentation d'un **système robotique coopératif modulaire** permettant la réalisation de scénarios dans le contexte de l'industrie 4.0



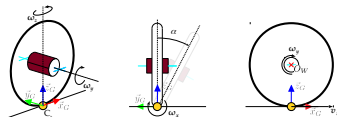
- Étude de l'**état de l'art** des manipulateurs mobiles coopératifs

- Présentation d'un **système robotique coopératif modulaire** permettant la réalisation de scénarios dans le contexte de l'industrie 4.0

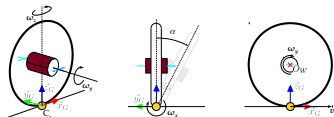
- **Réalisation des scénarios** industriels et de service à l'aide du système robotique



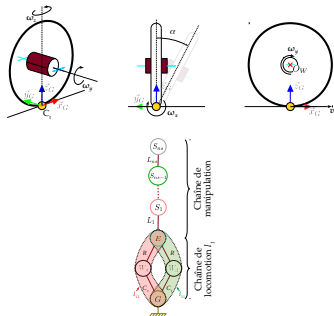
- **Modélisation** de la liaison non holonome **roue-sol** comme un ensemble de liaisons cinématiques



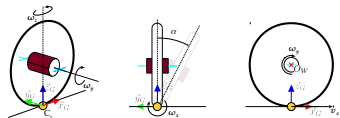
- **Modélisation** de la liaison non holonome **roue-sol** comme un ensemble de liaisons cinématiques
- **Analyse structurale** des manipulateurs mobiles en tant que



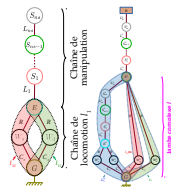
- **Modélisation** de la liaison non holonome **roue-sol** comme un ensemble de liaisons cinématiques
- **Analyse structurale** des manipulateurs mobiles en tant que **m-bot**



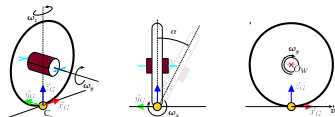
- **Modélisation** de la liaison non holonome **roue-sol** comme un ensemble de liaisons cinématiques



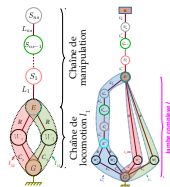
- **Analyse structurale** des manipulateurs mobiles en tant que **m-bot** ou **p-bot**



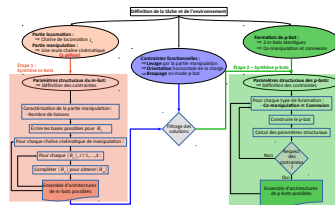
- **Modélisation** de la liaison non holonome **roue-sol** comme un ensemble de liaisons cinématiques



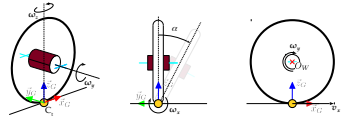
- **Analyse structurale** des manipulateurs mobiles en tant que **m-bot** ou **p-bot**



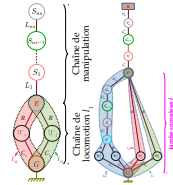
- Proposition d'une **démarche générique** de synthèse structurale prenant en compte des contraintes sur les paramètres structuraux



- **Modélisation** de la liaison non holonome **roue-sol** comme un ensemble de liaisons cinématiques

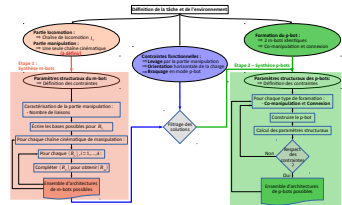


- **Analyse structurale** des manipulateurs mobiles en tant que **m-bot** ou **p-bot**

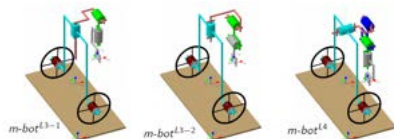


- Proposition d'une **démarche générique** de synthèse structurale prenant en compte des contraintes sur les paramètres structuraux

