HAL
open science

Conception et commande collaborative de manipulateurs mobiles modulaires (C3M3)

Zine Elabidine Chebab

To cite this version:

Zine Elabidine Chebab. Conception et commande collaborative de manipulateurs mobiles modulaires (C3M3). Automatique / Robotique. Université Clermont Auvergne [2017-2020], 2018. Français. NNT : 2018CLFAC070 . tel-02130445

HAL Id: tel-02130445

https://theses.hal.science/tel-02130445v1

Submitted on 15 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Clermont Auvergne

École doctorale Sciences Pour l'Ingénieur

Thèse de doctorat

Présentée par

M. Zine Elabidine CHEBAB

Pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : Électronique et systèmes

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

Soutenue publiquement le 11 décembre 2018 devant le jury composé de :

M. Damien CHABLAT	Directeur de recherche, LS2N (Nantes)	Rapporteur
M. Said ZEGHLOUL	Professeur des universités, Pprime (Poitiers)	Rapporteur
M. Olivier COMPANY	Maître de conférences, LIRMM (Montpellier)	Examinateur
Mme. Véronique PERDEREAU	Professeur des universités, ISIR (Paris)	Examinatrice
M. Laurent SABOURIN	Maître de conférences HDR, Institut Pascal	Directeur de thèse
M. Nicolas BOUTON	Maître de conférences, Institut Pascal	Encadrant
M. Jean-Christophe FAUROUX	Maître de conférences HDR, Institut Pascal	Encadrant
M. Youcef MEZOUAR	Professeur des universités, Institut Pascal	Encadrant

Université Clermont Auvergne - SIGMA Clermont

Institut Pascal, UMR 6602 CNRS/UCA/SIGMA Clermont, F-63171 Aubière, France

Remerciements

Ce travail a été financé par le programme " investissements 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 IMobS^3 (ANR-10-LABX-16-01).

Je tiens à présenter mes sincères remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail, et tout particulièrement Monsieur ***Damien CHABLAT*** *de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury et d'avoir rapporté mon mémoire, Messieur* ***Saïd ZEGHLOUL*** *d'avoir accepté de rapporter mon mémoire et Madame* ***Véronique PERDEREAU*** *et Monsieur* ***Olivier COMPANY*** *d'avoir accepté d'examiner mon travail. Merci d'avoir pris de votre précieux temps pour lire, juger, et critiquer ce travail.*

Je tiens à remercier mes superviseurs, Monsieur ***Laurent SABOURIN****, directeur de thèse, et Messieurs* ***Nicolas BOUTON****,* ***Jean-Christophe FAUROUX*** *et* ***Youcef MEZOUAR*** *pour leur suivi scientifique, leur soutien, leur encadrement et leurs précieux conseils. Une mention spéciale pour Monsieur* ***Jean-Christophe FAUROUX*** *qui m'a encadré depuis mes débuts sur le stage recherche Master 2. Sa confiance infaillible et ces conseils précieux sur la rigueur du travail et la manière de communiquer m'ont permis de me forger une méthode de travail scientifique et d'avancer sereinement sur nos différents projets de recherche.*

J'adresse mes remerciements à Monsieur ***Michel DHOME****, le directeur du Labex IMobS^3, Madame* ***Évelyne GIL****, la directrice de* ***l'institut Pascal*** *et Madame* ***Sophie COMMEREUC****, la directrice de* ***Sigma-Clermont*** *pour m'avoir accueilli pendant ces années de thèse. Je tiens à remercier tous les membres de* ***l'institut Pascal*** *et de* ***Sigma-Clermont*** *avec qui j'ai partagé des moments très agréables.*

Un grand merci aux personnels administratifs toujours serviables, aimables, souriants et surtout professionnels pour leur rôle et leur implication dans la bonne gestion de ce travail. Je pense particulièrement à Madame ***Jacqueline MADEBENE*** *et Madame* ***Cyrille RÉGNIER****. Je remercie aussi l'ensemble des membres de* ***l'Institut Pascal*** *et de* ***Sigma-Clermont*** *que j'ai eu le bonheur de rencontrer pendant ces années de thèse.*

J'adresse un grand merci très spécial à tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments très agréables. Ainsi, mes sincères remerciements vont à la ***TEAM COFFEE : Quentin, Corentin, Siddharth, Rym et Dimitri****. Les autres amis de Sigma-Clermont, notamment* ***Montassar, Jacques, Essia, Aicha, Nesrine...***

Je veux également remercier mes amis ***Aubièrois*** *qui m'ont accompagnés et soutenus durant toutes ces années de thèse. Dans ce sens, je remercie* ***Yassine, Bouzid, Mounir et Mourad*** *pour leurs conseils précieux,* ***Lotfi, Houssem, Ahmed, Omar, Merwan, Seif, Lazher, Bassem*** *et beaucoup d'autres pour tous les moments incroyables que l'on a passés ensemble.*

Cette aventure de thèse ne serait pas possible sans le soutien indéfectible de ma famille. Certes, ça a été difficile de réaliser ce travail loin d'eux, mais leurs encouragements quotidiens m'ont permis de surmonter les différentes difficultés rencontrées. Ainsi, je remercie mes chers parents pour tous ceux qu'ils ont faits pour moi, mes sœurs pour leurs encouragements, mes grands-parents pour leurs invocations, mes tantes et oncles pour leur soutien et tous les membres des familles ***CHEBAB*** *et* ***KHELIFI****.*

Mes remerciements vont surtout à ma chère épouse qui m'a accompagnée durant les deux dernières années de thèse, et qui a surtout brillamment organisée mon pot de thèse

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

À mes très chers parents

Table des matières

Tables des matières vii

Liste des figures x

Liste des tableaux xii

Table des notations xiii

Introduction générale 1

1 Les manipulateurs mobiles et la coopération 3
1.1 Présentation des manipulateurs mobiles 4
1.1.1 Les robots manipulateurs 4
1.1.2 Les plateformes mobiles 7
1.1.3 Les domaines d'utilisation des manipulateurs mobiles 10
1.2 Coopération en robotique 12
1.2.1 La coopération 13
1.2.2 La collaboration 15
1.2.3 La coopération des manipulateurs mobiles 17
1.2.4 La collaboration avec des manipulateurs mobiles 21
1.3 Défis des manipulateurs mobiles 22
1.3.1 Élargissement des domaines d'utilisation 22
1.3.2 Conception de nouvelles architectures 23
1.3.3 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles 23
1.4 Objectifs de la thèse 24
Conclusion 25

2 Système robotique coopératif et analyse structurale 27
2.1 Système robotique coopératif 28
2.2 Les tâches et scénarios envisagés pour les MMs 29
2.2.1 Tâches de manipulation 29
2.2.2 Tâches de fabrication industrielle 32
2.2.3 Tâches de services 34
2.3 Manipulation et transport d'objets en contexte industriel 37
2.3.1 Contraintes et environnement 37
2.3.2 Phases de réalisation de la tâche en m-bot 39
2.3.3 Phases de réalisation de la tâche en p-bot 41
2.3.4 Structure cinématique des manipulateurs mobiles 43
2.4 Analyse structurale des manipulateurs mobiles 44
2.4.1 Paramètres structuraux des manipulateurs mobiles 45
2.4.2 Recherche d'une liaison équivalente au contact roue-sol 46

2.4.3 Méthode de calcul des paramètres structuraux des m-bots 48
2.4.4 Méthode de calcul des paramètres structuraux des p-bots 53
Conclusion 58

3 Synthèse structurale des manipulateurs mobiles **61**
3.1 Démarche de synthèse structurale 62
3.1.1 Contraintes sur les paramètres structuraux des m-bots 62
3.1.2 Contraintes sur les paramètres structuraux du p-bot 63
3.1.3 Caractérisation de la partie manipulation 63
3.1.4 Démarches de synthèse structurale 64
3.2 Synthèse structurale des m-bots 65
3.2.1 Conception de la chaîne de manipulation 66
3.2.2 Vérification des paramètres structuraux des m-bots 76
3.3 Synthèse structurale des p-bots 79
3.3.1 Paramètres structuraux des p-bots en mode co-manipulation 79
3.3.2 Paramètres structuraux des p-bots en mode connexion 85
Conclusion 91

4 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles **93**
4.1 Modélisation des manipulateurs mobiles 94
4.1.1 Modélisation de la chaîne cinématique de locomotion 95
4.1.2 Modélisation de la partie manipulation 97
4.1.3 Simplification des modèles des manipulateurs mobiles 101
4.2 Synthèse dimensionnelle des robots 104
4.2.1 Contraintes liées à l'espace de travail 104
4.2.2 Contraintes liées à la conception mécanique des m-bots 105
4.2.3 Contraintes de fonctionnement en m-bot 106
4.2.4 Contraintes de fonctionnement en p-bot 108
4.3 Commande des manipulateurs mobiles 112
4.3.1 Commande en position 112
4.3.2 Commande hybride force-position 112
4.4 Validation des lois de commande 114
4.4.1 Outils de simulation 114
4.4.2 Simulation de la phase d'approche en mode m-bot 114
4.4.3 Simulation de la phase de levage en mode p-bot 120
Conclusion 124

Conclusion générale et perspectives **125**

Bibliographie **130**

A Calculs des connectivités des parties locomotions **143**
A.1 Connectivité du m-bot en locomotion avec deux contacts au sol . . 144
A.1.1 Différentes possibilités d'écriture des bases (R_l^i) 144
A.1.2 Intersection des connectivités des jambes simples l_{11} et l_{12} 145

B Énumération combinatoire des chaînes cinématiques **149**
B.1 Chaînes cinématiques de manipulation à deux liaisons 150
B.2 Chaînes cinématiques de manipulation à trois liaisons 151
B.3 Chaînes cinématiques de manipulation à quatre liaisons 154

C Modélisation des manipulateurs mobiles **155**
C.1 Matrices de transformation de la partie manipulation 156
C.2 Modélisation géométrique d'un robot 3R plan 156
C.2.1 MGD 156
C.2.2 MGI 157
C.2.3 Matrice Jacobienne J 159

Liste des figures

1.1 Manipulateurs sériels industriels 5
1.2 Manipulateurs sériels collaboratifs 5
1.3 Manipulateurs parallèles 6
1.4 Manipulateurs hybrides 7
1.5 Différents organes de locomotion terrestre 8
1.6 Manipulateurs mobiles avec différents types de locomotion 9
1.7 Domaines d'utilisation des manipulateurs mobiles 11
1.8 Coopération entre plateformes mobiles 13
1.9 Coopération entre les manipulateurs 14
1.10 Collaboration entre plateformes mobiles et humains 16
1.11 Collaboration entre humains et bras manipulateurs 17
1.12 Manipulateurs mobiles coopératifs 19
1.13 Conception des manipulateurs mobiles coopératifs 20
1.14 Manipulateurs mobiles collaboratifs 21

2.1 Système robotique coopératif 28
2.2 Tâche de *Pick & Place* 30
2.3 Tâche de kitting 31
2.4 Tâches de manipulation en bord de ligne 32
2.5 Tâches de perçage à poste fixe 33
2.6 Tâches de ponçage à poste mobile 34
2.7 Tâches dans le bâtiment : ponçage et perçage 35
2.8 Tâche coopérative : manipulation de charges 36
2.9 Vue CAO de l'environnement de travail 38
2.10 Caisses considérée pour la tâche de transport 38
2.11 Conception de l'outil de manipulation 39
2.12 Phases de réalisation de la tâche en m-bot 40
2.13 Phases de réalisation de la tâche en p-bot 42
2.14 Caractéristiques générales de la structure des m-bots 44
2.15 Structure cinématique du manipulateur mobile 45
2.16 Description des mouvements naturels des roues 47
2.17 m-bot en locomotion avec trois contacts au sol 53
2.18 p-bot en co-manipulation de la charge 54
2.19 p-bot en connexion entre deux m-bots 56

3.1 Méthode de synthèse structurale retenue pour les m-bots et p-bots 66
3.2 Les m-bots retenus après la sélection 76
3.3 Présentation du $p\text{-}bot^{L3-23}$ en co-manipulation 80
3.4 Présentation du $p\text{-}bot^{L3-27}$ en co-manipulation 82
3.5 Présentation du $p\text{-}bot^{L4-17}$ en co-manipulation 83
3.6 Présentation du $p\text{-}bot^{L3-23}$ en connexion 86

3.7 Présentation du *p-bot*$^{L4-17}$ en connexion 89

4.1 Deux solutions dérivées du *m-bot*$^{L4-17}$ obtenues par permutation des liaisons de la chaîne cinématique de manipulation 94
4.2 Vue CAO de la chaîne cinématique de locomotion 95
4.3 Vue de dessus de la chaîne cinématique de locomotion 96
4.4 Modélisation de la partie manipulation 97
4.5 Convention de *Denavit-Hartenberg modifiée* 98
4.6 Représentation cinématique du m-bot incluant une chaîne cinématique de locomotion équivalente ainsi que la chaîne cinématique de manipulation 100
4.7 Modélisation géométrique du m-bot 102
4.8 Modélisation géométrique du p-bot 103
4.9 Dimensions de la configuration de l'espace de travail 104
4.10 Les hauteurs caractéristiques pour le point H 105
4.11 Modes de locomotion du m-bot 107
4.12 Stabilité statique du m-bot 107
4.13 Contraintes de fonctionnement en p-bot lors de la phase de dépôt 108
4.14 Phases de réalisation de la tâche en m-bot 110
4.15 Phases de réalisation de la tâche en p-bot 111
4.16 Schéma de commande PID 112
4.17 Schéma de commande hybride force-position 113
4.18 État initial et final lors de la phase d'approche en m-bot 115
4.19 Polygone de sustentation du m-bot avec trois contacts au sol 115
4.20 Évolution désirée des différentes variables pour la réalisation de la phase d'approche en m-bot 116
4.21 Validation par des simulations de la phase d'approche en m-bot 118
4.22 Erreurs des coordoonnées articulaires pour la réalisation de la phase d'approche en m-bot 119
4.23 Conditions initiales et finales lors de la phase de levage en p-bot 120
4.24 Trajectoires pour la réalisation de la phase de levage en p-bot 122
4.25 Erreurs de la réalisation de la phase de levage en p-bot 122
4.26 Validation en simulation de la phase de levage en p-bot 123

A.1 Chaîne cinématique de la locomotion l_1 144

C.1 Paramétrage simplifié de la partie manipulation du m-bot 157

Liste des tableaux

1.1 Travaux sur coopération des manipulateurs mobiles 18

2.1 Les bases possibles pour $R_{W/G}$ 48
2.2 Différentes possibilités d'écritures des bases (R_l^i) 50

3.1 Différentes possibilités d'écritures des bases (R_{l_1}) 65
3.2 Les bases (R^2_{manip}) complétant $(R_{l_1})_2$ pour atteindre (R_m^{min}) 67
3.3 Cinématiques des bras de manipulation à deux liaisons pour $(R_{l_1})_2$ . . . 67
3.4 Cinématiques des bras de manipulation à deux liaisons pour $(R_{l_1})_3$ . . . 68
3.5 Cinématiques des bras de manipulation à deux liaisons 68
3.6 Les bases (R^3_{manip}) complétant $(R_{l_1})_2$ pour atteindre (R_m^{5a}) 69
3.7 Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour $(R_{l_1})_2$ du m-bot de base (R_m^{5a}) 69
3.8 Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour $(R_{l_1})_3$ du m-bot de base (R_m^{5a}) 70
3.9 Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour le m-bot (R_m^{5a}) 70
3.10 Les bases des vitesses (R^3_{manip}) pour le m-bot (R_m^{5b}) 71
3.11 Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour le m-bot (R_m^{5b}) 71
3.12 Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons 72
3.13 Les bases des vitesses (R^4_{manip}) pour le m-bot (R_m^6) 73
3.14 Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons 73
3.15 Les 55 chaînes cinématiques de manipulation synthétisées, 11 à deux liaisons, 27 à trois liaisons et 17 à quatre liaisons 74
3.16 Les bras de manipulation retenus après sélection 76
3.17 Les paramètres structuraux calculés des m-bots sélectionnés 79
3.18 Les paramètres structuraux calculés des p-bots en co-manipualtion 85
3.19 Les paramètres structuraux calculés des p-bots en connexion 90

4.1 Table des paramètres D-H modifiés de la partie manipulation 100
4.2 Valeurs des dimensions de l'espace de travail et de la caisse 105
4.3 Longueurs des différentes solides du robot 109
4.4 Masses des différents solides du MM 114
4.5 Valeurs des gains du régulateur PID 117
4.6 Valeurs des gains du régulateur PID 122

A.1 Résultat de calcul des différentes bases (R_l^i) 145
A.2 Intersection des (R_G) de la locomotion $l1$ et la connectivité résultante . . 146
A.3 Différentes possibilités d'écritures des bases (R_{l_1}) 147

B.1 Chaînes cinématiques de manipulation à deux liaisons 151
B.2 Chaînes cinématiques de manipulation à trois liaisons (moitié des solutions) 154

Table des notations

Abbréviations :

C^3Bots	Collaborative Cross and Carry mobile roBots.
CAO	Conception assistée par ordinateur.
ddl (ddls)	Degré de liberté (degrés de liberté).
MM (MMs)	Manipulateur mobile (manipulateurs mobiles).
m-bot	Mono-robot.
p-bot	Poly-robot.
MGD	Modèle géométrique direct.
MGI	Modèle géométrique inverse.
MCD	Modèle cinématique direct.
PID	Proportionnel, intégral, dérivé.
RCC	Robotic Construction Crew.
RS	Règle de sélection des architectures des m-bots.
RSG	Roulement sans glissement.
SAMM	Stanford Assistant Mobile Manipulator.
TMS	Troubles musculosquelettiques.

Chaînes cinématiques :

J_j	$j^{\text{ème}}$ jambe de la chaîne cinématique de locomotion. $j = 1, \ldots, n_j$.
Br_b	$b^{\text{ème}}$ bras de la chaîne cinématique de manipulation. $b = 1, \ldots, n_b$.
$[R]$	Liaison pivot.
$[P]$	Liaison prismatique.
$[L^n_{manip}]$	Cinématiques des bras de manipulation à n liaisons. $n = 2, 3, 4$
L	Liaison de la chaîne cinématique.
l_1	Chaîne cinématique de locomotion d'un m-bot avec deux contacts au sol.
l_2	Chaîne cinématique de locomotion d'un m-bot avec trois contacts au sol.
l_3	Chaîne cinématique de locomotion d'un p-bot en mode connexion.

Contacts :

C_t	Contact roue-sol.
C_{t-Ou}	Contact outil-sol.
μ	Coefficient de frottement statique entre l'effecteur et la caisse.

Coordonnées articulaires :

ω_d	Rotation propre de la roue W_d.
ω_g	Rotation propre de la roue W_g.
Θ_L	Vecteur des coordonnées articulaires de la partie locomotion du m-bot.
$\dot{\omega}_d$	Vitesse de rotation propre de la roue W_d.
$\dot{\omega}_g$	Vitesse de rotation propre de la roue W_g.
$\dot{\Theta}_L$	Vecteur des vitesses articulaires de la partie locomotion du m-bot.
θ_0	Angle de tangage du m-bot. Rotation de l'essieu E par rapport au sol suivant l'axe $\vec{z}_E$.
θ_1	Rotation du solide S_1 par rapport à l'essieu E suivant l'axe $\vec{z}_A$.
θ_2	Rotation du solide S_2 par rapport au solide S_1 suivant l'axe $\vec{z}_B$.
θ_3	Rotation du solide S_3 par rapport au solide S_2 suivant l'axe $\vec{z}_C$.
θ_4	Rotation du solide S_4 par rapport au solide S_3 suivant l'axe $\vec{z}_D$.
Θ_M	Vecteur des coordonnées articulaires de la partie manipulation du m-bot.