- **Énumération exhaustive** des 55 architectures cinématiques de connectivité $4 \leq S_m \leq 6$ et non redondantes

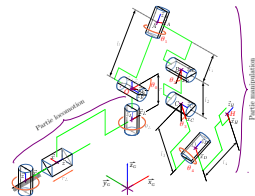
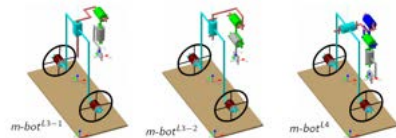


- Synthèse de **trois cinématiques innovantes** de m-bots pouvant travailler en coopération sur une tâche



- Synthèse de **trois cinématiques innovantes** de m-bots pouvant travailler en coopération sur une tâche

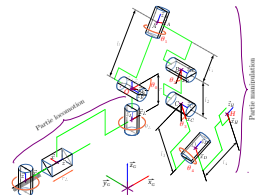
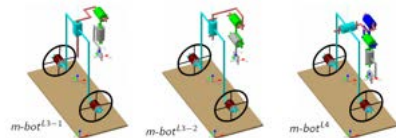
- **Modélisation** des manipulateurs mobiles et **synthèse dimensionnelle** châssis + bras



- Synthèse de **trois cinématiques innovantes** de m-bots pouvant travailler en coopération sur une tâche

- **Modélisation** des manipulateurs mobiles et **synthèse dimensionnelle** châssis + bras

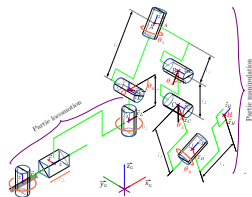
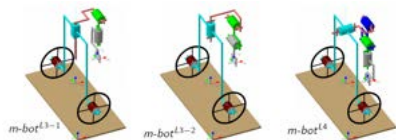
- **Commande** des manipulateurs mobiles en modes



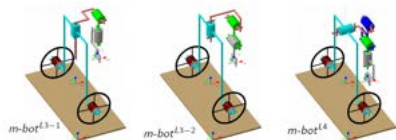
- Synthèse de **trois cinématiques innovantes** de m-bots pouvant travailler en coopération sur une tâche

- **Modélisation** des manipulateurs mobiles et **synthèse dimensionnelle** châssis + bras

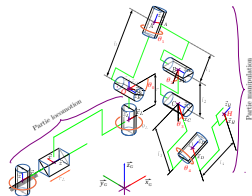
- **Commande** des manipulateurs mobiles en modes **m-bot**



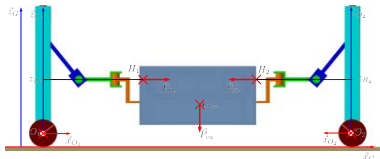
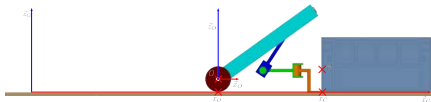
- Synthèse de **trois cinématiques innovantes** de m-bots pouvant travailler en coopération sur une tâche



- **Modélisation** des manipulateurs mobiles et **synthèse dimensionnelle** châssis + bras



- **Commande** des manipulateurs mobiles en modes **m-bot** et **p-bot**



- **Brevet :**

Conception et Commande Coopérative de Manipulateur Mobiles Modulaires (C^3M^3)

Date de publication : 11/12/2018

- **Conférences internationales :**

- *MTM & Robotics 2016*

A Method for Structural Synthesis of Cooperative Mobile Manipulators

27 Octobre 2016

- *MCG 2016*

Modeling and Control of Mobile Manipulators for Cooperative Tasks

05 Octobre 2016

- *TrC-IFTOMM 2015*

Autonomous Collaborative Mobile Manipulators : State of the Art

16 Juin 2015

- **Publications en cours :**

- Conférence internationale : IFTOMM 2019

- Revue : Machines and Mechanism Theory

- **Généraliser la méthode** de synthèse structurale à d'autres applications, comme le Kitting, polissage robotisé, ...
- Opérateur humain **collaborant** avec un p-bot
- **Extension de la commande** quasi-statique à une commande robuste dynamique
- Supervision de la commande à l'**échelle du p-bot**
- Optimiser la précision des mouvements en ajoutant des **contraintes d'équilibre statique et dynamique**
- Étude des **singularités** et utiliser les **redondances** fonctionnelles pour les éviter