Coordonnées opérationnelles :

x_O	Coordonnée du point O sur l'axe $\vec{x}_G$.
y_O	Coordonnée du point O sur l'axe $\vec{y}_G$.
φ	Rotation du repère R_O par rapport au repère R_G suivant l'axe $\vec{z}_G$.
X_O	Vecteur des coordonnées opérationnelles de la chaîne cinématique de locomotion dans le repère R_G.
$\boldsymbol{v}_O$	Vitesse linéaire du point O.
$\dot{x}_O$	Vitesse linéaire du point O projetée sur l'axe $\vec{x}_G$.
$\dot{y}_O$	Vitesse linéaire du point O projetée sur l'axe $\vec{y}_G$.
$\dot{\varphi}$	Vitesse angulaire du point O suivant l'axe perpendiculaire $\vec{z}_G$.
$\dot{X}_O$	Vecteur des vitesses opérationnelles du point O.
x_H	Coordonnée du point H sur l'axe $\vec{x}_O$.
y_H	Coordonnée du point H sur l'axe $\vec{y}_O$.
z_H	Coordonnée du point H sur l'axe $\vec{z}_O$.
β_x	Rotation du point H par rapport à l'axe $\vec{x}_O$.
β_y	Rotation du point H par rapport à l'axe $\vec{y}_O$.
β_z	Rotation du point H par rapport à l'axe $\vec{z}_O$.
X_H	Vecteur des coordonnées opérationnelles de la chaîne cinématique de manipulation dans le repère R_O.

Dimensions :

m-bot :

r	Rayon des roues du m-bot.
v	La voie de l'essieu du m-bot.
h	Hauteur de l'essieu du m-bot.
l_1	Longueur du solide S_1 du m-bot.
l_2	Longueur du solide S_2 du m-bot.
l_3	Longueur du solide S_3 du m-bot.
l_4	Longueur du solide S_4 du m-bot.

Environnement de travail :

lo_e	Longueur de l'espace de travail.
la_e	Largeur de l'espace de travail.
lo_{ra}	Longueur du rack.
la_{ra}	Largeur du rack.
h_{ra}	Hauteur du rack.
h_{et}	Hauteur de l'étagère du rack.

Caisse :

lo_{ca}	Longueur de la caisse.
la_{ca}	Largeur de la caisse.
h_{ca}	Hauteur de la caisse.
l_{h1}	Hauteur caractéristique 1 de la caisse.
l_{h2}	Hauteur caractéristique 2 de la caisse.

Nombres :

n_m	Nombre de m-bots par p-bot.
n_j	Nombre de chaînes cinématiques de la partie locomotion (jambes).
n_b	Nombre de chaînes cinématiques de la partie manipulation (bras).
n_L	Nombre de liaisons de la chaîne cinématique.
n_S	Nombre de solides de la chaîne cinématique de manipulation.

Paramètres structuraux :

R	Espace vectoriel des vitesses relatives entre deux solides.
(R)	Base génratrice de l'espace vectoriel R.
$R_{W/G}$	Espace vectoriel des vitesses relatives entre la roue et le sol.
$(R^i_{W/G})$	$i^{\text{ème}}$ écriture possible de la base génératrice de $R_{W/G}$. $i = 1, \ldots, 8$.
$S_{W/G}$	Connectivité de la liaison roue-sol.
$R_{Ou/G}$	Espace vectoriel des vitesses relatives entre la roue et le sol.
$S/S_m/S_p$	Connectivité / Connectivité du m-bot / Connectivité du p-bot.
$M/M_m/M_p$	Mobilité / Mobilité du m-bot / Mobilité du p-bot.
$T/T_m/T_p$	Redondance / Redondance du m-bot / Redondance du p-bot.
$N/N_m/N_p$	Degré d'hyperstatisme / Degré d'hyperstatisme du m-bot / Degré d'hyperstatisme du p-bot.
q	Nombre des boucles fermées dans la chaîne cinématique.
m	Nombre de solides dans la chaîne cinématique.
p	Nombre de liaisons dans la chaîne cinématique.

Paramètres structuraux des m-bots :

$R_{H/G} = R_m$	Espace vectoriel des vitesses relatives du m-bot entre l'effecteur, de point caractéristique H, et le sol G.
R_m^{min}	Espace vectoriel minimal désiré des vitesses relatives du m-bot.
(R_m^{min})	Base génératrice de l'espace vectoriel minimal désiré des vitesses relatives du m-bot.
S_m^{min}	Connectivité minimale désirée pour le m-bot.
S_m^d	Connectivité désirée pour le m-bot.
R_{l_1}	Espace vectoriel des vitesses relatives de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
$R_{l_{11}}$	Espace vectoriel des vitesses relatives de la 1ère jambe simple de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
$R_{l_{12}}$	Espace vectoriel des vitesses relatives de la 2ème jambe simple de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
(R_l^i)	$i^{\text{ème}}$ écriture possible de la base génératrice de $R_{l_{11}}$ ou $R_{l_{12}}$. $i = 1, \ldots, 8$.
$(R_{l1})_i$	$i^{\text{ème}}$ écriture possible de la base génératrice de R_{l_1}. $i = 1, \ldots, 4$.
S_{l_1}	Connectivité de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
M_{l_1}	Mobilité de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
r_{l_1}	Nombre de paramètres qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
T_{l_1}	Redondance de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
N_{l_1}	Degré d'hyperstatisme de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
S_{l_2}	Connectivité de la chaîne cinématique de locomotion l_2.
R_{manip}	Espace vectoriel des vitesses relatives de la chaîne cinématique de manipulation du m-bot.
(R_{manip})	Base génératrice de l'espace vectoriel des vitesses de la chaîne cinématique de manipulation du m-bot.
S_{manip}	Connectivité de la partie manipulation du m-bot.
S_{com}	Connectivité commune entre les parties manipulation et locomotion du m-bot.
M_{manip}	Mobilité de la partie manipulation du m-bot.
T_m^d	Redondance désirée pour le m-bot.
N_m^d	Degré d'hyperstatisme désiré du m-bot.

Paramètres structuraux des p-bots en configuration co-manipulation :

S_p^{min}	Connectivité minimale désirée pour le p-bot.
$R_{G_1^P}$	Espace vectoriel des vitesses relatives de la 1ère jambe complexe du p-bot.
$R_{G_2^P}$	Espace vectoriel des vitesses relatives de la 2ème jambe complexe du p-bot.
$S_{G_1^P}$	Connectivité de la 1ère jambe complexe du p-bot.
$S_{G_2^P}$	Connectivité de la 2ème jambe complexe du p-bot.
$R_{p-comanip}$	Espace vectoriel des vitesses relatives du p-bot en configuration co-manipulation.
$S_{p-comanip}$	Connectivité du p-bot en configuration co-manipulation.
$M_{p-comanip}$	Mobilité du p-bot en configuration co-manipulation.
$r_{p-comanip}$	Nombre des paramètres qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée du p-bot.
$r_{l-comanip}$	Nombre des paramètres qui perdent leur indépendance dans les boucles fermées des jambes complexes du p-bot.
$T_{p-comanip}$	Redondance du p-bot en configuration co-manipulation.
$N_{p-comanip}$	Degré d'hyperstatisme du p-bot en configuration co-manipulation.

Paramètres structuraux des p-bots en configuration connexion :

R_{l_3}	Espace vectoriel des vitesses relatives de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
S_{l_3}	Connectivité de la chaîne cinématique de locomotion l_3.
M_{l_3}	Mobilité de la chaîne cinématique de locomotion l_3.
r_{l_3}	Nombre de paramètres qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée de la chaîne cinématique de locomotion l_3.
r_{l-l_3}	Nombre de paramètres qui perdent leur indépendance dans les boucles fermées des jambes complexes de la chaîne cinématique de locomotion l_3.
$r_{p-connex}$	Nombre de paramètres qui perdent leur indépendance dans les boucles fermées du p-bot en configuration connexion.
k_1	Nombre de jambes simples dans la chaîne cinématique de locomotion l_3.
k_2	Nombre de jambes complexes dans la chaîne cinématique de locomotion l_3.
$S_{p-connex}$	Connectivité du p-bot en configuration connexion.
$M_{p-connex}$	Mobilité du p-bot en configuration connexion.
$T_{p-connex}$	Redondance du p-bot en configuration connexion.
$N_{p-connex}$	Degré d'hyperstatisme du p-bot en configuration connexion.

Points :

O	Point caractéristique de la locomotion appartenant à l'essieu du m-bot.
O_W	Point centre roue.
A	Point relié au solide S_1 du m-bot.
B	Point relié au solide S_2 du m-bot.
C	Point relié au solide S_3 du m-bot.
D	Point relié au solide S_4 du m-bot.
H	Point centre effecteur du m-bot, relié au solide S_4.
H'	Point caractéristique de l'effecteur du m-bot, relié au solide S_4.
H_c	Point point caractéristique de la caisse.
mode p-bot :	
H_1	Point centre effecteur du *m-bot*$_1$.
H_2	Point centre effecteur du *m-bot*$_2$.

Repères :

$R_G(\vec{x}_G, \vec{y}_G, \vec{z}_G)$	Repère global relié au sol.
$R_O(O, \vec{x}_O, \vec{y}_O, \vec{z}_O)$	Repère relié au m-bot.
$R_d(O_{W_d}, \vec{x}_d, \vec{y}_d, \vec{z}_d)$	Repère relié à la roue droite du m-bot.
$R_g(O_{W_g}, \vec{x}_g, \vec{y}_g, \vec{z}_g)$	Repère relié à la roue gauche du m-bot.
$R_E(O, \vec{x}_E, \vec{y}_E, \vec{z}_E)$	Repère relié à l'essieu du m-bot.
$R_A(A, \vec{x}_A, \vec{y}_A, \vec{z}_A)$	Repère relié au solide S_1 du m-bot.
$R_B(B, \vec{x}_B, \vec{y}_B, \vec{z}_B)$	Repère relié au solide S_2 du m-bot.
$R_C(C, \vec{x}_C, \vec{y}_C, \vec{z}_C)$	Repère relié au solide S_3 du m-bot.
$R_D(D, \vec{x}_D, \vec{y}_D, \vec{z}_D)$	Repère relié au solide S_4 du m-bot.
$R_H(H, \vec{x}_H, \vec{y}_H, \vec{z}_H)$	Repère relié à l'effecteur du m-bot.

Solides :

G	Sol de l'environnement de travail.
W_d/W_g	Roue droite du m-bot / roue gauche.
E	Essieu du m-bot.
S_j	$j^{\text{ème}}$ solide de la chaîne cinématique de manipulation. $j = 1, \ldots, n_S$.
S_{ns}	Effecteur de la chaîne cinématique de manipulation.
mode p-bot :	
S_{ns}^1	Effecteur de la chaîne de manipulation du *m-bot*$_1$.
S_{ns}^2	Effecteur de la chaîne de manipulation du *m-bot*$_2$.

Introduction générale

Depuis plusieurs années, les robots sont devenus des outils et moyens de production indispensables dans différents domaines industriels. Ils occupent une position centrale dans l'Industrie 4.0, quatrième révolution technologique des processus industriels, après celles des machines à vapeur, de la production en série et de l'automatisation. Ce terme représente la démarche d'amélioration des moyens de production pour satisfaire les nouveaux défis de l'industrie du 21ème siècle. On distingue, en plus de la robotique de production, la robotique dite " *de service* ", en plein essor, dans les domaines du bâtiment, de l'inspection, de la sécurité & défense, etc.

Parmi les problématiques qui accompagnent ce déploiement sans précédent des robots [IFR, 2018], les problèmes d'adaptabilité et de reconfigurabilité représentent des défis importants. Autrement dit, chaque domaine d'application de la robotique a des besoins qui peuvent changer du jour au lendemain et, par conséquent, les moyens de production doivent s'adapter pour y répondre. Par exemple, dans le domaine industriel, une ligne de fabrication doit pouvoir produire plusieurs références du même produit (options, tailles, couleurs différentes) avec les mêmes moyens de production (machines spéciales, robots). De plus, ces moyens de production sont parfois très imposants et ne peuvent pas être déplacés facilement, ce qui interdit à la ligne de production de se reconfigurer pour satisfaire des besoins variables.

Une des solutions pour répondre à ces problématiques est de remplacer les moyens de production monolithiques par un groupe d'entités robotiques en nombre variable, travaillant en coopération. Chaque entité robotique pourra manipuler des produits de petite taille et effectuer des tâches de production simples. Pour manipuler des produits de plus grande taille et effectuer des tâches plus complexes, on fera appel à un groupe coopératif d'entités robotiques. Le nombre d'entités robotiques pourra croître avec la taille du produit ou la complexité de la tâche. Ce concept de reconfiguration permet de réaliser un grand nombre de tâches ainsi que de maximiser le temps d'occupation des moyens de production et, à terme, la productivité et l'efficacité énergétique.

Dans cette perspective de production agile, la présente thèse propose un concept original de système robotique coopératif modulaire et reconfigurable, chaque entité robotique étant un manipulateur mobile. L'entité robotique seule est dénommée mono-robot (ou m-bot). Le groupe coopératif d'entités est dénommé poly-robot (ou p-bot). Plusieurs scénarios issus de besoins industriels sont ensuite recensés. Puis une méthode de synthèse structurale est proposée afin de contribuer à la conception robuste et optimale des m-bots. Cette méthode est basée sur les paramètres structuraux des mécanismes (connectivité, mobilité, redondance et hyperstatisme). Plusieurs architectures innovantes sont ensuite synthétisées. Enfin, un travail de modélisation et de commande est présenté pour vérifier que les architectures obtenues peuvent bien réaliser la tâche désirée.

Organisation du manuscrit

Le premier chapitre présente une étude bibliographique sur les types de robots et leurs domaines d'utilisation. Une attention particulière est apportée aux systèmes robotiques coopératifs où la réalisation des tâches est effectuée par plusieurs robots. Cette étude s'achève avec la présentation de trois principaux défis que devront relever les manipulateurs mobiles coopératifs futurs et identifie les principaux objectifs de la thèse.

Le second chapitre présente le système robotique coopératif basé sur l'utilisation de manipulateurs mobiles modulaires reconfigurables. Nos concepts de m-bots/p-bots sont testés sur des scénarios industriel et de service. Nous montrons alors le potentiel élevé de reconfigurabilité et d'adaptabilité de tels systèmes. Parmi l'ensemble des tâches présentées, nous considérons une tâche de manipulation et transport d'objets issue du monde industriel comme exemple d'application. Celle-ci permet de figer certains éléments de l'architecture des robots à concevoir. Enfin, nous présentons les paramètres structuraux au sens de la cinématique, les spécificités de l'analyse structurale des manipulateurs mobiles, ainsi que les méthodes associées de calcul de leurs paramètres structuraux.

Le troisième chapitre présente la démarche générique de synthèse structurale qui permet l'énumération systématique des architectures de manipulateurs mobiles respectant les contraintes reliées à la tâche et à l'environnement. Ces contraintes, portant simultanément sur le fonctionnement du m-bot et du p-bot, sont ensuite reformulées en terme de paramètres structuraux. La méthode explore les solutions cinématiques par ordre de complexité croissante. Le chapitre se termine par la présentation de trois architectures originales susceptibles de réaliser la tâche, l'une d'entre elles étant plus performante en terme de degré d'hyperstatisme.

Le quatrième chapitre présente la modélisation et la commande de cette architecture issue de la démarche de synthèse structurale. Les spécificités des bases mobiles et des bras manipulateurs sont introduites dans un modèle dynamique multi-corps dont on cherche à assurer la stabilité quasi-statique. La commande est implémentée à la fois pour le fonctionnement en mode m-bot et en mode p-bot. La dernière partie du chapitre présente les résultats de simulations numériques avancées combinant un logiciel de dynamique multi-corps (MSC Adams) et un logiciel de simulation de modèles (Mathworks Matlab Simulink).

Le manuscrit se clôture par des conclusions sur les travaux réalisés et des perspectives sur la suite du travail.

Chapitre 1

Les manipulateurs mobiles et la coopération

Sommaire

1.1 Présentation des manipulateurs mobiles 4
1.1.1 Les robots manipulateurs 4
1.1.2 Les plateformes mobiles 7
1.1.3 Les domaines d'utilisation des manipulateurs mobiles 10
1.2 Coopération en robotique 12
1.2.1 La coopération 13
1.2.2 La collaboration 15
1.2.3 La coopération des manipulateurs mobiles 17
1.2.4 La collaboration avec des manipulateurs mobiles 21
1.3 Défis des manipulateurs mobiles 22
1.3.1 Élargissement des domaines d'utilisation 22
1.3.2 Conception de nouvelles architectures 23
1.3.3 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles 23
1.4 Objectifs de la thèse 24
Conclusion 25

Ce premier chapitre présente le contexte général qui entoure les travaux de la thèse. La première partie présente des manipulateurs mobiles et leurs différents domaines possibles d'utilisation. Ensuite, la coopération en robotique est exposée en se focalisant sur la place des manipulateurs mobiles dans ce domaine. Puis, les défis qui font face au déploiement de ces robots sont présentés. Ce chapitre se termine par l'annonce des objectifs de cette thèse.

1.1 Présentation des manipulateurs mobiles

Un Manipulateur Mobile (MM) est un système robotisé se composant de deux entités distinctes :

- un ou plusieurs manipulateurs
- une plateforme mobile

L'avantage principal d'un MM est qu'il permet d'associer les différentes possibilités d'actions de ses deux composantes : les importantes capacités de manipulation par le manipulateur et l'élargissement de l'espace de travail permis par la plateforme mobile.

1.1.1 Les robots manipulateurs

Le terme robot vient du mot tchèque *"robota"* qui veut dire "travail forcé", un mot qui a été créé en 1920 par K.Čapek pour une pièce de théâtre. Par analogie, on définit le robot comme un *"appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable"* [Larousse, 2017]. Une définition plus technique considère le robot comme un *"manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches"*[Dombre et Khalil, 1988]. Pour la suite, nous allons utiliser le terme "manipulateur" pour désigner les robots manipulateurs. Les manipulateurs peuvent se classer en utilisant différents critères (architecture, capacité de charge, type d'utilisation, ...). Nous présentons les manipulateurs suivant leur architecture cinématique : sérielle, parallèle et hybride.

Les manipulateurs sériels

Les manipulateurs sériels sont les premiers robots développés. Historiquement, le premier robot industriel fut le manipulateur *"Unimate"* utilisé dans l'usine de *General Motors* [Devol, 1961] dont un exemple de la génération 2000 est illustré à la figure 1.1a. Ces types de manipulateurs possèdent une structure cinématique ouverte constituée d'une juxtaposition de liaisons simples : des liaisons pivots dans le cas des manipulateurs anthropomorphes (figure 1.1b), ou des liaisons prismatiques (figure 1.1c), ou bien un mélange entre les deux comme le robot *SCARA* (figure 1.1d). La modélisation et la commande de ces manipulateurs sont bien maitrisées dans la littérature. Au milieu des années 1990, une nouvelle tendance est née dans la conception de ces manipulateurs concernant leur capacité à collaborer avec les opérateurs humains [Colgate *et al.*, 1996]. Ces nouveaux manipulateurs dits collaboratifs (Cobots) ont généralement une faible capacité de charge avec des couples moteurs limités pour assurer la sécurité des opérateurs humains. Un exemple de ces manipulateurs est présenté à la figure 1.2 : le manipulateur *CR-iA* de *Fanuc* (figure 1.2a) possède une couche de protection qui minimise le danger de collision avec un opérateur humain [Fanuc, 2017]. Le bras manipulateur *LBR iiwa* de *Kuka* (figure 1.2b) est le premier robot collaboratif fabriqué en série [Bischoff *et al.*, 2010]. Le robot *Sawyer* de *Rethink Robotics* (figure 1.2c) est équipé d'un système de vision pour plus d'autonomie et de sécurité [Rethink Robotics, 2017]. D'autres manipulateurs de plus petite taille existent, par exemple les manipulateurs de *Universal Robots* (bras manipulateur *UR10* à la figure 1.2d) qui présentent un bon rapport qualité/prix [Universal Robots, 2018], ou bien le manipulateur à actionneurs pneumatiques *BionicCobot* de *Festo*, illustré à la figure 1.2e [Festo, 2017]. On trouve bien d'autres références sur le site dédié [CobotsGuide, 2016].

(a) premier robot industriel (génération 2000), *Unimate*

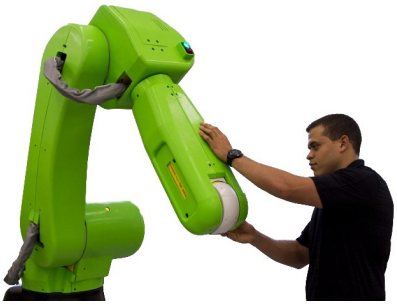
(c) Robot cartésien à liaisons prismatiques, *Toshiba*

(d) Robot *SCARA* à liaisons pivots et prismatiques, *ABB*

(b) Robot industriel à liaisons pivots, *KR 60*, *Kuka*

FIGURE 1.1 – Manipulateurs sériels industriels

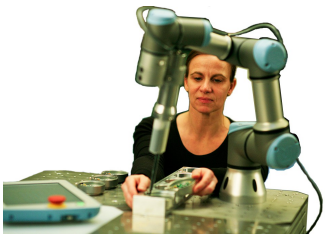
Ces robots manipulateurs doivent respecter les nouvelles normes sécuritaires dans le domaine industriel, en particulier les normes *NF ISO 10218-1 & 2 (2011)* qui expriment les exigences de sécurité pour les robots industriels (Robots et dispositifs robotiques), les spécificités techniques liées à la norme *NF ISO/TS 15066* (robots et systèmes robotiques / robots collaboratifs), la directive européenne *"Machine" 20006/42/CE* et la nouvelle norme *ISO/TC 199/WG12* qui définit les interactions homme-machine.



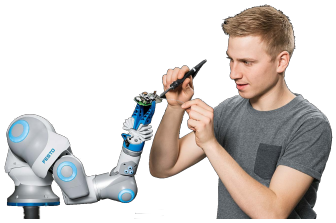
(a) Manipulateur collaboratif *CR-iA*, *Fanuc*

(b) Manipulateur *LWR iiwa*, *Kuka*

(c) *Sawyer*, *Rethink Robotics*



(d) Manipulateur *UR10*, *Universal Robotics*

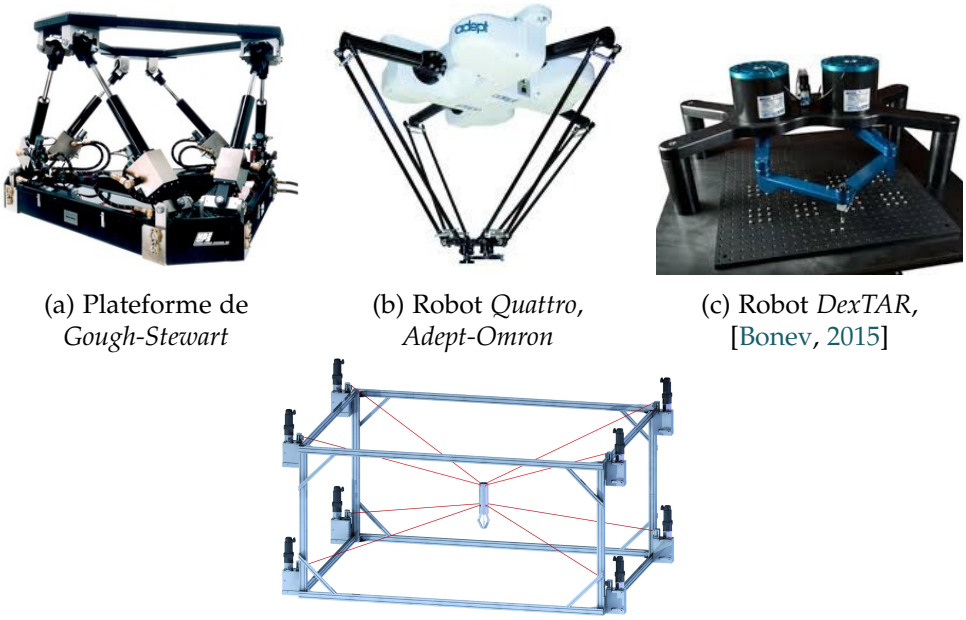


(e) Manipulateur *BionicCobot*, *Festo*

FIGURE 1.2 – Manipulateurs sériels collaboratifs

Les manipulateurs parallèles

À la différence des manipulateurs sériels, les manipulateurs parallèles possèdent une chaîne cinématique fermée. Ils sont constitués d'une base fixe, de deux ou plusieurs jambes et d'une base mobile. Leur principe est d'actionner les jambes pour contrôler le mouvement de la base mobile. Ce type de manipulateur peut réaliser des tâches avec plus de rigidité et de capacité de charge que les manipulateurs sériels mais avec un espace de travail réduit. Des exemples de ces manipulateurs sont présentés à la figure 1.3.



(a) Plateforme de *Gough-Stewart*

(b) Robot *Quattro*, *Adept-Omron*

(c) Robot *DexTAR*, [Bonev, 2015]

(d) Projet *IPAnema*, [Pott *et al.*, 2013]

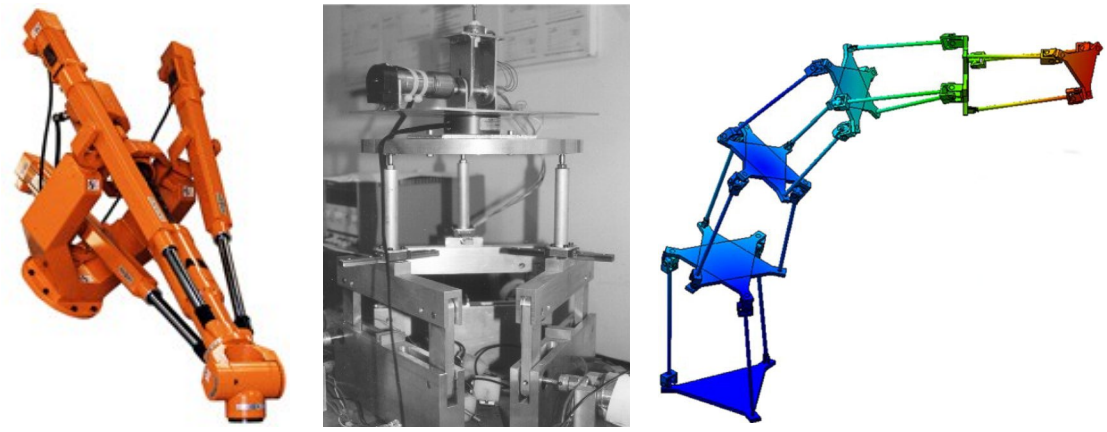
FIGURE 1.3 – Manipulateurs parallèles

La plateforme de *Gough-Stewart* (figure 1.3a) a été parmi les premières architectures de manipulateurs parallèles. Elle a été utilisée principalement pour la réalisation de simulateur de vol. À une échelle moins importante, le manipulateur *Quattro* de *Adept* (figure 1.3b) est un manipulateur très performant pour la tâche de *pick & place* avec des temps de cycles réduits [Omron-Adept, 2017]. Il est utilisé dans différents domaines dont l'agroalimentaire, la fabrication des cartes électronique, le tri des composants, etc.

Ces manipulateurs font toujours l'objet de recherches concernant par exemple l'élargissement de l'espace de travail en traversant les singularités [Pagis *et al.*, 2015]. Ces travaux ont été validés expérimentalement sur la plateforme *DexTAR* (figure 1.3c) [Bonev, 2015]. Parmi les dernières avancées dans ce domaine, on peut citer les manipulateurs parallèles à câbles qui permettent de manipuler des charges variables, légères et lourdes, à l'aide des câbles reliant la base mobile à la base fixe. Un exemple est illustré par le projet *IPAnema* de *Fraunhofer IPA* (figure 1.3d) qui présente une plateforme de recherche [Pott *et al.*, 2013].

Les manipulateurs hybrides

Les manipulateurs hybrides profitent des avantages des deux familles précédentes, c'est-à-dire la dextérité du manipulateur sériel et la rigidité du manipulateur parallèle. L'exemple le plus connu dans le monde industriel est le manipulateur *Tricept* (figure 1.4a) où la partie parallèle (responsable du positionnement de l'effecteur) est actionnée par trois vérins électriques, tandis que la partie sérielle (poignet à 2 ou 3 ddls responsable de l'orientation de l'effecteur) est fixée sur la base mobile du mécanisme parallèle. Ce manipulateur est utilisé dans différentes opérations d'usinage, d'assemblage, etc.



(a) Robot hybride *Tricept*, *ABB*

(b) Robot CaHyMan, [Carbone et Ceccarelli, 2004]

(c) Robots parallèles montées en séries, [Hu *et al.*, 2012]

FIGURE 1.4 – Manipulateurs hybrides

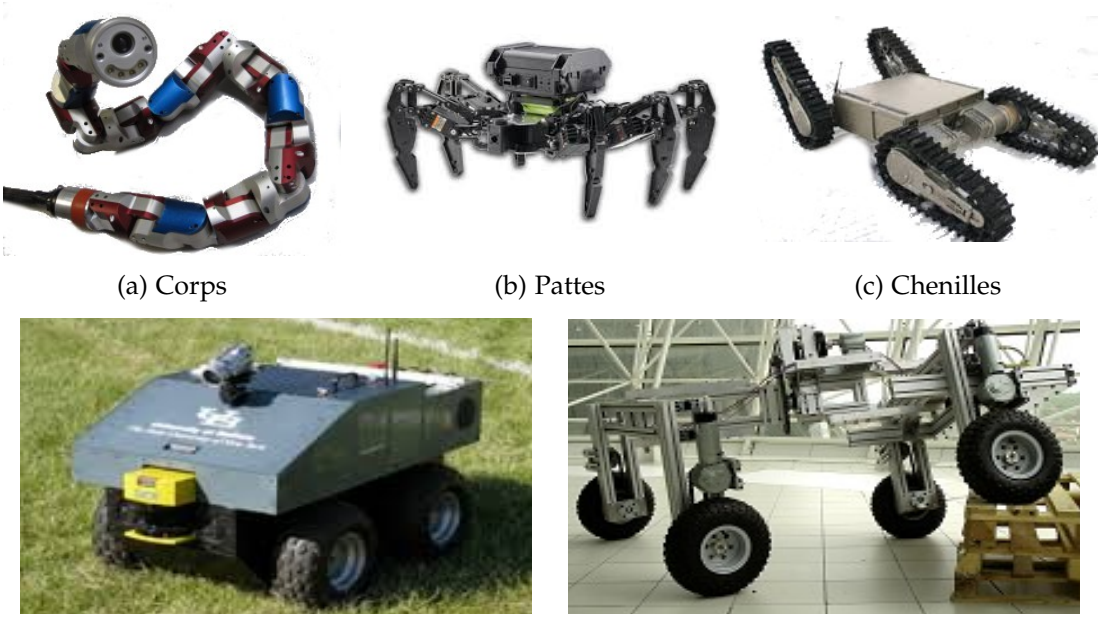
En recherche, cette architecture fait l'objet de nombreux travaux, comme le manipulateur *CaHyMan* (Cassino Hybrid Manipulator, figure 1.4b) qui est caractérisé par la mise en place d'un actionneur télescopique sur la plateforme parallèle *CaPaMan* antérieurement développée par les mêmes auteurs [Carbone et Ceccarelli, 2004]. Un autre exemple concerne l'étude de la rigidité de la mise en série de plusieurs plateformes parallèles [Hu *et al.*, 2012]. Une *CAO* des simulations est présentée à la figure 1.4c.

Parmi ces trois architectures de manipulateurs, la mieux adaptée et la plus utilisée pour la constitution des MMs est l'architecture sérielle car elle procure une dextérité plus importante. Cependant, on peut envisager de former un manipulateur parallèle à partir de deux ou plusieurs bras sériels pour la réalisation de tâches contraignantes. De même, former un MM parallèle à partir de MMs équipés de bras manipulateurs sériels présentera un avantage de stabilité dans le cas de manipulation de charges lourdes et de rigidité pour des configurations défavorables qui limitent drastiquement la capacité de charges des MMs.

1.1.2 Les plateformes mobiles

Une plateforme mobile est un véhicule capable de parcourir son environnement que celui-ci soit la terre, l'air ou la mer. Il existe en effet plusieurs plateformes air et mer possédant des capacités de manipulation. Dans le cadre de nos travaux, nous ne considérons que les MMs terrestres et leurs applications. Pour cela, des solutions robotiques

de locomotion terrestre vont être présentées pour déterminer la plus avantageuse pour notre cas d'étude. Ainsi, la locomotion terrestre peut être réalisée en utilisant différents organes : le corps (figure 1.5a), des pattes (figure 1.5b), des chenilles (figure 1.5c) ou des roues (figure 1.5d), avec une possibilité d'une locomotion hybride entre deux organes (figure 1.5e). Quelques exemples de plateformes mobiles équipées de capacités de manipulation sont présentés à la figure 1.6.



(a) Corps (b) Pattes (c) Chenilles

(d) Roues (e) Hybride roues-pattes

FIGURE 1.5 – Différents organes de locomotion terrestre

– *Le corps :*
C'est le moyen de locomotion utilisé par certains types d'animaux. Des robots mobiles avec le corps comme organe de locomotion ont été développés par analogie au déplacement par reptation comme des serpents [Tesch *et al.*, 2009; Wright *et al.*, 2012] (figure 1.5a). De plus, ces robots peuvent être dotés de capacité de manipulation à condition de les doter d'un préhenseur, souvent situé sur le corps terminal pour maximiser sa dextérité. Les inconvénients majeurs de ce type de locomotion, et donc de manipulation, sont la performance énergétique et les vitesses faibles que peuvent atteindre ces robots.

– *Les pattes :*
Dans le cas de locomotion dans un environnement faiblement structuré, comme sur un terrain rocheux, l'utilisation des pattes en locomotion est efficace car elle est basée sur une séquence d'appuis successifs sur des surfaces réduites. Par conséquent, un robot à pattes peut se mouvoir dans ce type d'environnement s'il arrive à détecter les zones accessibles et qu'il est équipé des pattes adaptées. Les plateformes mobiles avec cette structure (figure 1.5b) sont largement étudiées dans la littérature, avec pour objectif principal le franchissement des obstacles. En plus, ces plateformes mobiles peuvent être équipées de capacité de manipulation comme les robots bipèdes humanoïdes et les MMs d'explorations à quatre pattes comme le *SpotMini* de *Boston Dynamics* illustré à la figure 1.6a [Ackerman, 2016].

– *Les chenilles :*
La locomotion par chenilles offre de multiples contacts au sol permettant une répartition large des contraintes normales et tangentielles. Les chenilles s'avèrent particulièrement adaptées à la locomotion des véhicules lourds comme les chars et les pelleteuses, même sur sols meubles. Toutefois, le sol est fortement endommagé au passage du véhicule. L'utilisation de cette locomotion pour des véhicules autonomes est pertinente surtout lorsqu'ils sont utilisés pour la manipulation de charges lourdes. De plus, avec certaines configurations (figure 1.5c), les robots mobiles à chenilles permettent de franchir des obstacles. En ce qui concerne les capacités de manipulation, des manipulateurs mobiles à chenilles existent surtout dans le domaine de la défense comme le robot *Packbot* (figure 1.6b)[Endeavor ROBOTICS, 2017]. Ce MM permet le franchissement des obstacles en rabattant ses chenilles articulées pour escalader.

– *Les roues :*
Le roulement est le moyen de locomotion le plus efficace pour les sols relativement plats car il permet la réalisation de vitesses élevées tout en restant économique énergiquement par rapport aux autres moyens de locomotion sur le même type de terrain. De plus, à la différence de la locomotion par chenilles, le changement de direction des plateformes mobiles à roues n'abime pas le sol et génère des forces tangentielles moindres. D'ailleurs, la plupart des travaux sur les plateformes mobiles terrestres utilisent ce type de locomotion et sont focalisés sur différentes problématiques telle que la stabilisation [Gradetsky *et al.*, 1991] ou la localisation et la planification de leurs trajectoires pour des tâches d'inspections (figure 1.5d). D'ailleurs, dans le domaine de la logistique, on utilise de plus en plus des plateformes mobiles autonomes pour la gestion des stocks et rangement dans les hangars [Guizzo, 2008; Grenzebach, 2014]. Côté manipulation, la plupart des MMs terrestres utilisent cette locomotion. Ces plateformes peuvent se présenter sous différentes formes avec différents types de roues possibles [Campion et Chung, 2008], avec des avantages par rapport aux autres types de locomotion comme la simplicité de la structure mécanique et de la commande, l'efficacité énergétique, l'adaptation au monde industriel, etc. [Ortigoza *et al.*, 2012]. Un exemple de ces MMs est illustré à la figure 1.6c présentant le *Husky* [Clearpath Robotics, 2017].

(a) SpotMini (b) Packbot (c) Husky

FIGURE 1.6 – Manipulateurs mobiles avec différents types de locomotion

En plus des moyens de locomotion cités ci-dessus, la littérature présente des locomotions hybrides utilisant deux types de locomotions simples simultanément. Par exemple,

la locomotion hybride roues-pattes est bien présente dans la littérature [Lim et Teo, 2015; Halme *et al.*, 2000; Fauroux *et al.*, 2007] (figure 1.5e). Un autre moyen de combiner deux locomotions consiste à les utiliser alternativement (pattes et roues), qui permet à une plateforme mobile de monter les escaliers [Roston et Endsley, 2000; Hacikadiroglu et Canidemir, 2014].

Il ressort que pour la réalisation de tâches classiques de déplacement et de manipulation, la majorité des MMs terrestres sont composés d'une plateforme mobile à roues équipée d'un manipulateur sériel. C'est globalement l'architecture la plus courante car plus économique et moins énergétique. C'est de fait la plus présente dans la littérature. Une fois l'architecture de ces robots connue, nous présentons leurs domaines d'utilisation. Ce sont les choix technologiques que nous retenons dans la suite de nos travaux.

1.1.3 Les domaines d'utilisation des manipulateurs mobiles

Nous présentons maintenant plus spécifiquement l'architecture de MMs terrestres à roues (figure 1.7) et leurs champs d'application en précisant leur intérêt, quelques avantages et limitations.

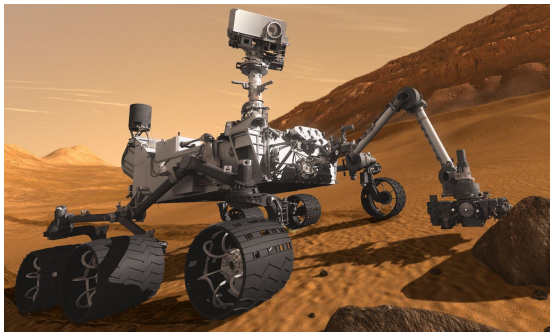
- *Parachèvement des pièces :*
  Ce sont des MMs pour la majorité en stade expérimental. Ils sont utilisés pour réaliser des opérations de parachèvement sur des pièces de taille importante. Des développements en cours concernent le polissage des ailerons d'avion (figure 1.7a, [Kuka, 2017]) ou le décapage de la peinture [Bernier, 2013]. Ce type de structure comporte généralement un manipulateur à grande capacité de charge pour embarquer l'outil, ce qui nécessite des plateformes mobiles très imposantes.