Remerciements :

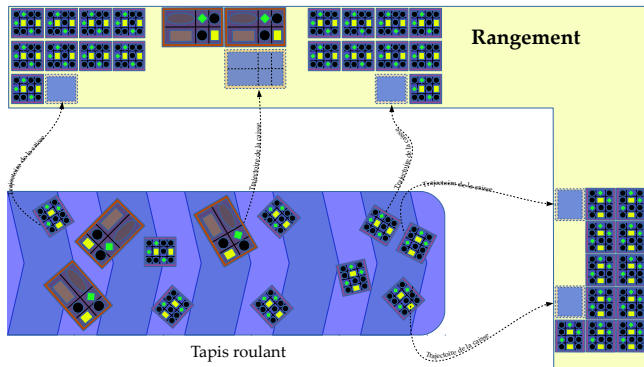
Ce travail a été financé par le programme « investissement d'avenir » géré par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), la commission européenne (Bourses FEDER en Auvergne) et la région Auvergne dans le projet LabEx ImobS3 (ANR-10-LABX-16-01)



Merci pour votre attention

- Utilisations possibles des manipulateurs mobiles coopératifs
- Robots mobiles à 2 roues
- Plan d'actions

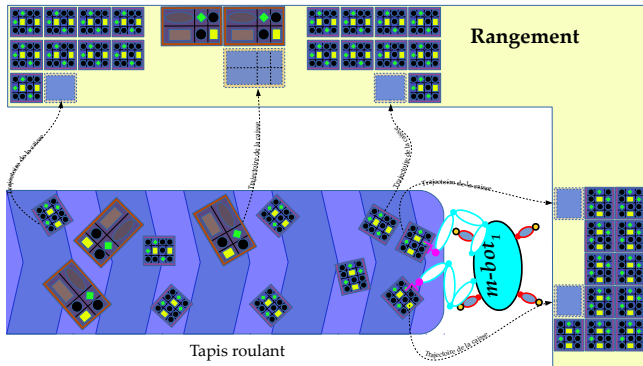
Manipulation en bord de ligne



Manipulation en bord de ligne

Mode m-bot

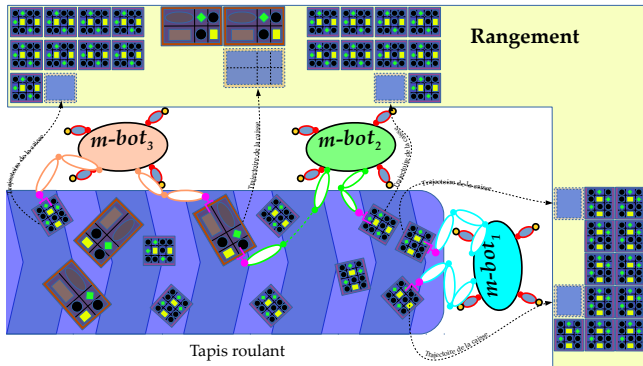
- $m-bot_1$: manipulation des petites caisses
- Deux bras opérationnels
- Outil de manipulation



Manipulation en bord de ligne

Mode m-bot

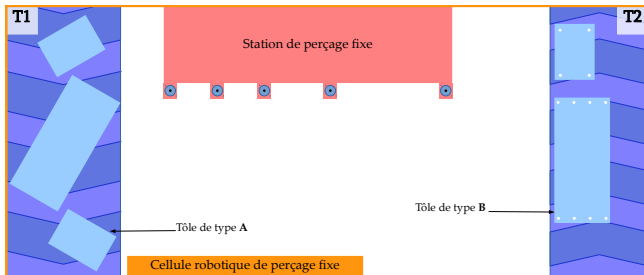
- **m-bot₁** : manipulation des petites caisses
- Deux bras opérationnels
- Outil de manipulation