- *L'exploration spatiale :*
  Dans ce domaine, le MM le plus célèbre est *Curiosity* (figure 1.7b) qui réalise des missions sur la planète mars depuis 2012. Il possède une plateforme mobile à 6 roues et deux bras manipulateurs à 4 degrés de liberté (ddl) chacun, ce qui lui permet de saisir des échantillons du sol et de les analyser avec ses instruments embarqués [Schenker *et al.*, 2003].

- *L'agriculture :*
  L'agriculture est un secteur pouvant présenter des difficultés et des risques physiques et chimiques pour les opérateurs humains. Les nouvelles technologies permettent, non seulement d'améliorer les conditions de travail pour l'opérateur, mais aussi de faire progresser les rendements. Le rapport du ministère de l'agriculture Australien [Ward, 2003] présente l'état de l'art de la robotique pour la récolte des fruits comme le robot *MAGALI* dédié à la récolte des pommes (figure 1.7c). De même, le projet européen *Crops* explore des possibilités de mécanisation et automatisation des tâches pénibles pour le travail manuel, comme la récolte des poivrons dans les serres et la pulvérisation des pesticides [Crops, 2017].

- *Le génie civil :*
  L'utilisation des MMs dans le génie civil se développe du fait de la forte pénibilité de quelques tâches nécessitant un effort important sur une longue durée. Ceci concerne les opérations d'assemblage dans les bâtiments [Feldmann et Koch, 1998], les opérations de perçage (figure 1.7d) [Morange et Engelmann, 2007]. Plus récemment, la start-up *PaintUP* développe un manipulateur mobile constitué

(a) Robot *KMR Quantec*, *Kuka*



(b) Robot *Curiosity*, *Jet Propulsion Laboratory*

(c) Robot *MAGALI*, *INRA*

(d) Robot perceur, *Bouygues Construction*

(e) Plateformes de recherche H^2Bis, [Padois *et al.*, 2006]

(f) Plateformes de recherche *XL-MICO*, *Robotnik*

FIGURE 1.7 – Domaines d'utilisation des manipulateurs mobiles

d'un bras manipulateur monté sur un camion grue pour réaliser les travaux de traitement des surfaces externes des bâtiments (nettoyage, décapage et peinture) [PaintUP, 2017]. Ceci concerne également les opérations de désamiantage [Arai et Haruo, 2011; Detert *et al.*, 2017]. Ils visent à sortir les opérateurs des zones de confinement (pénibilité, sécurité).

- *L'inspection et l'intervention :*
  Les MMs comme le robot *Husky* (figure 1.6c) sont utiles dans des situations de catastrophes naturelles. Ils évitent ainsi aux opérateurs humains de risquer leur vie [Kostavelis et Gasteratos, 2017]. Afin d'évaluer et d'améliorer les performances de ces robots dans cette tâche, la compétition *DARPA Robotics Challenge* propose une batterie des tests en conditions difficiles concernant l'intervention dans des milieux de catastrophes naturelles et de contamination nucléaire [Pratt et Manzo, 2013]. Pour ce type d'intervention, les tâches étant complexes, les MMs sont donc téléguidés.

- *La recherche en robotique :*
  Afin de tester différentes approches de commande pour inciter le développement voulu dans le domaine des MMs, plusieurs plateformes de recherches existent : soient fabriquées par les centres de recherches comme le robot H^2Bis (figure 1.7e, [Padois *et al.*, 2006]) ou le robot *RT-middleware* [Sugawara *et al.*, 2007], soient venant de fabricants de robots mobiles proposant un manipulateur en option, comme le robot *XL-MICO* (figure 1.7f) et autres [Omron-Adept Mobile Robots, 2015; Bischoff *et al.*, 2011; NeoBotix, 2015].

Les MMs ont des caractéristiques et des tailles différentes et sont souvent associés à un domaine d'utilisation pour la réalisation d'opérations spécifiques. Ils présentent plusieurs avantages dans des milieux contraignants et dangereux pour les humains avec des couts de déploiement importants limitant une large utilisation. L'offre commerciale propose également des MMs de taille plus réduite, assez polyvalents, possédant des capacités d'opération et de charge plus réduites. Une solution consiste donc à faire coopérer plusieurs MMs que nous allons maintenant développer.

1.2 Coopération en robotique

Avant de présenter l'utilisation coopérative des MMs pour la réalisation de tâches, nous précisons la terminologie des interactions robot-robot et robot-humain. Pour différencier ces deux types d'interaction, la littérature les définit souvent comme suit :

- *La coopération* pour désigner l'interaction robot-robot
- *La collaboration* lors d'interactions homme-robot

Nous utiliserons cette terminologie dans la suite du manuscrit. De manière générale, ces deux interactions peuvent intervenir dans deux cas :

- Les robots (les robots et les opérateurs) partagent le même espace de travail : on parle dans ce cas de coopération (collaboration) passive.
- Les robots (les robots et les opérateurs) effectuent la tâche ensemble dans le cadre de la coopération (collaboration) active.

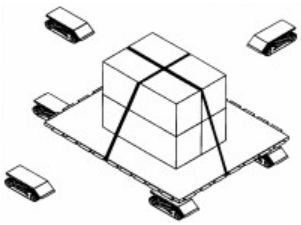
Se basant sur ces définitions et en considérant les deux composants des MMS (bras manipulateur et base mobile), nous présentons maintenant les différentes interactions de ces systèmes robotiques.

1.2.1 La coopération

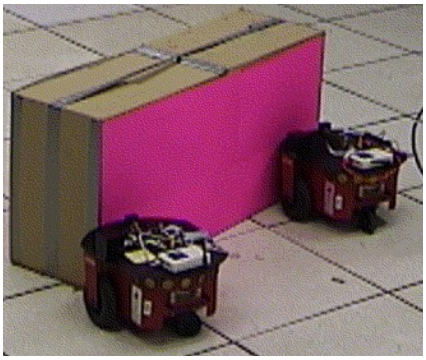
En se référant aux deux composantes des manipulateurs mobiles, nous distinguons la coopération des plateformes mobiles et la coopération des bras manipulateurs.

– *Coopération entre plateformes mobiles :*
Quelques exemples de coopération sont présentés à la figure 1.8.

(a) Projet *Swarmanoid*, [Dorigo *et al.*, 2013]



(b) Projet *Army-Ant*, [Bay, 1995]



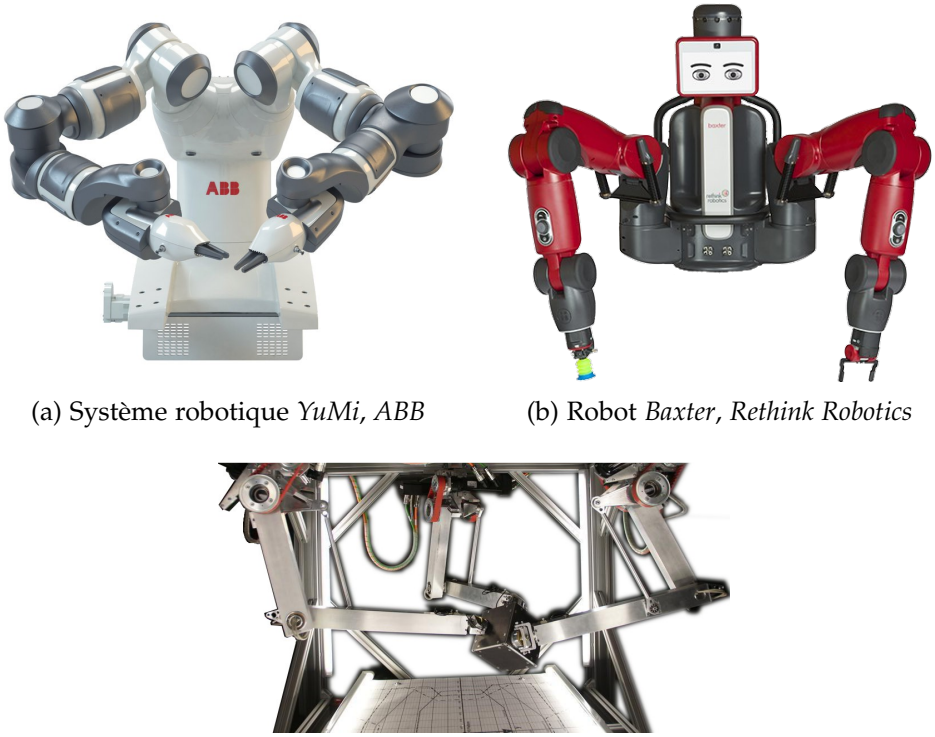
(c) Poussée coopérative, [Gerkey et Mataric, 2002]

(d) Transport coopératif, [Hirata *et al.*, 1999]

FIGURE 1.8 – Coopération entre plateformes mobiles

En coopération passive, les plateformes mobiles réalisent essentiellement des tâches de reconnaissance, comme les *Foot-Bot* du projet *Swarmanoid* (figure 1.8a) [Dorigo *et al.*, 2013]. La difficulté majeure de ce type de coopération concerne la planification des trajectoires des différentes plateformes surtout pour éviter les collisions entre les robots. En outre, la coopération active des plateformes mobiles a fait l'objet de plusieurs études. le projet *Army-Ant* illustré à la figure 1.8b consiste à utiliser plusieurs petits robots pour le levage puis le transport de charges [Bay, 1995]. D'autres exemples concernent la poussée des charges avec des plateformes mobiles de taille moyenne (figure 1.8c [Gerkey et Mataric, 2002; Adouane et Le Fort-Piat, 2004]) ou le transport de charges positionnées entre les plateformes (figure 1.8d) [Kosuge et Oosumi, 1996; Hirata *et al.*, 1999]. Dans ce cas de coopération, les tâches que peuvent réaliser les plateformes mobiles seules sont limitées du fait qu'elles ne possèdent pas de capacité de manipulation.

– *Coopération entre les manipulateurs :*
Quelques exemples de ces manipulateurs coopératifs sont présentés à la figure 1.9. Ce type de coopération est utilisé dans les systèmes de co-manipulation, c'est-



(a) Système robotique *YuMi*, *ABB*

(b) Robot *Baxter*, *Rethink Robotics*

(c) Système de co-manipulation *ParaGrip*, [Mannheim *et al.*, 2013]

FIGURE 1.9 – Coopération entre les manipulateurs

à-dire la manipulation d'objets par deux bras manipulateurs (bi-bras) ou plus. Cette architecture est inspirée de la morphologie humaine. Ces systèmes bi-bras sont conçus pour être utilisés dans les différents domaines de service et industriel [De Gea *et al.*, 2009]. Ce type de robot permet la manipulation de deux objets différents à la fois grâce aux deux manipulateurs sériels, ou bien la manipulation d'un seul objet tenu par les deux manipulateurs. Dans ce cas, on passe d'une configuration sérielle à parallèle dès que le système (manipulateur et charge) forme une chaîne cinématique fermée. Un état de l'art des manipulateurs bi-bras [Smith *et al.*, 2012] présente les différents verrous scientifiques liés à la commande. Différents manipulateurs bi-bras sont aujourd'hui présents sur le marché comme le *YuMi* de *ABB* (figure 1.9a [ABB]), le robot *Baxter* (figure 1.9b [Rethink Robotics, 2014]), qui est équipé d'un système de stéréovision, comparable à la disposition des yeux humains. Pour ces deux exemples, chaque bras manipulateur est conçu pour travailler avec les opérateurs humains, donc en mode collaboratif.
Néanmoins, cette coopération n'est pas exclusive à la manipulation bi-bras. Le projet *ParaGrip* (figure 1.9c) permet la manipulation d'objets, y compris de grande taille, par quatre bras manipulateurs à poste fixe. Chaque bras possède une structure hybride et comporte une boucle permettant de loger les actionneurs du coude et de l'épaule proches du bâti pour de meilleures performances dynamiques. Le poignet est faiblement actionné, pour permettre d'orienter la mobilité en pronosupination quand le bras travaille seul. Le poignet devient complètement passif quand le bras travaille en coopération. Différents préhenseurs sont adaptables à la charge à manipuler : électro-aimants, ventouses, pinces, etc. L'avantage majeur du système *ParaGrip* est de permettre des rotations continues de l'objet, d'où une

grande dextérité. En effet, le quatrième bras est toujours disponible pour prendre le relais d'un des trois autres et s'affranchir ainsi des limites articulaires des liaisons et des configurations singulières [Mannheim *et al.*, 2013]. Ces systèmes de co-manipulation sont avantageux par rapport aux bras manipulateurs simples car ils offrent la possibilité de reconfiguration série-parallèle regroupant ainsi les avantages des deux solutions. Les manipulateurs multi-bras offrent des capacités de manipulation très intéressantes, cependant, leur espace de travail en coopération reste restreint ce qui limite leur flexibilité dans la réalisation des tâches. Afin d'augmenter leurs capacités d'action, ces systèmes doivent pouvoir être facilement transportables afin de modifier la configuration de l'espace de travail le plus rapidement possible tout en restant économiquement acceptable. Des constructeurs comme *Rethink Robotics* proposent une solution de plateforme mobile associée au manipulateur bi-bras *Baxter*.

Pour les coopérations robots-robots présentées, qu'elles soient actives ou passives, mobiles ou manipulatrices, restent limitées à des applications spécifiques (transport, manipulation de petits objets, assemblage, etc.). En effet, celles-ci font intervenir des robots de même type, ce que limite leurs performances, leurs flexibilités et leurs champs d'action comme l'absence de capacité de manipulation pour les robots mobiles et l'espace de travail restreint les bras manipulateurs. D'autre part, il est très important de remarquer que certaines liaisons, actives lors du fonctionnement du robot en solo, doivent être rendues passives lors de la coopération, soit par la commande, soit par un désaccouplement de l'actionneur, ce qui offre l'avantage d'une commande plus simple sans contraintes de hautes fréquences.

1.2.2 La collaboration

Afin de présenter la collaboration en robotique, nous suivons la même décomposition que précédemment. Ainsi, la collaboration est dite passive quand les humains n'interagissent pas avec les robots mais que ces derniers doivent prendre en compte leur présence. La collaboration est dite active quand les humains agissent sur les robots en donnant des consignes en temps réel. Les humains peuvent intervenir avec les deux types de robots, par conséquent, nous distinguons deux cas : la collaboration avec les plateformes mobiles et la collaboration avec les bras manipulateurs.

– *Collaboration avec les plateformes mobiles :*
  Les cas de collaboration passive les plus connus sont les robots domestiques qui sont utilisés pour le nettoyage comme le robot aspirateur *Roomba* de *iRobot* (figure 1.10a) ou les robots tondeuses à gazon (figure 1.10b). Les étapes qui ont mené au succès du robot *Roomba* ont été décrites [Jones, 2006] avec comme élément clef le faible coût du celui-ci. Un autre exemple que l'on peut citer est le cas des "robots mules", comme le robot *Sherpa* [NORCAN Sherpa, 2018], qui ont pour mission de suivre un humain de près pour le transport de charges. Ces plateformes mobiles collaboratives doivent avoir la capacité de reconnaitre les obstacles, statiques et dynamiques, les contourner et de suivre en permanence l'opérateur humain. Ces besoins sont remplis grâce à différents capteurs (images, mouvement, etc.) et à des stratégies de commande de plus en plus efficaces [Laneurit *et al.*, 2016].
  Dans le cas de la collaboration active, l'opérateur humain intervient directement sur le robot pour donner une consigne précise de direction. L'exemple de transport (figure 1.10c) [Hirata *et al.*, 2009] présente une stratégie de commande qui

(a) Robot aspirateur *Roomba*, *iRobot*

(b) Robots tailleurs de gazon

(c) Transport collaboratif, [Hirata *et al.*, 2009]

FIGURE 1.10 – Collaboration entre plateformes mobiles et humains

permet aux plateformes mobiles transportant une charge de suivre les consignes de direction données par un opérateur humain en se basant sur la poussée générée sur la charge. Pour cette collaboration, les plateformes mobiles doivent être conformes aux normes sécuritaires en vigueur tout en restant performantes dans la réalisation de leurs tâches respectives.

– *Collaboration avec les manipulateurs :*
Une nouvelle génération de bras manipulateurs est spécialement conçue pour la collaboration active ou passive. Des projets de recherches utilisent ce type de manipulateur dans le but de proposer des méthodes de commande pour la réalisation de tâches collaboratives. Ainsi, dans le cadre du projet *ICARO* pour l'industrie automobile (figure 1.11a), un bras manipulateur collaboratif *Kuka LWR* est utilisé pour l'assemblage des pièces en contrôlant le vissage [Cherubini *et al.*, 2013]. D'autres travaux au sein du *LIRMM* sont menés pour approfondir ce type de collaboration pour des tâches variées [Cherubini *et al.*, 2017]. Dans le contexte de la robotique de service, une méthode de commande pour la réalisation de tâches nécessitant la coordination entre deux bras est présentée [Warren et Artemiadis, 2013]. Ces travaux ont permis de réaliser avec succès des tâches telles que le dévissage du bouchon d'une bouteille d'eau en utilisant un bras manipulateur collaboratif et le bras d'un opérateur humain. Cette collaboration avec des manipulateurs

(a) Montage collaboratif des pièces, [Cherubini *et al.*, 2013]

(b) Manipulation de charges lourdes, [Takubo *et al.*, 2002]

FIGURE 1.11 – Collaboration entre humains et bras manipulateurs

industriels n'est rendue possible qu'en imposant des contraintes sur les vitesses et les couples générés par le robot afin de garantir la sécurité des utilisateurs. D'autres auteurs proposent une méthode de coopération pour la manipulation d'une charge longue avec un manipulateur sériel industriel 7 axes (figure 1.11b) [Takubo *et al.*, 2002].
Face à ces avancées, les médias présentent plus largement cette collaboration homme-robot afin de rassurer l'opinion publique sur le fait que les robots dits collaboratifs ne sont pas développés pour prendre la place de l'opérateur humain mais au contraire pour l'aider dans ses différentes tâches [Axel, 2016; Tobe, 2017]. Ainsi, les tâches habituelles pénibles des opérateurs vont évoluer vers des tâches assistées par les robots tout en assurant la sécurité et en améliorant l'ergonomie du poste de travail.

Il s'avère finalement que les robots collaboratifs nécessitent la mise en place d'un protocole de sécurité qui se traduit à deux niveaux : le premier niveau, matériel, impose des limitations sur les couples générés, l'utilisation de capteurs extéroceptifs avancés, ainsi que des revêtements moussés et amortisseurs des parties dures du robot. Le deuxième niveau, plus largement développé dans la littérature, porte sur la commande qui nécessite la prise en compte de tous types d'informations disponibles. On note cependant qu'un volet important qui s'avère moins traité dans la littérature concerne la conception de ces bras avec des liaisons passives/actives suivant l'utilisation souhaitée.

1.2.3 La coopération des manipulateurs mobiles

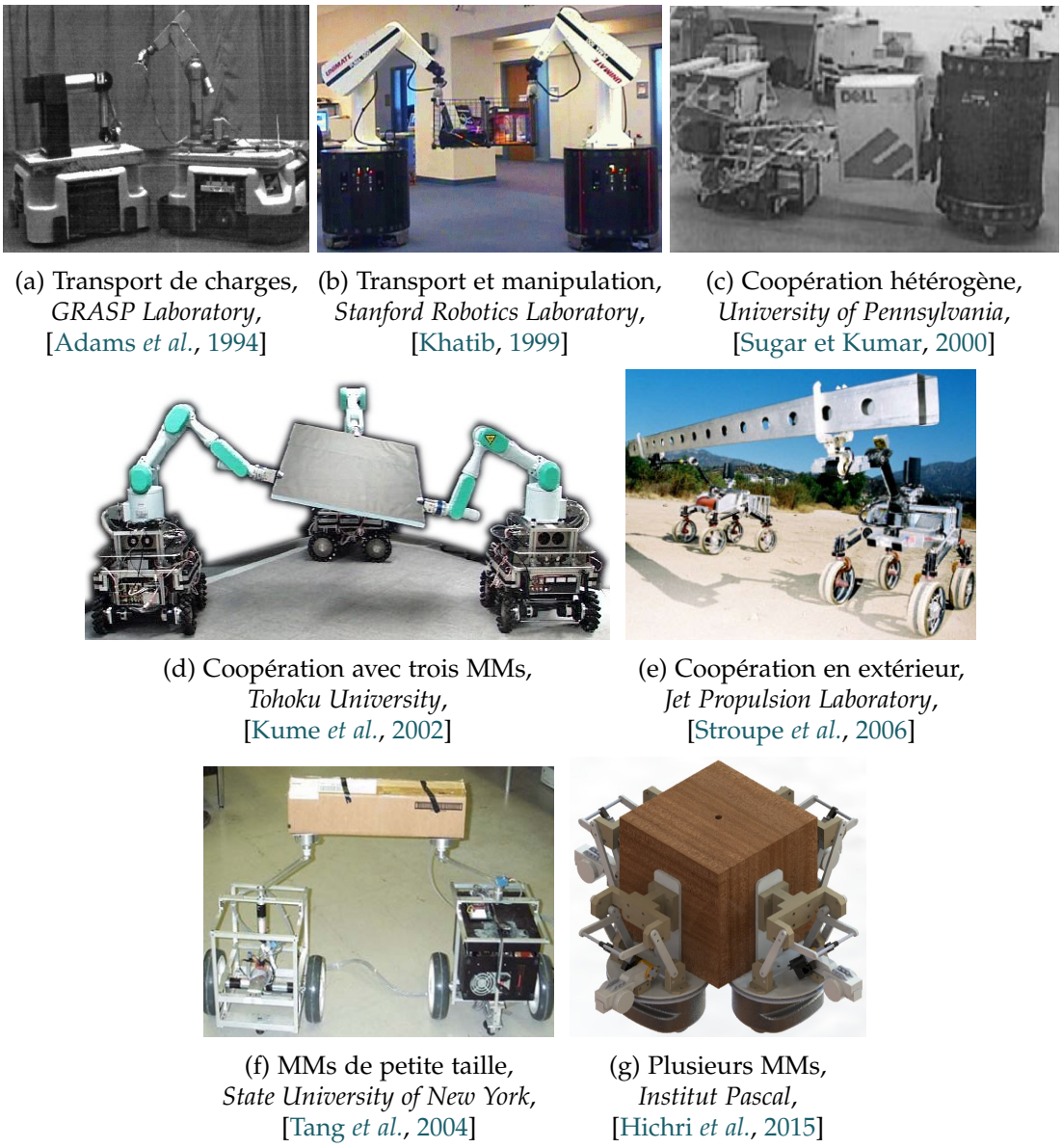
L'étude bibliographique précédente montre que les quelques travaux menés sur la coopération robot-robot et la collaboration homme-robot portent principalement soit sur des robots manipulateurs, soit sur des robots mobiles. L'objectif de la présente thèse porte sur la collaboration/coopération avec/entre manipulateurs mobiles (MMs). L'idée d'utiliser les MMs en coopération est pertinente lorsque le manipulateur mobile ne peut pas réaliser la tâche tout seul, soit parce que la capacité de charge du système robotique n'est pas adaptée aux objets manipulés, soit sa taille n'est pas adaptée à l'espace de travail (passages étroits, etc.). Dans ces cas, on peut faire appel à des MMs de taille moins importante et qui peuvent réaliser la tâche en coopération.

Travail	Nombre de MMs	d.d.l. du manipulateur	Effecteur	Tâches réalisées
[Adams *et al.*, 1994]	2	6	Pince	TC
[Khatib, 1999]	2	4	Pince	TC / M
[Sugar et Kumar, 2000]	2-3	3 / 1 / 1	Fourche et pince	TC -lf
[Kume *et al.*, 2002]	2-3	7	Pince	TC
[Tanner *et al.*, 2003]	2	6	Pince	TC -fo
[Tang *et al.*, 2004]	2	2	Fourche	TC
[Chen et Li, 2006]	3	2	Pince	TC
[Stroupe *et al.*, 2006]	2	4	Pince	TC
[Bolandi et Ehyaei, 2011]	2	5	Pince	TC -o
[Andaluz *et al.*, 2012]	3	3	Pince	TC -o
[Yang et Lee, 2013]	3	2	Pince	TC -o
[Chinelato et de Siqueira, 2013]	2	2	Pince	TC / M
[Hekmatfar *et al.*, 2014]	2	5	Pince	TC -o
[Hichri *et al.*, 2015]	2-4	1	Fourche / Plaque	TC -lo
[Krid *et al.*, 2015]	2	3 / 4	Pince	TC -lo
[Inglett et Rodríguez-Seda, 2017]	2	1	Fourche	TC -l
[Marino, 2017]	4	6	Pince	TC

TABLE 1.1 – Travaux sur coopération des manipulateurs mobiles

TC : Transport de charges ; -l : larges, -f : flexibles, -o : Présence d'obstacles
M : Tâches de manipulation

Le tableau 1.1 présente un ensemble de travaux sur la coopération des MMs en précisant le nombre de robots utilisés pour la réalisation de la tâche, le nombre de ddls du manipulateur utilisé, le type d'effecteur embarqué sur le manipulateur et les tâches réalisées par chaque plateforme. La figure 1.12 présente quelques plateformes expérimentales de travail coopératif de MMs.



(a) Transport de charges, *GRASP Laboratory*, [Adams *et al.*, 1994]

(b) Transport et manipulation, *Stanford Robotics Laboratory*, [Khatib, 1999]

(c) Coopération hétérogène, *University of Pennsylvania*, [Sugar et Kumar, 2000]

(d) Coopération avec trois MMs, *Tohoku University*, [Kume *et al.*, 2002]

(e) Coopération en extérieur, *Jet Propulsion Laboratory*, [Stroupe *et al.*, 2006]

(f) MMs de petite taille, *State University of New York*, [Tang *et al.*, 2004]

(g) Plusieurs MMs, *Institut Pascal*, [Hichri *et al.*, 2015]

FIGURE 1.12 – Manipulateurs mobiles coopératifs

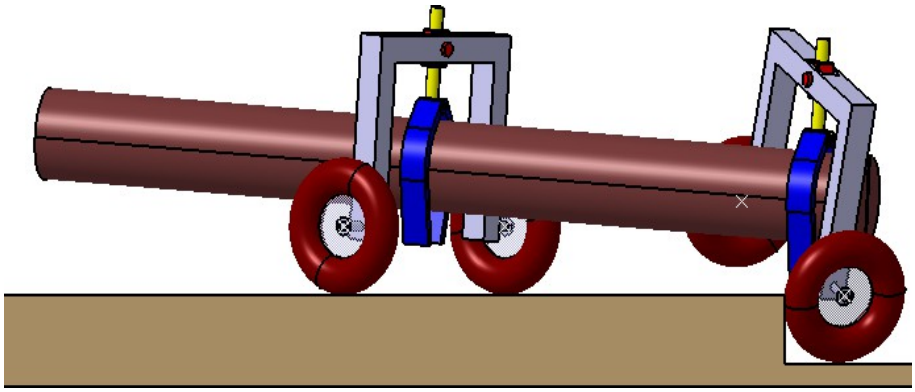
La coopération des MMs débute dès les années 1990 avec l'exemple de coopération entre deux manipulateurs mobiles constitués chacun d'un bras manipulateur à 6 ddls et d'une base mobile unidirectionnelle de type voiture (figure 1.12a) [Adams *et al.*, 1994]. Ce système robotique avait pour tâche le transport tout en effectuant la prise de charges dans un environnement bien structuré. Tout le système est sous surveillance d'un opérateur humain pour une éventuelle intervention en cas de problèmes.

Un deuxième exemple concerne les robots *SAMM* (Stanford Assistant Mobile Manipulators) développés dans le laboratoire d'intelligence artificielle de l'université de

Stanford. Il s'agit de deux manipulateurs mobiles identiques (figure 1.12b) où chacun est composé d'un manipulateur industriel *PUMA 560* à 6 ddls monté sur une base mobile holonome à 3 roues [Khatib, 1999]. L'objectif est de valider les algorithmes de commande pour le transport de charges et des tâches de manipulation. Néanmoins, la tâche de co-manipulation et co-transport par des MMs ne nécessite pas forcément deux robots identiques. L'exemple de la figure 1.12c montre l'utilisation de deux et trois MMs avec des configurations différentes pour les bases mobiles, les manipulateurs et les effecteurs [Sugar et Kumar, 2000, 2002]. Ces MMs ont pour tâche la manipulation et le transport de charges larges et flexibles. Un autre exemple concerne la manipulation coopérative avec trois manipulateurs mobiles identiques (figure 1.12d) [Kume *et al.*, 2002; Fujii *et al.*, 2007].

Pour un environnement moins structuré pour une éventuelle colonisation de l'espace (figure 1.12e), le système robotique *RCC* (Robotic Construction Crew) a démontré sa capacité de manipulation de poutres servant d'éléments modulaires pour les constructions souhaitées [Stroupe *et al.*, 2006].

Cependant, la taille des MMs peut engendrer des problèmes d'accessibilité pour réaliser des tâches en environnement étroit ou encombré. L'exemple de la figure 1.12f montre l'utilisation des MMs de petite taille comparée aux plateformes présentées auparavant [Tang *et al.*, 2004; Abou-Samah *et al.*, 2006]. Un autre exemple concerne le projet C^3Bots (Collaborative Cross and Carry mobile roBots) (figure 1.12g) où la tâche de transport est réalisée par plusieurs MMs de petite taille [Hichri *et al.*, 2015]. Le nombre de robots utilisés dépend de la taille et la morphologie de la charge à manipuler et à transporter et la planification de trajectoire permet d'éviter différents obstacles. Un des objectifs de ce projet consiste à concevoir un système robotique possédant le moins de mobilités actives possibles pour le transport dorsal des charges quelconques. Le projet C^3Bots comporte un second volet consistant à concevoir un système de transport ventral de la charge utile entre les roues des MMs (figure 1.13a), ce qui est bien adapté aux charges longues [Krid *et al.*, 2015; Fauroux *et al.*, 2014]. La figure 1.13b présente un



(a) Transport ventral de charges longues,
[Krid *et al.*, 2015]

(b) Conception adaptée à la charge transportée,
[Inglett et Rodríguez-Seda, 2017]

FIGURE 1.13 – Conception des manipulateurs mobiles coopératifs

autre exemple de MMs simples avec des démonstrateurs de robots à petite échelle et des effecteurs avec au design particulier qui permettent la levée et le transport de charges avec le moins d'actionneurs possibles [Inglett et Rodríguez-Seda, 2017]. D'autres travaux concernent la conception de l'effecteur intégrant un système à ressort pour corriger les erreurs de co-manipulation de la charge par plusieurs MMs [Chen et Li, 2006].

Les plateformes présentées jusqu'ici représentent les travaux cités et référencés dans le tableau 1.1 qui ont abouti à des validations sur des plateformes expérimentales. Les autres travaux cités dans le tableau 1.1 présentent des idées intéressantes qui ont été validées par des simulations numériques. Par exemple le travail de *Hekmaftar* [Hekmatfar *et al.*, 2014] utilise la plateforme *YouBot* de *Kuka* [Bischoff *et al.*, 2011] pour réaliser des simulations sur le transport et la manipulation de charges. Cette tâche a été réalisée avec une méthode de commande robuste à l'aide de quatre MMs [Marino, 2017]. Dans un autre exemple, une méthode utilise les mobilités internes d'un système de MMs coopératif pour reconfigurer la disposition de ceux-ci afin d'éviter les obstacles [Yang et Lee, 2013]. Ces travaux de simulation ont pour objectif de valider des modes de commandes propres au travail coopératif des MMs.

1.2.4 La collaboration avec des manipulateurs mobiles

En ce qui concerne la collaboration des manipulateurs mobiles avec des opérateurs humains, celle-ci est encore plus délicate que la coopération car elle nécessite la maîtrise du mouvement de la base mobile et du manipulateur tout en assurant la sécurité de l'opérateur. De manière générale, la plupart des plateformes et travaux menés sur la coopération peuvent être utilisés pour la collaboration en limitant les performances des robots. Ainsi, les travaux s'appuyant sur le système *SAMM* ont été menés pour réaliser la manipulation de charges avec un opérateur humain (figure 1.14a). Le travail le plus avancé dans cette collaboration est présenté à la figure 1.14b. Deux à trois MMs holonomes, équipés de bras manipulateurs à 6 ddls chacun, collaborent avec un opérateur humain pour le transport et la manipulation d'une charge. Le système robotique récupère la consigne d'effort donnée par l'opérateur pour réaliser le mouvement souhaité [Hirata *et al.*, 2005].

(a) Manipulation collaborative, *Stanford Robotics Laboratory*, [Khatib, 1999]

(b) Manipulation et transport collaboratifs, *Tohoku University*, [Hirata *et al.*, 2005]

FIGURE 1.14 – Manipulateurs mobiles collaboratifs

En analysant les différents travaux sur la coopération et la collaboration des MMs, il ressort que la tâche la plus couramment traitée concerne le transport de charges rigides ou flexibles, avec ou sans présence d'obstacles. La manipulation des charges est moins présente et elle est plus spécifiquement abordée dans le cadre de la coopération et collaboration des bras manipulateurs. On peut noter cependant que les tâches à réaliser en contexte industriel, non encore robotisées, nécessitent à la fois de la préhension, de la manipulation et du transport, ce qui laisse un large champ d'étude pour la proposition de nouvelles solutions.

1.3 Défis des manipulateurs mobiles

Nous présentons tout d'abord les défis auxquels font face les manipulateurs mobiles et leur coopération en vue d'une intégration plus forte en contexte industriel ou de service. Ceux-ci sont issus de la litérature et des travaux menés au sein de l'Institut Pascal et de l'IRSTEA. Ils peuvent se résumer en trois points :

1.3.1 Élargissement des domaines d'utilisation

Le besoin de développement des manipulateurs mobiles coopératifs est lié d'une part à la diminution ou la suppression des tâches pénibles et l'accroissement des performances dans le domaine industriel et des services. Un bilan sur les utilisations possibles des manipulateurs mobiles avec plusieurs scénarios industriels a montré que ceux-ci sont déjà prêts pour être intégrés [Bøgh *et al.*, 2012]. Cependant, cette étude ne prend pas en compte leur utilisation coopérative et modulaire. D'autre part, l'émergence du concept de *L'industrie 4.0* ou *l'usine du futur* pousse les industriels à trouver et intégrer des solutions répondant aux problèmes majeurs [EFFRA, 2013; HORSE, 2015; Besse, 2016; Haehnsen, 2016; Institut Montaigne, 2018] que doivent surmonter les nouveaux concepts de MMs que sont principalement la modularité et la reconfigurabilité :

- *Modularité :*
  La modularité concerne l'utilisation du système robotique sous forme de modules, ajustables en nombre selon le besoin et les contraintes de la tâche et de l'environnement. D'un point de vue industriel, l'utilisation des robots modulaires a révélé les problèmes de commande auxquels doivent faire face ce type de robots [Brogårdh, 2007].

- *Reconfigurabilité :*
  La reconfigurabilité consiste à modifier rapidement et à moindre coût la configuration de l'espace de travail en utilisant des composants modulaires définissant ainsi un système reconfigurable.

Des projets sont initiés pour proposer de nouvelles solutions pour les MMs comme le projet *CoRot* qui vise à développer les briques logicielles pour permettre à des MMs de réaliser différentes tâches dans un environnement industriel et reconfigurable [CoRot, 2017]. Dans le domaine de l'agriculture, différents rapports incitent les acteurs de la recherche et développement à concevoir des solutions robotiques adaptables et modulaires pour *"mieux exploiter la diversité fonctionnelle des agrosystèmes"* [Bournigal, 2014], avec des outils interchangeables et des machines qui remplacent les opérateurs humains dans les tâches à risques [Clouvel *et al.*, 2015]. Le projet *"Adap2e"* en cours de développement en est une illustration. il vise à concevoir des plateformes reconfigurables et

modulaires pour la réalisation de différentes applications [IRSTEA, 2017].

1.3.2 Conception de nouvelles architectures

L'état de l'art sur les MMs réalisé par *Gifford* [Gifford, 2006] présente le manipulateur mobile comme l'association d'une base mobile et un ou plusieurs bras manipulateurs. Cette association sans connaissances à priori de la tâche et de l'environnement peut créer des difficultés lors de la réalisation de celle-ci. Certes, concevoir un MM pour chaque tâche n'est pas possible vu le nombre important de tâches à réaliser, comme par exemple sur une ligne d'assemblage, mais l'idée est de concevoir un MM qui peut réaliser toute une famille d'opérations. L'intégration des contraintes de la tâche et de l'environnement permettent d'aboutir à des solutions optimisées avec par exemple l'intégration du bras manipulateur sur rail [Acaccia *et al.*, 2003]. Une démarche plus générale [Angeles et Park, 2008] consiste à prendre en compte toutes les étapes à valider pour arriver à une architecture respectant le cahier des charges. Celles-ci concernent, parmi d'autres critères, le choix des actionneurs et la structure de l'effecteur qui sont indissociables dans la conception :

- *Choix des actionneurs :*
  Les actionneurs sont choisis en fonction du cahier des charges sur des critères tels que puissance, dimension, poids, etc. Dans le cadre de la coopération, des auteurs proposent l'utilisation des liaisons passives/actives afin de réaliser la tâche voulue avec plus de rigidité [Osumi, 1996]. Un autre exemple concerne la correction des erreurs de positionnement des bases mobiles, réalisée à l'aide des liaisons passives des manipulateurs [Tang *et al.*, 2004].

- *Adaptabilité des effecteurs :*
  La plupart des MMs sont équipés d'effecteurs simples pour la réalisation de la tâche de transport de charges et de manipulation. Par conséquent, si l'on veut que ces systèmes soient plus flexibles, l'utilisation d'autres effecteurs est nécessaire. Ainsi, un système de changement d'outil permettra au MM d'être reconfigurable pour plusieurs tâches. Pour des tâches coopératives, et suivant le type de commande retenu, les effecteurs doivent aussi être modifiés pour s'adapter à la tâche. Des auteurs proposent par exemple l'ajout d'un ressort pour rendre le robot compliant [Chen et Li, 2006].

- *Respect des normes de la robotique collaborative :*
  Les manipulateurs mobiles sont amenés au minimum à partager l'espace de travail avec des opérateurs humains que ce soit en milieu industriel ou de service. Cela impose aux MMs de respecter toutes les normes de la robotique collaborative (section 1.1.1) en plus des normes propres à la robotique mobile, comme le projet *ISO DIS 19 649* qui vise à harmoniser le vocabulaire et le projet *NWIP 21260* qui définit la notion de contact entre la partie mobile des robots et l'opérateur humain [J'automatise News, 2017].

1.3.3 Modélisation et commande des manipulateurs mobiles

Les MMs sont principalement composés de deux entités, un bras manipulateur et une base mobile. Concernant les bras manipulateurs, la modélisation et la commande sont largement couvertes dans la littérature puisque les premiers développements datent des années 1960. Concernant les bases mobiles, leur modélisation et commande sont bien

maitrisées elles aussi dans la littérature [Tzafestas, 2013] et les problématiques traitées sont liées à leur positionnement, stabilisation, évitement des obstacles et le suivi des trajectoires [Ortigoza *et al.*, 2012]. La modélisation et la commande des MMs ont été traitées [Bayle *et al.*, 2003; Mashali, 2015] et un certain nombre de travaux portent sur la coopération entre les MMs (section 1.2.3). Les difficultés supplémentaires liées à la coopération concernent les singularités et les redondances :

- *Singularités :*
  Les singularités sont des positions dans lesquelles le système robotique n'est plus commandable. De nouvelles singularités apparaissent lors de la coopération de robots lorsque le système devient une structure parallèle [Gosselin et Angeles, 1990]. Ces singularités doivent être détectées et des stratégies pour les éviter ou les traverser doivent être incorporées dans la commande générale du système robotique.