Mode p-bot en co-manipulation de la charge

- **m-bot₂** et **m-bot₃** en co-manipulation des grandes caisses
- Possibilité de manipulation des petites caisses par un seul bras opérationnel
- Capacité de charge ↗, stabilité ↗

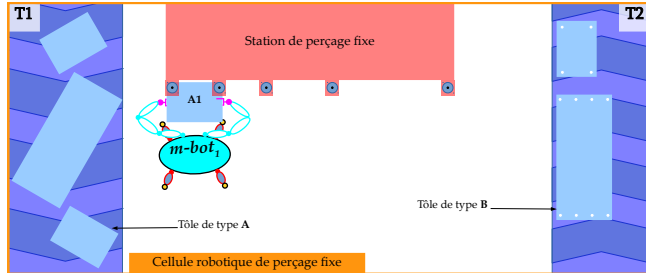
Tâche de perçage



Tâche de perçage

Mode m-bot

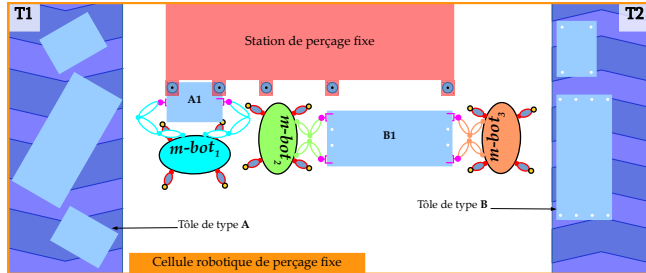
- **m-bot₁** : manipulation des tôles **A**
- Deux bras opérationnels
- Outil de manipulation



Tâche de perçage

Mode m-bot

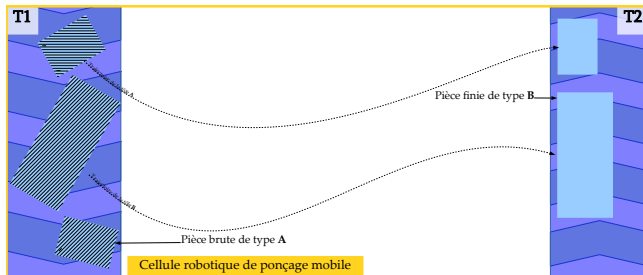
- **m-bot₁** : manipulation des tôles **A**
- Deux bras opérationnels
- Outil de manipulation



Mode p-bot en co-manipulation de la charge

- **m-bot₂** et **m-bot₃** en co-manipulation des tôles **B**
- Capacité de charge ↗, stabilité ↗

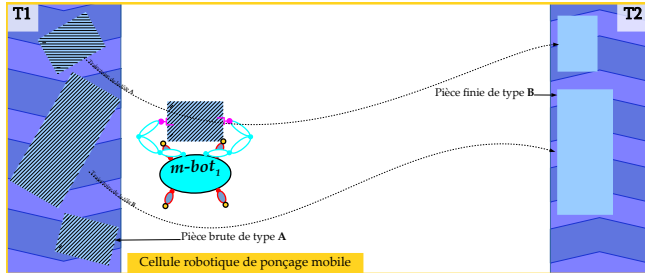
Tâche de polissage



Tâche de polissage

Mode m-bot : manipulation

- $m\text{-bot}_1$: manipulation des pièces **A**
- Deux bras opérationnels
- Outils de manipulation



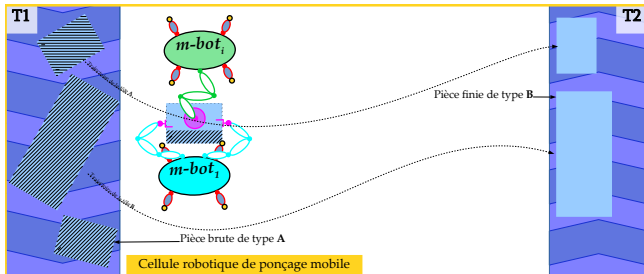
Tâche de polissage

Mode m-bot : manipulation

- $m-bot_1$: manipulation des pièces **A**
- Deux bras opérationnels
- Outils de manipulation