- *Redondances :*
  Par définition, le robot est redondant lorsqu'il possède un degré de liberté (ddl) supérieur au degré de la tâche [Chiaverini *et al.*, 2008]. Cette redondance peut être utilisée pour optimiser la performance du système robotique et éviter les obstacles, les positions singulières, etc., mais elle introduit des problèmes dans la commande [Freddi *et al.*, 2016]. Pour un manipulateur mobile, celui-ci est considéré redondant s'il possède plus de 6 ddls indépendamment de la tâche. Si l'on associe des MMs pour réaliser des tâches en coopération, cette redondance pourra être utilisée pour changer la posture du système robotique sans changer la configuration de la charge [Yang et Lee, 2013]. Néanmoins, la gestion des redondances devient plus compliquée.

Toutes ces contraintes doivent être prises en compte lors de l'élaboration du schéma de commande. Les aspects modélisation et commande des MMs seront plus amplement développés au chapitre 4.

1.4 Objectifs de la thèse

L'intérêt porté aux MMs coopératifs dans les applications industrielles et de service se renforce mais suscite encore de nombreux travaux. Cette thèse se situe à la croisée de différents travaux menés à l'Institut Pascal dans le thème *Machines, Robots et Systèmes Industriels (MRSI)* de l'axe *M3G* (Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Génie Industriel) et le thème *Modélisation, Autonomie et Contrôle dans les Systèmes Complexes* (MACCS) de l'axe *ISPR* (Image, Systèmes de Perception, Robotique). Ces travaux s'inscrivent dans le défi "*véhicules et machines intelligents*" du LabEx *IMobS*^{3} (*Innovative Mobility : Smart and Sustainable Solutions*). Ils constituent une des continuités possibles du projet *C*^{3}*Bots* [Hichri *et al.*, 2014] avec une étude étendue de l'architecture des MMs pour réaliser d'autres tâches que la manipulation et le transport de charges.

Par rapport à l'architecture classique des MMs présentés, composés de l'association d'une base mobile et d'un bras manipulateur classique, nous proposons une démarche de conception intégrée des fonctions de mobilité et de préhension, en configuration seule ou coopérative pour la réalisation des tâches. Les principaux objectifs sont donc :

- Appliquer une démarche de synthèse structurale basée sur la prise en compte des contraintes des différentes tâches et les paramètres structuraux à savoir la connectivité, la mobilité, la redondance et le degré d'hyperstatisme afin de répondre au

mieux au cahier des charges.

- Minimiser le nombre d'actionneurs du MM afin de limiter les problèmes de singularité et de redondance, et également diminuer le coût de revient.
- Prendre en compte la globalité de l'architecture du MM dans les différentes modélisations (géométriques, cinématiques) et le développement de la commande.

Cette démarche nécessite de préciser au préalable les tâches et les scénarios envisagés afin de définir plus précisément le cahier des charges des MMs.

Conclusion

L'état de l'art présenté dans ce premier chapitre montre que les MMs sont très largement constitués d'un bras manipulateur assez classique à 6 ddls associés à une base mobile à roues. Ils sont principalement dédiés à des tâches de coopération bien qu'un certain nombre de travaux abordent l'aspect collaboratif. Cette transition ne modifie pas particulièrement la structure du manipulateur mobile mais nécessite l'intégration de capteurs extéroceptifs et l'adaptation de la commande afin de garantir la sécurité des opérateurs ou des problématiques d'évitement d'obstacles. Dans le cadre de nos travaux, nous allons plus particulièrement nous concentrer sur l'aspect coopératif, l'aspect collaboratif pouvant être traité dans un second temps.

Il ressort également que les tâches les plus largement abordées concernent le transport de charges rigides ou flexibles et que la préhension et la manipulation sont plus spécifiquement abordées dans le cadre de la coopération, collaboration des bras manipulateurs. Quelques travaux intègrent la manipulation en proposant des solutions qui cherchent à minimiser le nombre de degrés de mobilité de la structure.

Nos travaux se positionnent dans ce cadre où nous souhaitons proposer de nouvelles architectures minimisant le nombre de mobilités, permettant de réaliser des tâches de préhension, manipulation et de transport pour des objets divers en taille et poids, soit par un MM seul ou en coopération afin de tirer partie au mieux du changement de configuration sérielle/parallèle.

Le deuxième chapitre précise les tâches et scénarios envisagés en configuration MM seul ou coopératif, le cahier des charges et l'analyse structurale. Le troisième chapitre est consacré à la proposition de nouvelles architectures de MM basées sur la démarche de synthèse structurale. Le quatrième chapitre est consacré plus spécifiquement à la partie modélisation et commande de la solution de MM envisagée.

Chapitre 2

Système robotique coopératif et analyse structurale

Sommaire

2.1 Système robotique coopératif 28
2.2 Les tâches et scénarios envisagés pour les MMs 29
2.2.1 Tâches de manipulation 29
2.2.2 Tâches de fabrication industrielle 32
2.2.3 Tâches de services 34
2.3 Manipulation et transport d'objets en contexte industriel 37
2.3.1 Contraintes et environnement 37
2.3.2 Phases de réalisation de la tâche en m-bot 39
2.3.3 Phases de réalisation de la tâche en p-bot 41
2.3.4 Structure cinématique des manipulateurs mobiles 43
2.4 Analyse structurale des manipulateurs mobiles 44
2.4.1 Paramètres structuraux des manipulateurs mobiles 45
2.4.2 Recherche d'une liaison équivalente au contact roue-sol 46
2.4.3 Méthode de calcul des paramètres structuraux des m-bots 48
2.4.4 Méthode de calcul des paramètres structuraux des p-bots 53
Conclusion 58

Ce deuxième chapitre est consacré à la présentation du système robotique coopératif et son analyse structurale. Nous présentons tout d'abord les tâches et scénarios envisageables pour les MMs seuls ou en coopération, puis nous précisons les tâches industrielles envisagées. La deuxième partie présente les paramètres structuraux et l'analyse structurale des MMs.

2.1 Système robotique coopératif

Dans la suite de nos travaux, le système robotique modulaire coopératif considéré est présenté sous forme de schéma cinématique simplifié entre les différentes composantes du système (figure 2.1).

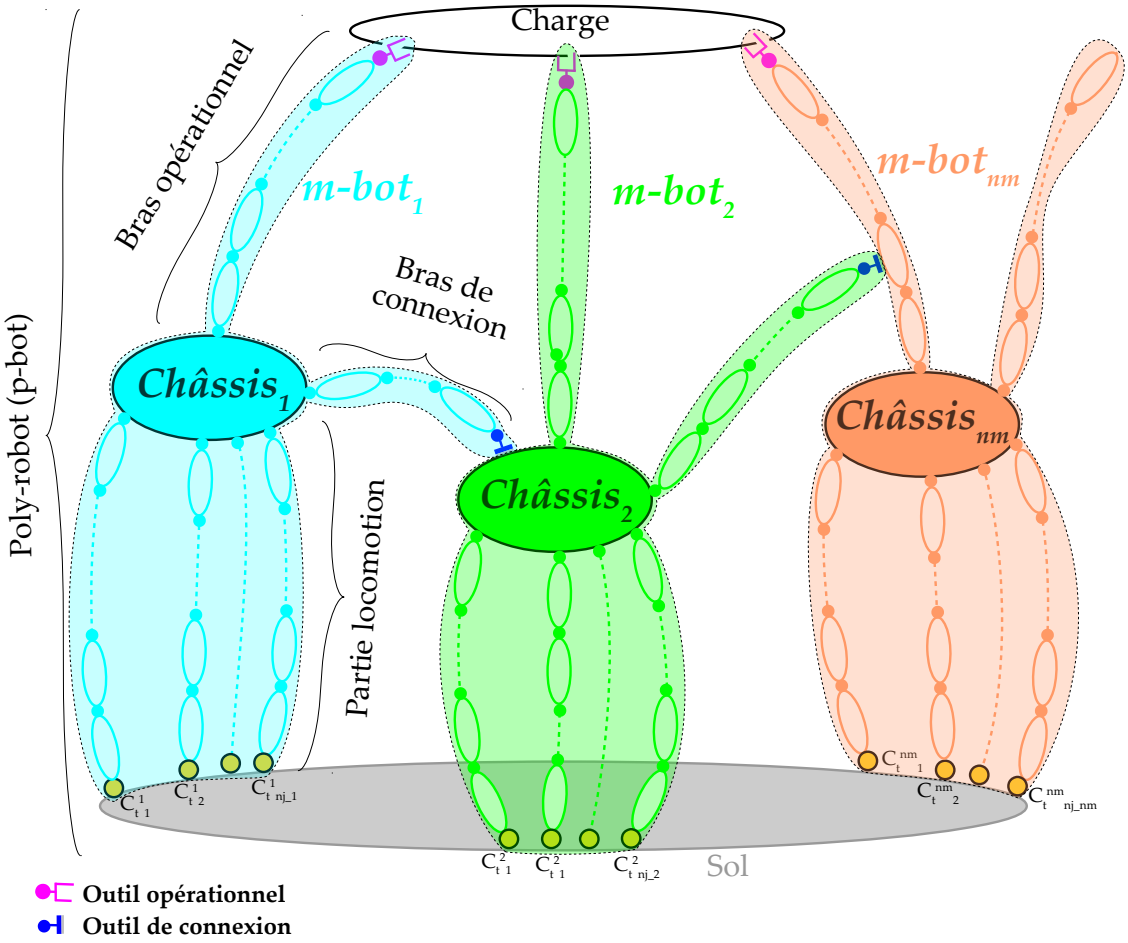


FIGURE 2.1 – Système robotique à base de manipulateurs mobiles modulaires coopératifs

Ce système appelé poly-robot (p-bot) est composé de n_m mono-robots (m-bots) qui interagissent entre eux pour réaliser la tâche désirée. Chaque m-bot est un manipulateur mobile composé de deux parties : partie locomotion et partie manipulation.

- *Partie locomotion :*
  Elle est responsable de la locomotion du m-bot et peut être constituée de tous les types d'organes de locomotion possibles présentés à la section 1.1.2 (roues, pattes, chenilles, etc.). Elle est composée de chaînes cinématiques appelées jambes, au nombre de n_j qui peut être différent pour chaque m-bot. Chaque jambe a un contact avec le sol noté Ct^i_j, avec i le numéro de m-bot variant entre 1 et n_m et j le numéro de jambe variant entre 1 et $n_j_n_m$. Suivant le type d'organe de locomotion considéré dans l'application, le contact pourra être de type roue-sol, pattes-sol, etc.

- *Partie manipulation :*
  Elle est connectée directement à la partie locomotion ou par un solide intermé-

diaire (châssis par exemple). Elle est composée de chaînes cinématiques appelées bras au nombre de n_b qui dépend du m-bot. Chaque bras peut être utilisé soit pour la réalisation de la tâche (manipulation de charges, perçage, etc.), soit pour la connexion entre m-bots. On parle ainsi respectivement de bras opérationnel ou de bras de connexion. Pour ce dernier, la connexion peut se faire sur le châssis d'un autre m-bot ou sur l'une de ses chaînes cinématiques de sa partie manipulation. Chaque type de bras est équipé d'un outil qui lui permet la réalisation de sa fonction. Nous distinguons deux types d'outil : les outils opérationnels (pince, perceuse, etc.) ou les outils de connexion (pince, connecteur, etc.). Par conséquent, la fonction du bras est déterminée par l'outil porté. Ainsi, un système d'outils interchangeables, comme celui présenté par *Ang* [Ang et Tourassis, 1989], permet la modularité de la partie manipulation du m-bot.

La structure des MMs est composée de plusieurs jambes pour la partie locomotion, plusieurs bras pour la partie manipulation, associés à différents outils interchangeables, permettant ainsi une très grande flexibilité dans les tâches envisagées.

2.2 Les tâches et scénarios envisagés pour les MMs

Les opérations envisagées dans nos travaux concernent des tâches de manipulation, de transport et de fabrication en contexte industriel, voir en robotique de service. Pour chaque application, nous présentons des scénarios à base de MMs coopératifs qui illustrent l'intérêt de tels systèmes.

2.2.1 Tâches de manipulation

Nous présentons dans cette section trois exemples de tâches pouvant intégrer des MMs coopératifs. La première tâche est le *Pick & Place*, tâche omniprésente dans plusieurs secteurs d'activité comme l'industrie manufacturière, l'agroalimentaire, etc. Les deux autres tâches concernent plus spécifiquement le secteur automobile avec les tâches de *Kitting* et la manipulation en bord de ligne.

2.2.1.1 *Pick & Place*

Dans une chaîne robotisée, la tâche de *Pick & Place* consiste à manipuler des objets pour les transférer d'un tapis roulant vers un autre tapis ou vers des boites de rangement (caisses, cartons, etc.). Cette tâche est généralement réalisée par différentes architectures de robots dont les deux références les plus connues sont les robots sériels de type *SCARA* (figure 1.1d) et les robots parallèles de type *FlexPicker* d'*ABB* ou *Quattro* d'*Adept-Omron* (figure 1.3b). Ces robots sont très performants en terme de capacité cinématique mais restent limités en terme de capacité de charge pour les robots sériels, et d'espace de travail pour les robots parallèles. Par conséquent, un compromis est possible en utilisant un système coopératif à base de MMs.

Nous considérons l'exemple de transfert d'objets de type caisse **A** et **B** du tapis roulant **T1** au deuxième tapis **T2** présenté à la figure 2.2. Les deux types de caisses ne peuvent pas être manipulés par le même manipulateur à cause des différentes tailles et poids. Pour cet exemple, nous considérons les deux MMs munis de quatre jambes de locomotion ($n_j = 4$), le $m\text{-}bot_1$ et le $m\text{-}bot_2$ sont équipés chacun de deux chaînes cinématiques de manipulation ($n_b = 2$) utilisées comme des bras opérationnels. Deux modes sont possibles pour l'utilisation de ces MMs dépendant de type d'objet à manipuler :

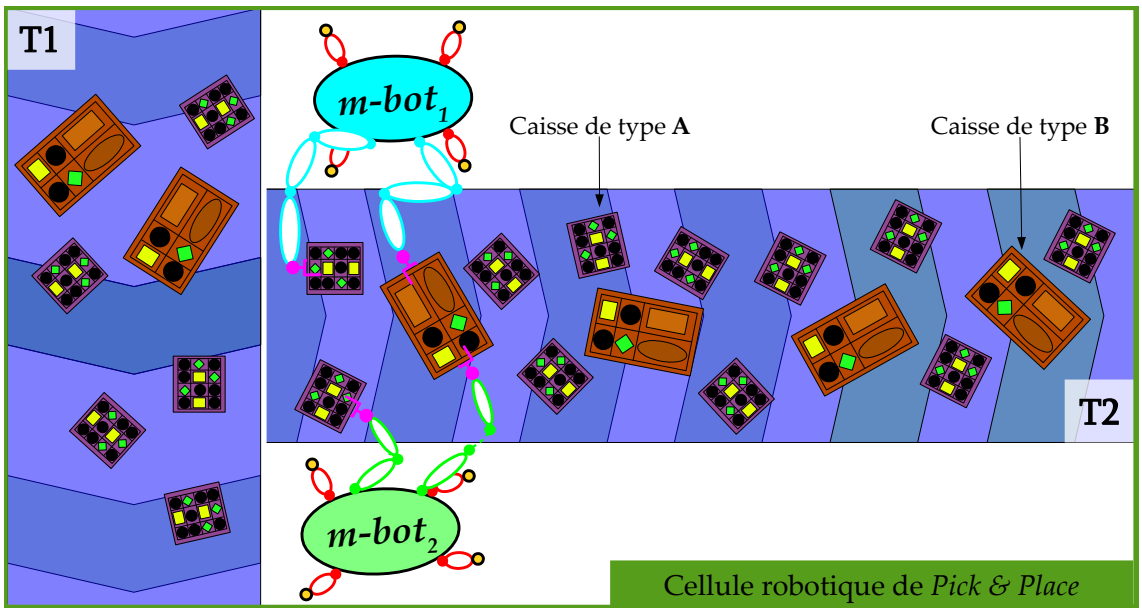


FIGURE 2.2 – Tâche de *Pick & Place*

– *Scénario m-bot :*
  Dans ce mode, chaque bras opérationnel des MMs est considéré comme un manipulateur sériel qui va permettre de manipuler uniquement les caisses de type **A**.

– *Scénario p-bot :*
  Dans le cas des caisses de type **B** arrivant sur le tapis **T1**, les deux m-bots vont coopérer pour manipuler cette charge plus lourde que la charge **A**. Ainsi, un bras de chaque m-bot est associé à la saisie de la caisse. Durant cette manipulation, les deux m-bots et la caisse forment une structure parallèle permettant la manipulation de charges lourdes.

Cette utilisation des MMs permet de s'adapter au flux des caisses sur les tapis roulants. On peut ainsi combiner les deux modes m-bot et p-bot en fonction des caisses présentes sur le tapis **T1**. Si la gestion de flux à deux MMs ne suffit pas, d'autres MMs peuvent êtres utilisés.

2.2.1.2 *Kitting*

La tâche de *Kitting* est très présente dans le secteur automobile. Elle consiste à réaliser des *Kits* de pièces, rangés dans des caisses, pour suivre le montage final de la voiture (figure 2.10). Par exemple, un kit pour le montage d'une portière regroupe toutes les petites et moyennes pièces nécessaires à cet effet (visserie, joints, accessoires, etc.). Cette tâche fait partie des défis du groupe *PSA* [Groupe PSA, 2016]. On considère dans cette tâche que la préhension des objets est maitrisée. Le scénario présenté à la figure 2.3 fait intervenir trois MMs : le *m-bot*$_1$ réalise les kits de petites pièces qu'il peut manipuler tout seul. Les *m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$ coopèrent pour réaliser des kits de pièces volumineuses et/ou lourdes. Nous supposons que chaque MM possède quatre jambes de locomotion ($n_j = 4$), et pour le besoin de cette tâche, chaque m-bot est équipé de trois chaînes cinématiques de manipulation ($n_b = 3$) qui sont toutes des bras opérationnels.

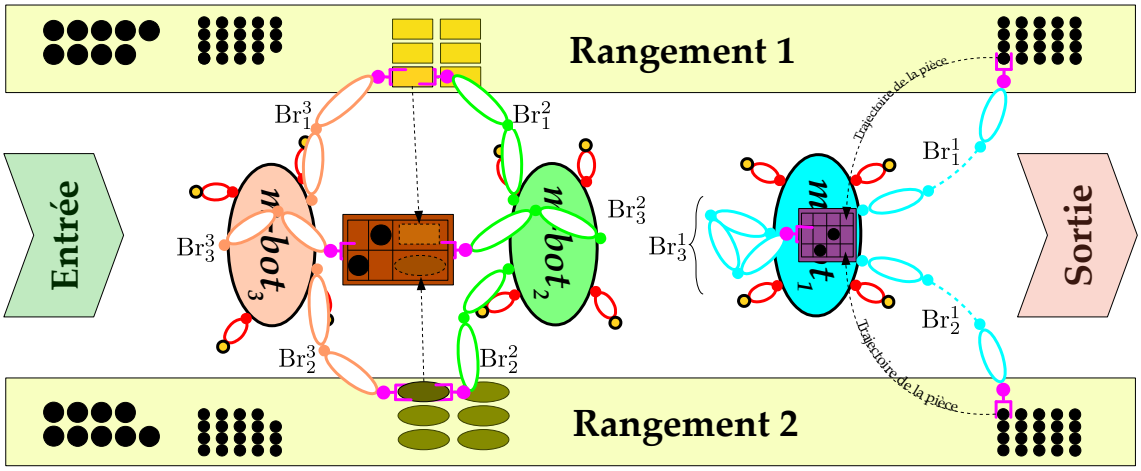


FIGURE 2.3 – Tâche de kitting

- *Scénario m-bot :*
  Dans ce cas, le *m-bot*$_1$ parcours l'allée entre les deux rangements des pièces en remplissant la caisse tenue au dessus du corps du robot avec le bras opérationnel noté Br_3^1, tandis que les bras Br_1^1 et Br_2^1 prennent les pièces dans les rangements 1 et 2 respectivement. L'utilisation simultanée des bras Br_1^1 et Br_2 permet la prise de différentes références de pièces en même temps. Par ailleurs, l'utilisation du bras opérationnel Br_3^1 tenant la caisse permet par exemple le positionnement de celle-ci sur un tapis roulant à la sortie de l'allée.

- *Scénario p-bot :*
  Dans le cas d'utilisation des MMs en coopération, ceux-ci sont utilisés pour former des kits composés de pièces de taille et poids qu'un m-bot seul ne peut manipuler. Ainsi, chaque m-bot est équipé de trois bras opérationnels (Br_1^2, Br_2^2 et Br_3^2 pour le *m-bot*$_2$ et Br_1^3, Br_2^3 et Br_3^3 pour le *m-bot*$_3$) : les bras 1 et 2 servent à la manipulation des pièces et le bras 3 permet la saisie de la caisse. Cette configuration permet également les mêmes manipulations qu'un m-bot seul.

Cette configuration des MMs permet l'adaptation d'approvisionnement des chaînes de montage pour chaque référence de voiture. L'adaptation entre petits et grands kits n'est pas difficile à réaliser car les MMs sont identiques et cela se traduit par un changement de mode entre m-bot et p-bot.

2.2.1.3 Manipulation en bord de ligne

Cette tâche est présente dans différents secteurs industriels et consiste à ranger les produits issus de la ligne de fabrication. Généralement, cette tâche est réalisée par des opérateurs humains et elle nécessite des efforts physiques importants qui peuvent causer des troubles musculosquelettiques (*TMS*). Dans certains cas particuliers, cette tâche est réalisée par des robots manipulateurs fixés en bord de ligne. Cette solution est optimale pour des charges et emplacements identiques à chaque itération. Le problème se pose avec les nouvelles unités de fabrication de l'usine 4.0 où l'objectif est d'obtenir une adaptabilité maximale aux lignes de fabrication permettant de gérer plusieurs références de produit à la fois. Ainsi, une solution à base de MMs coopératifs peut amener la souplesse et la modularité nécessaire pour ce type de tâches. Les scénarios proposés à

la figure 2.4 consistent à ranger des caisses qui arrivent en flux variable du tapis roulant et de les ranger dans des racks avant leurs acheminements vers d'autres emplacements. Nous considérons les deux caisses présentées dans les tâches précédentes (caisses **A** et **B**) et nous reprenons les mêmes hypothèses que les structures des m-bots de la tâche de *Pick & Place*. Les MMs sont équipés de mobilités qui leurs permettent de poser les caisses sur différentes hauteurs de racks et chaque m-bot est équipé de deux bras opérationnels.

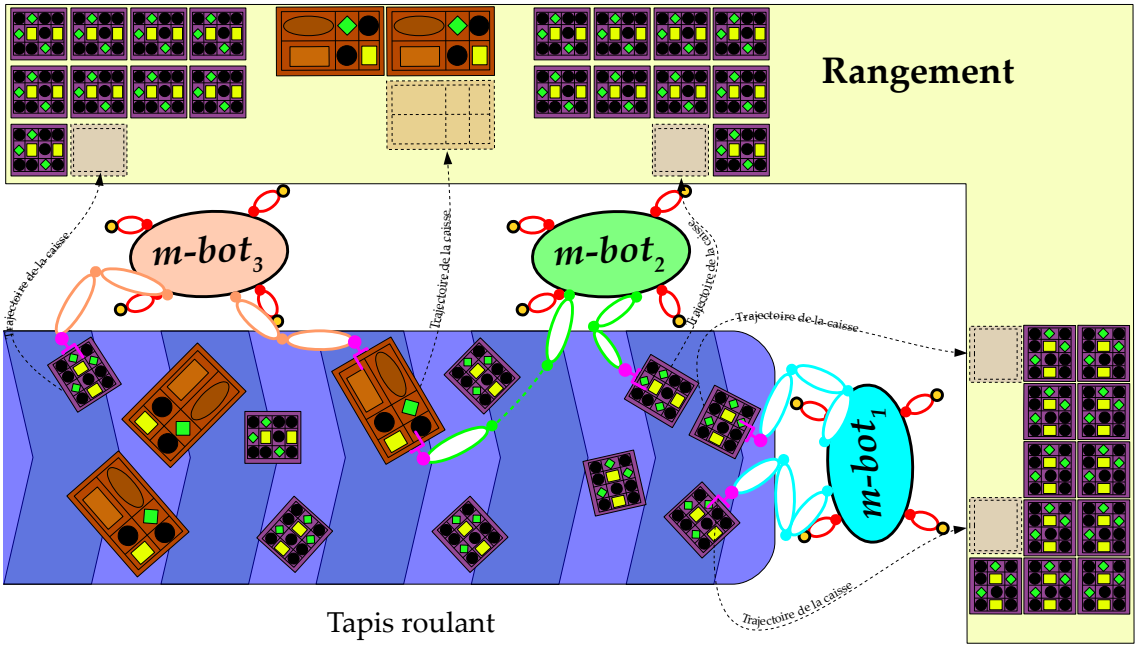


FIGURE 2.4 – Tâches de manipulation en bord de ligne

Dans le scénario m-bot réalisé par le *m-bot*$_1$, les bras vont permettre de manipuler deux caisses de type **A** en même temps. Dans le scénario coopératif à deux MMs réalisé par les *m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$, chaque bras libre peut manipuler une caisse **A**. Dans le cas d'une caisse **B**, la manipulation sera réalisée soit par deux bras du même m-bot (sous réserve de stabilité suffisante) ou bien par la coopération de deux MMs, chacun utilisant un bras pour la tâche, ce qui permet de bénéficier de la stabilité du p-bot grâce à son polygone de sustentation élargi (figure 2.4). Cette adaptabilité permet de garder un flux continu du tapis roulant et ne pas, par exemple, attendre qu'un bras du m-bot finisse sa manipulation de la caisse **A** pour pouvoir manipuler la caisse **B**.

2.2.2 Tâches de fabrication industrielle

En plus des tâches de manipulation classiques des MMs, ceux-ci peuvent être également utilisés pour réaliser davantage d'opérations du secteur industriel ou de service. Ces MMs peuvent être utilisés pour des opérations de fabrication (fraisage, polissage, etc.) ou dans des tâches d'assemblage (collage, vissage, etc.). L'ensemble de ces opérations peut être réalisé en utilisant les MMs dans deux configurations différentes : à poste fixe ou à poste mobile.

2.2.2.1 Opérations à poste fixe

Nous prenons comme exemple des opérations de perçage réalisées au sein d'une cellule robotique dédiée. Les perçages sont réalisés dans une tôle avec une station de

perçage (figure 2.5).

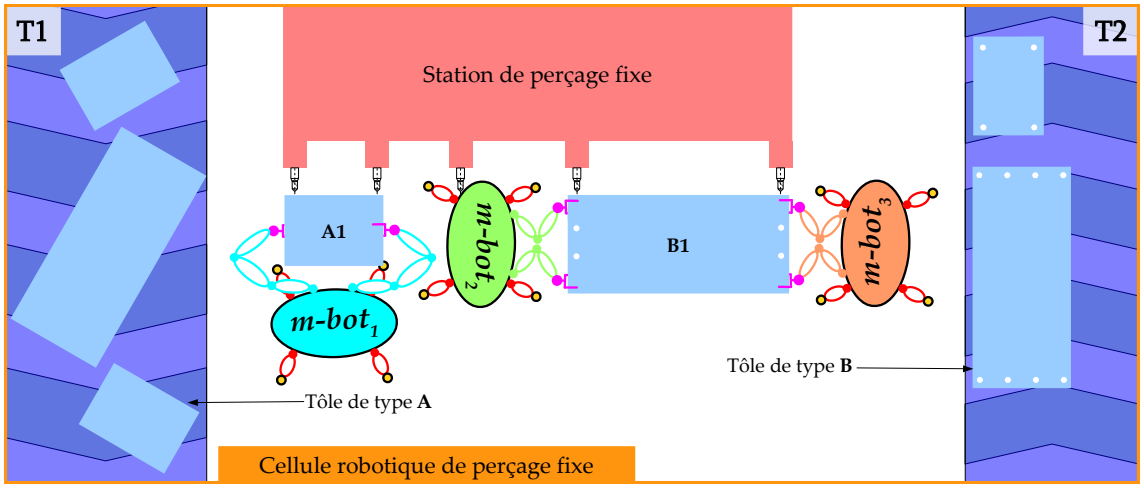


FIGURE 2.5 – Tâches de perçage à poste fixe

La tâche consiste à amener la pièce vers la station de perçage et la manipuler pour réaliser les perçages désirés. Les scénarios m-bot et p-bot comme pour les tâches précédentes, dépendent de la taille des pièces à manipuler (dimensions et poids de la tôle) :

- *Scénario m-bot :*
  La tôle est manipulée par le *m-bot*$_1$ qui prend la pièce **A1** sur le tapis roulant **T1**. Cette pièce est bien adaptée pour la manipulation à un seul MM en terme de taille et de poids. Ensuite, tout en gardant une stabilité quasi-statique, le m-bot s'avance vers la station de perçage pour effectuer les opérations demandées. Les perçages sont réalisés un à un grâce à un guidage effectué par le m-bot. La pièce **A1** est ensuite déposée sur le tapis roulant **T2** qui va l'évacuer de la cellule.

- *Scénario p-bot :*
  Dans ce scénario, les deux m-bots *m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$ manipulent ensemble la charge **B1** formant ainsi un p-bot à structure complexe. Par conséquent, la tôle est véhiculée vers la station de perçage puis guidée pour effectuer les perçages nécessaires. Une fois la tâche réalisée, la charge **B1** est alors déposée sur le tapis **T2** pour l'acheminement en dehors de la cellule.

Dans cette organisation, les trois m-bots peuvent s'échanger les rôles en fonction des tôles acheminées par le tapis roulant **T1**. En cas de demande forte sur les pièces de type **A**, chaque m-bot manipulera une pièce, tandis que dans le cas de demande forte sur les pièces **B**, un quatrième m-bot sera appelé en renfort pour la manipulation coopérative des tôles.

2.2.2.2 Opérations à poste mobile

Dans cette configuration, l'outil est porté par le MM qui se déplace dans l'espace de travail. Nous considérons comme exemple une opération de polissage de pièces (figure 2.6) où l'alimentation est réalisée par le tapis roulant **T1** et les pièces finies seront évacuées sur le tapis **T2**.

Dans ce cas, les outils de ponçage sont portés par des m-bots *opérationnels* (*m-bot*$_i$, *m-bot*$_{ii}$ et *m-bot*$_{iii}$), tandis que les pièces sont portées par les autres m-bots dits *de manipu-*

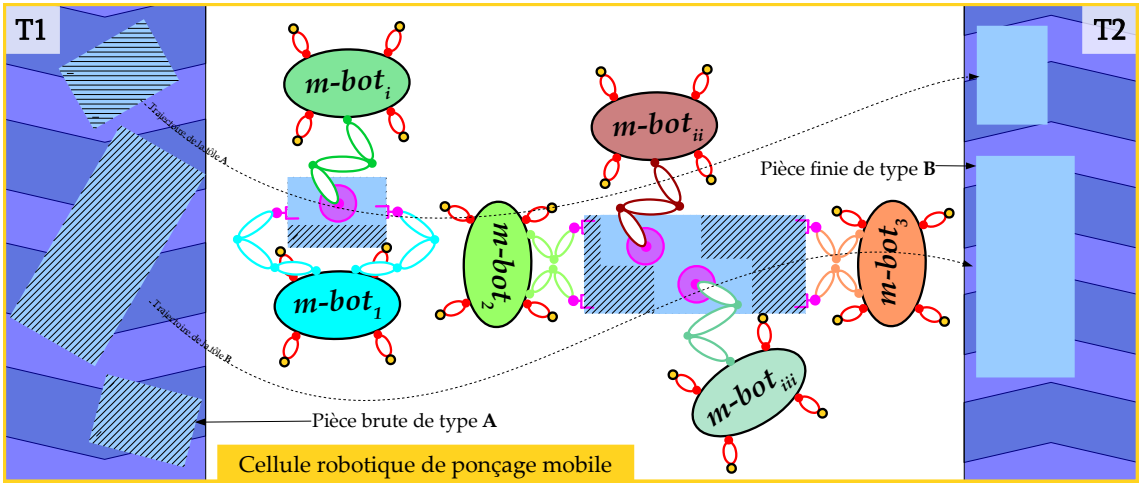


FIGURE 2.6 – Tâches de ponçage à poste mobile

lation (*m-bot*$_1$, *m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$). Par conséquent, le scénario m-bot ou p-bot va dépendre des caractéristiques des pièces à poncer :

- *Scénario m-bot :*
  Dans ce scénario, le *m-bot*$_1$ de manipulation saisit une pièce de type **A** du tapis **T1** pour ensuite la déposer sur le tapis **T2**. Entretemps, le m-bot opérationnel *m-bot*$_i$ va réaliser sa tâche en coordination avec le m-bot de manipulation.

- *Scénario p-bot :*
  Étant donné que les pièces de type **B** sont plus volumineuses et lourdes que les pièces **A**, leurs manipulations nécessitent au minimum deux m-bots (*m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$) qui vont former le p-bot de manipulation. Une fois les pièces saisies, les m-bots opérationnels (*m-bot*$_{ii}$ et *m-bot*$_{iii}$) vont suivre le p-bot constitué dans son trajet pour réaliser les opérations de ponçage. Dans ce cas, plusieurs m-bots opérationnels sont associés à la même pièce pour réaliser la tâche.

Ces tâches coopératives sont aussi possibles dans le cas d'outils différents. Ainsi, les outils imposants et lourds seront manipulés à l'aide de plusieurs m-bots, et on parlera donc de p-bots opérationnels.

2.2.3 Tâches de services

Dans le domaine des services, le besoin de robotisation de tâches pénibles et dangereuses pour les humains se fait de plus en plus sentir. Nous considérons deux exemples, le premier concerne quelques tâches dans le secteur du bâtiment et le second concerne la manipulation de charges dans le secteur de la logistique.

2.2.3.1 Tâches dans le secteur du bâtiment et du génie civil

Les opérations envisagées font référence à deux projets de robotisation en cours : le projet *Bots2Rec* relatif au désamiantage [Detert *et al.*, 2017] et le projet *PaintUp* relatif au traitement de façade [PaintUP, 2017]. Dans ce contexte, quelques tâches données de façon non exhaustive et à titre d'exemple (figure 2.7) peuvent être réalisées par un ensemble de MMs coopératifs.

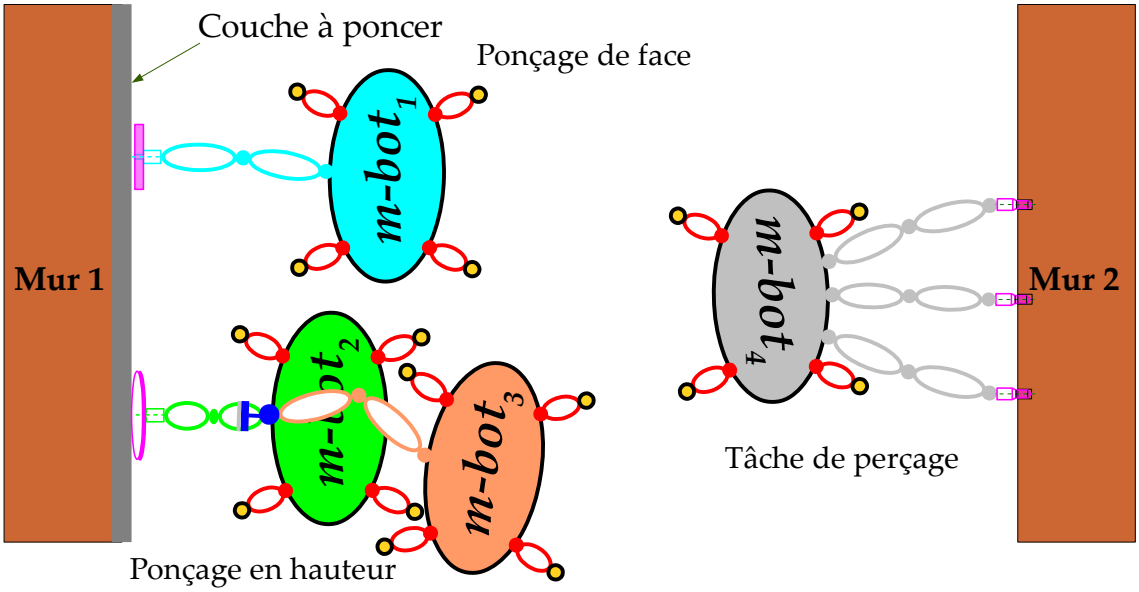


FIGURE 2.7 – Tâches dans le bâtiment : ponçage et perçage

Sur le mur de la surface 1 (figure 2.7), une couche de revêtement doit être éliminée : c'est une tâche de ponçage que l'on retrouve dans les différentes applications. Cette tâche peut être réalisée soit en m-bot ou en configuration p-bot. Pour la configuration à un seul MM, le *m-bot*$_1$ est chargé de poncer la surface du mur 1 qui est situé en face de lui. Il peut réaliser cette opération car le MM peut générer les efforts nécessaires au bout de l'effecteur sans contrainte de stabilité. Ce n'est pas le cas pour le ponçage en hauteur ou dans des endroits où le MM sera dans une configuration défavorable (manque de rigidité, de stabilité). Dans ce cas, nous proposons d'utiliser deux MMs (*m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$). Cette configuration en p-bot permet la rigidification du système robotique et la génération des efforts nécessaires pour réaliser la tâche tout en assurant la stabilité des MMs. La liaison entre les deux m-bots s'effectue par le bras de connexion du *m-bot*$_3$ qui se connecte sur le bras opérationnel du *m-bot*$_2$.

Dans le cas du *m-bot*$_4$, celui-ci est équipé de trois bras opérationnels pour percer trois trous simultanément dans le mur 2 (figure 2.7). Cette architecture à trois bras est plus flexible qu'une broche triple. Il peut réaliser le perçage avec certains bras pendant que les autres se repositionnent ou prennent appui sur l'environnement, ce qui diminue les réactions au sol sur le robot. Évidemment, si le m-bot est instable, il peut se faire aider par un second, comme précédemment. Une autre approche consisterait à utiliser deux m-bots à deux bras plutôt q'un seul instable à quatre bras. L'avantage de cette configuration et qu'un robot à deux bras peut à la fois percer, aider son voisin ou s'accrocher, ce qui donne encore plus de polyvalence.

2.2.3.2 Manipulation de charges dans le secteur de la logistique

La figure 2.8 présente un exemple de tâche de manipulation et de transport de charge. Pour simplifier l'illustration, nous considérons que chaque m-bot est équipé de quatre jambes de locomotion et un seul bras. De plus, les bras des *m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$ sont constitués de deux solides et un outil opérationnel ou de connexion.