Mode m-bot : polissage

- $m-bot_j$: polir les tôles **A**
- Outil de ponçage



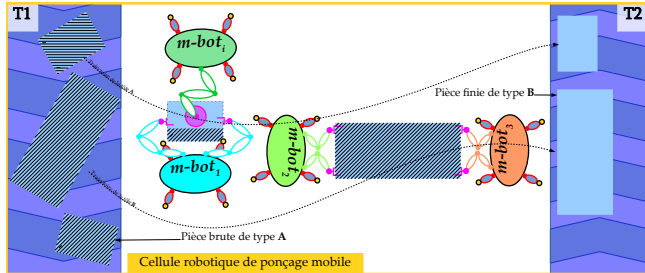
Tâche de polissage

Mode m-bot : manipulation

- $m\text{-bot}_1$: manipulation des pièces **A**
- Deux bras opérationnels
- Outils de manipulation

Mode m-bot : polissage

- $m\text{-bot}_j$: polir les tôles **A**
- Outil de ponçage



Mode p-bot en co-manipulation de la charge

- $m\text{-bot}_2$ et $m\text{-bot}_3$: co-manipulation des pièces **B**
- Capacité de charge ↗, stabilité ↗

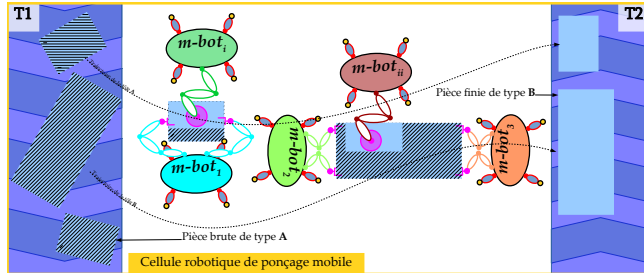
Tâche de polissage

Mode m-bot : manipulation

- $m-bot_1$: manipulation des pièces **A**
- Deux bras opérationnels
- Outils de manipulation

Mode m-bot : polissage

- $m-bot_j$: polir les tôles **A**
- Outil de ponçage
- $m-bot_{ji}$: polir les tôles **B**



Mode p-bot en co-manipulation de la charge

- $m-bot_2$ et $m-bot_3$: co-manipulation des pièces **B**
- Capacité de charge ↗, stabilité ↗

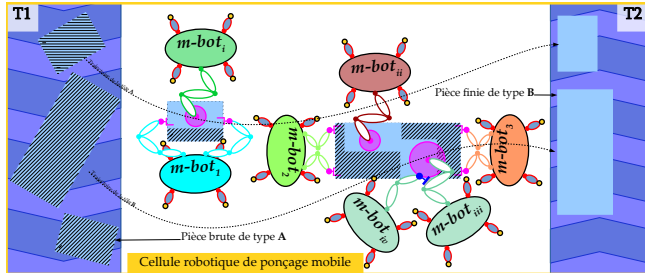
Tâche de polissage

Mode m-bot : manipulation

- **m-bot_i** : manipulation des pièces **A**
- Deux bras opérationnels
- Outils de manipulation

Mode m-bot : polissage

- **m-bot_j** : polir les tôles **A**
- Outil de ponçage
- **m-bot_{ij}** : polir les tôles **B**



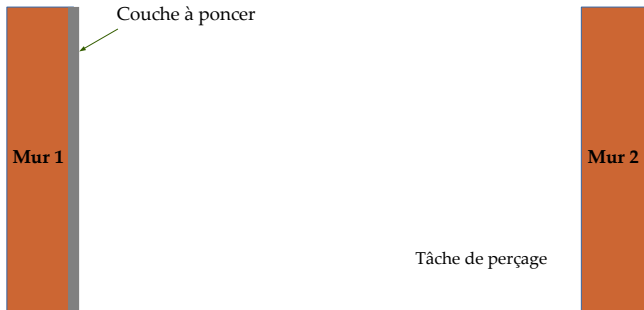
Mode p-bot en co-manipulation de la charge

- **m-bot₂** et **m-bot₃** : co-manipulation des pièces **B**
- Capacité de charge ↗, stabilité ↗

Mode p-bot en connexion

- Le **m-bot_{iii}** se connecte à **m-bot_{iv}** pour la manipulation des grands outils
- Capacité de charge ↗, stabilité ↗, rigidité ↗

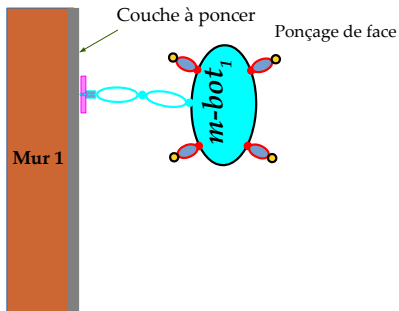
Tâche de perçage et de polissage en génie civil



Tâche de perçage et de polissage en génie civil

Mode m-bot : ponçage

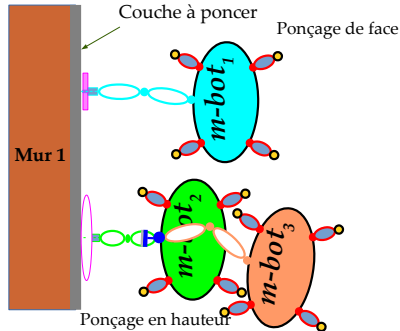
- $m-bot_1$: ponçage du mur 1
- Un bras opérationnel
- Outil de ponçage



Tâche de perçage et de polissage en génie civil

Mode m-bot : ponçage

- **m-bot₁** : ponçage du mur 1
- Un bras opérationnel
- Outil de ponçage



Mode p-bot en connexion

- Le **m-bot₃** se connecte à **m-bot₂** pour la manipulation des grands outils
- Capacité de charge ↗, stabilité ↗, rigidité ↗, efforts générés ↗

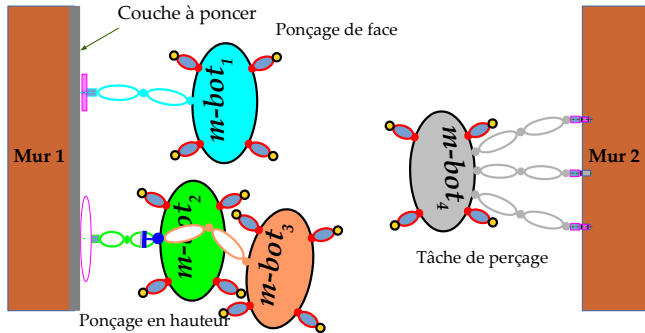
Tâche de perçage et de polissage en génie civil

Mode m-bot : ponçage

- **m-bot₁** : ponçage du mur 1
- Un bras opérationnel
- Outil de ponçage

Mode m-bot : perçage

- **m-bot₄** : perçage dans le mur 2
- Quatre bras opérationnels
- Outil de perçage
- Tâche à faible effort \nearrow ⇒ paralléliser la tâche



Mode p-bot en connexion

- Le **m-bot₃** se connecte à **m-bot₂** pour la manipulation des grands outils
- Capacité de charge \nearrow , stabilité \nearrow , rigidité \nearrow , efforts générés \nearrow

Exemples de manipulateurs mobiles à 2 roues



Robot *NineBot*,
Segway



Robot *Handle*,
Boston Dynamics

Pourquoi pas des parties locomotions à 3 roues

- Mode m-bot :
 - ⇒ Encombrement
- Mode p-bot :
 - ⇒ Hyperstatisme important

Plan d'action

- Obtention du soutien de la SATT Grand Centre
- Obtention d'un chèque recherche-innovation de Hub Innovergne
- Réalisation d'un démonstrateur à petite échelle
- Poursuite en post-doc pour une application de décapage-polissage