Dans cet exemple, nous présentons différents scénarios de coopération des MMs pour réaliser la tâche. La tâche consiste à transporter les différentes pièces **A** et **B** de

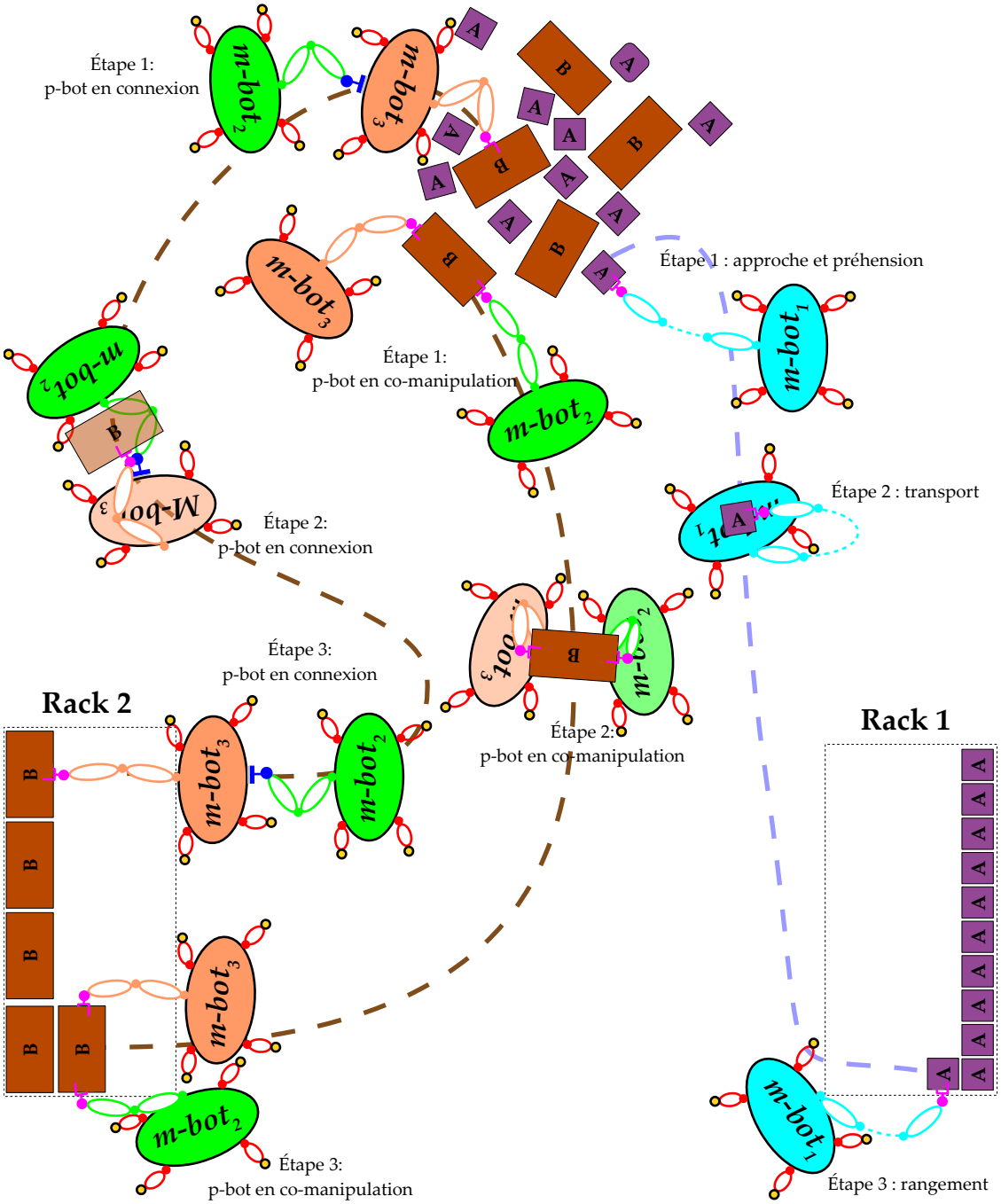


FIGURE 2.8 – Tâche coopérative : manipulation de charges

tailles et poids différents et les ranger dans les racks 1 et 2 respectivement. Les pièces **B** ont un poids et un volume deux fois supérieur aux pièces **A**. Nous considérons que seul le *m-bot*$_1$ est configuré pour manipuler les pièces **A** et que les *m-bot*$_2$ et *m-bot*$_3$ sont destinés à la manipulation coopérative des pièces **B**.

– *Manipulation des pièces **A** :*
  Pour ce type de pièces, le *m-bot*$_1$ réalise sa tâche en trois étapes. La première consiste à approcher la pièce et réaliser sa préhension. La deuxième étape concerne le transport en optimisant le placement de la pièce pour améliorer la stabilité du

MM. La dernière étape concerne le rangement de la pièce dans le rack dédié. Les étapes les plus critiques sont la première et la troisième qui font intervenir les capacités de stabilisation des MMs en plus des capacités de navigation nécessaires dans la deuxième étape. Cette difficulté dépend des caractéristiques des pièces (poids et dimensions) et de la structure des robots (nombre de contacts avec le sol).

– *Manipulation des pièces* ***B*** *:*
Dans ce cas, les m-bots sont configurés en p-bots pour la saisie des pièces. Les étapes de réalisation de la tâche restent les mêmes que pour les pièces **A**, mais la façon de réaliser les étapes est différente. Soit les MMs $m\text{-}bot_2$ et $m\text{-}bot_3$ prennent la charge ensemble et on parle ainsi de la manipulation coopérative ou co-manipulation, soit le $m\text{-}bot_2$ se connecte au $m\text{-}bot_3$ afin d'augmenter les capacités de manipulation et de stabilité, c'est le mode connexion. Chaque mode est adapté pour des conditions initiales et finales différentes. Dans le cas où les m-bots ne peuvent pas entourer la pièce, le mode co-manipulation n'est pas possible. Il en est de même si la position finale de la pièce **B** dans le rack 2 n'est pas accessible. Pour ces deux exemples, le mode connexion est le mieux adapté à condition que l'espace atteignable et la capacité de charge des chaînes de manipulation sont adaptés aux charges et à l'environnement.

Ce déploiement de MMs est très proche de celui des opérateurs humains pour la réalisation de la même tâche : la manipulation des charges légères est réalisée par un seul opérateur et celle concernant des charges lourdes et/ou volumineuses est réalisée par deux opérateurs ou plus.

Les nombreux cas d'usage illustrés dans cette section présentent l'utilisation des MMs dans différents secteurs de l'industrie et des services. Les différents scénarios présentés, en configuration m-bot et p-bot, montrent le potentiel de ces systèmes robotiques pour la réalisation de tâches complexes face aux exigences de l'industrie 4.0 en terme d'adaptabilité et de flexibilité par rapport aux solutions robotiques plus classiques. Nous allons maintenant détailler une application spécifique issue des défis présentés dans le cadre du *PSA Booster Day* 2016 [Groupe PSA, 2016] afin d'affiner le cahier des charges pour pouvoir appliquer la méthode de synthèse structurale.

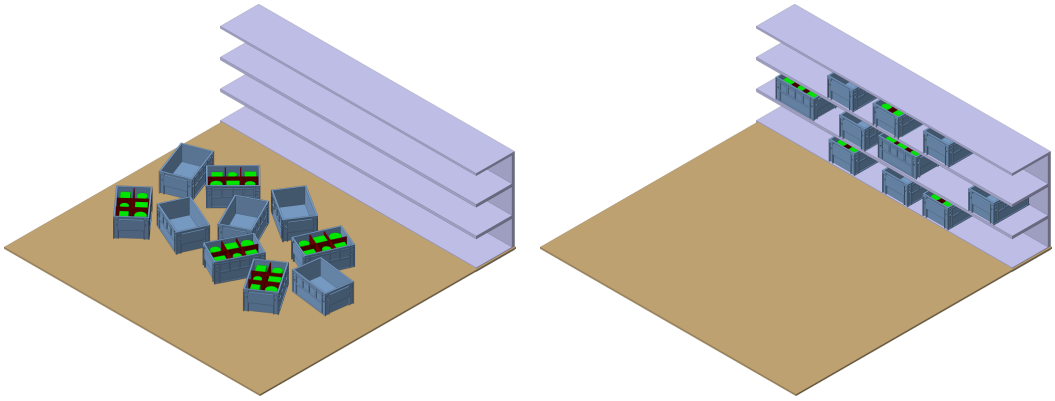
2.3 Manipulation et transport d'objets en contexte industriel

L'application retenue constitue l'un des défis de l'usine de futur, présentée dans le cadre du défi n°5 du *PSA Booster Day* 2016 [Groupe PSA, 2016]. Celle-ci consiste à manipuler des charges depuis le sol, les transporter et les ranger dans des meubles. Nous présentons maintenant plus précisément les contraintes de l'environnement, les différentes phases de mouvement des MMs et les scénarios envisagés en configuration m-bot et p-bot.

2.3.1 Contraintes et environnement

L'espace des tâches est présenté à figure 2.9, avec une vue d'ensemble de l'environnement (figure 2.9a) et le résultat attendu de l'application (figure 2.9b).

Les différentes tâches s'effectuent essentiellement dans un environnement maîtrisé. Le sol est plat et bien structuré. Nous supposons que les obstacles sont parfaitement



(a) Vue d'ensemble de l'environnement (b) Résultat souhaité de la tâche

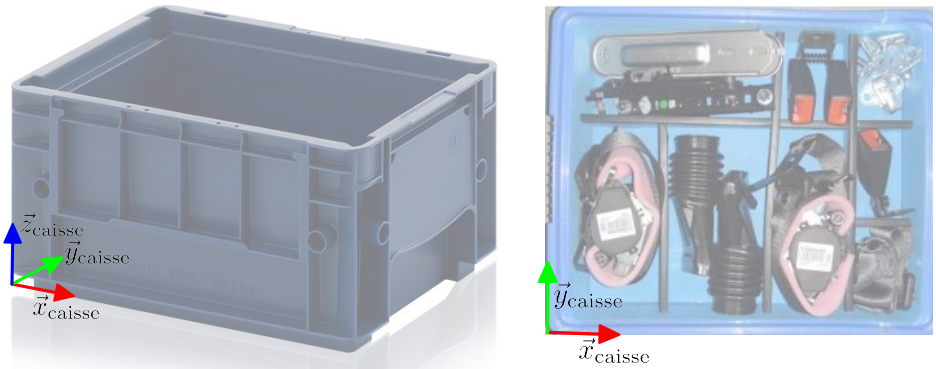
FIGURE 2.9 – Vue CAO de l'environnement de travail

identifiés. Leur évitement est réalisé exclusivement par la programmation d'une trajectoire bien définie et ne nécessite pas d'ajouter aux MMs des mobilités spécifiques pour le franchissement d'obstacles [Bewley *et al.*, 2008], passage des marches [Fauroux *et al.*, 2007], etc. Une contrainte forte concerne l'utilisation des MMs dans un environnement partagé avec des opérateurs humains, qui est très structuré. Par conséquent, les MMs doivent occuper approximativement la même surface au sol qu'un opérateur humain pour ne pas nécessiter la modification des ateliers.

En ce qui concerne les objets à manipuler, il s'agit de caisses, remplies ou vides, comme présentées à la figure 2.10. Ce sont des caisses normalisées [Axess Industries, 2017] (figure 2.10a), utilisées dans différents secteurs industriels tel que l'automobile pour le transport de pièces (figure 2.10b) [Durville, 2016]. Concernant les racks de rangement, nous considérons qu'ils sont modulables et facilement reconfigurables en fonction des caisses à accueillir (type *NORCAN* [NORCAN, 2018]).

Une fois la charge et l'environnement définis, trois conditions de réalisation de la tâche affectent l'architecture des MMs :

– *Horizontalité de la caisse :*
  La tâche est considérée comme réussie si le transport s'effectue sans renverser



(a) Caisse vide de norme *VDA*, [Axess Industries, 2017] (b) Caisse remplie d'alvéoles, [Durville, 2016]

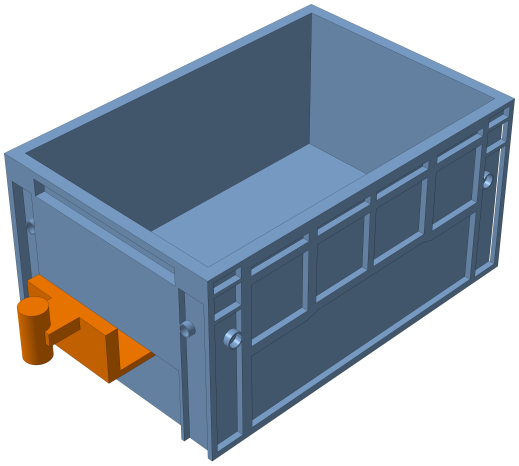
FIGURE 2.10 – Caisses considérées pour la tâche de transport

le contenant. Les MMs doivent assurer le maintien quasi horizontal de la caisse durant toutes les étapes de la réalisation de la tâche.

– *Orientation de la caisse :*
Les caisses prises du sol ou d'un autre rangement n'ont pas une orientation fixe par rapport aux MMs. Ceux-ci doivent pouvoir s'orienter. Ceci est valable en m-bot mais en p-bot, il y a des contraintes supplémentaires.

– *Préhension des caisses :*
Afin de simplifier l'outil de préhension et de ne pas ajouter d'actionneur, nous proposons l'utilisation d'un crochet (figure 2.11). La préhension de la caisse est réalisée en trois étapes (figures 2.11c, 2.11d et 2.11e).

(a) Outil



(b) Outil en manipulation

(c) Première étape

(d) Deuxième étape

(e) Troisième étape

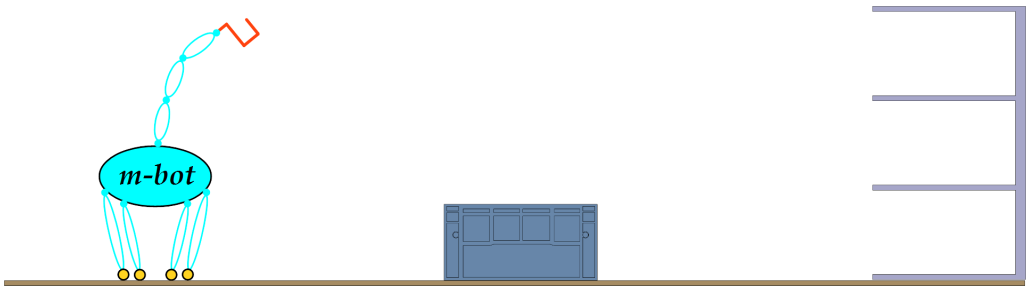
FIGURE 2.11 – Conception de l'outil de manipulation

Afin d'illustrer les deux configurations m-bot et p-bot, nous considérons pour la suite que la manipulation des caisses vides est réalisée par un m-bot et la manipulation des caisses remplies nécessite une configuration p-bot.

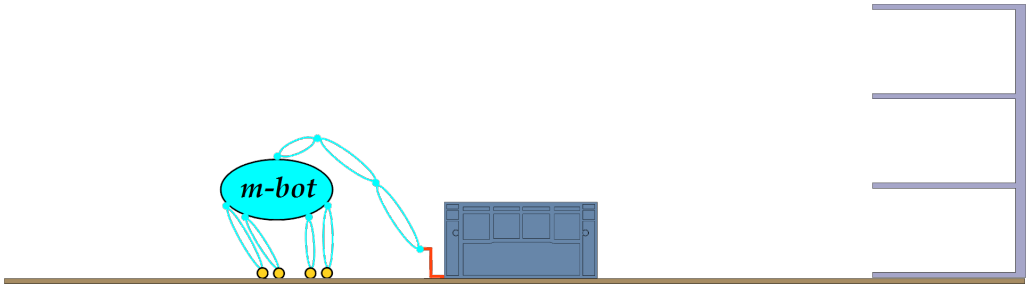
2.3.2 Phases de réalisation de la tâche en m-bot

La réalisation de la tâche en m-bot se décompose en cinq phases (figure 2.12). Chaque phase est déterminée par les actions réalisées par le m-bot :

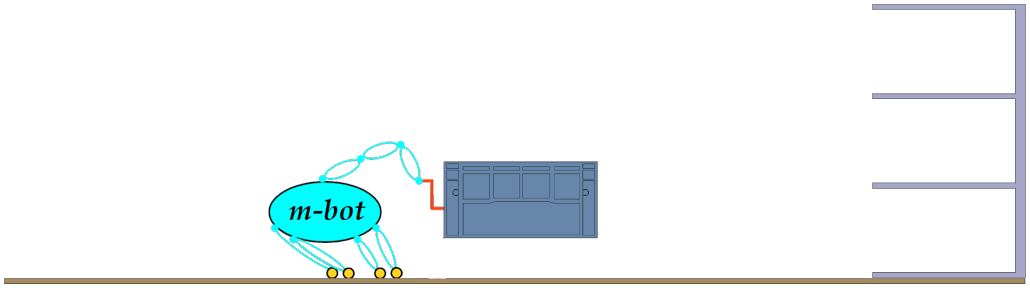
– *Phase d'approche :*
De la position initiale (figure 2.12a), la première phase consiste à amener et orienter le m-bot par rapport à la caisse. La fin de cette phase est caractérisée par la position de l'effecteur (figure 2.11c).



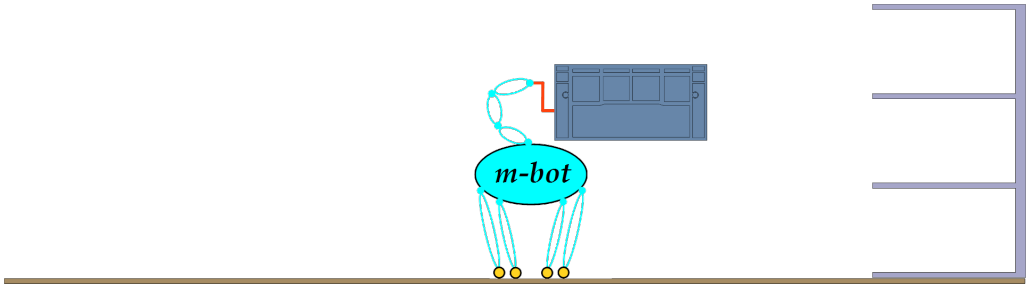
(a) Position initiale du m-bot face à la caisse



(b) Préhension de la caisse par l'outil de manipulation



(c) Levage de la caisse



(d) Locomotion vers le rack

(e) Dépose de la caisse sur une étagère du rack

FIGURE 2.12 – Phases de réalisation de la tâche en m-bot

- *Phase de préhension :*
  Cette phase consiste à accrocher la caisse au m-bot comme présentée aux figures 2.11d et 2.11e. Une adaptation de la posture du m-bot est nécessaire pour assurer la stabilité de l'ensemble durant le reste des phases (figure 2.12b).
- *Phase de levage :*
  En connectant la caisse au m-bot, on obtient un système de masse et dimensions différentes. Comme précédemment, la stabilité de l'ensemble doit être assurée durant cette phase (figure 2.12c).
- *Phase de locomotion :*
  Dans cette phase (figure 2.12d), le m-bot portant la caisse s'approche du rack tout en assurant sa stabilité et en réglant la hauteur de la caisse pour s'adapter à l'étagère définie. En même temps, le m-bot doit s'orienter de façon à s'aligner correctement face au rack pour préparer la dépose de la caisse.
- *Phase de dépose :*
  Cette dernière phase (figure 2.12e) consiste tout d'abord à déposer délicatement la caisse sur l'étagère puis à décrocher la caisse en réalisant les étapes inverses de la phase d'accroche. Il s'agit là encore d'assurer la stabilité du m-bot durant chaque étape.

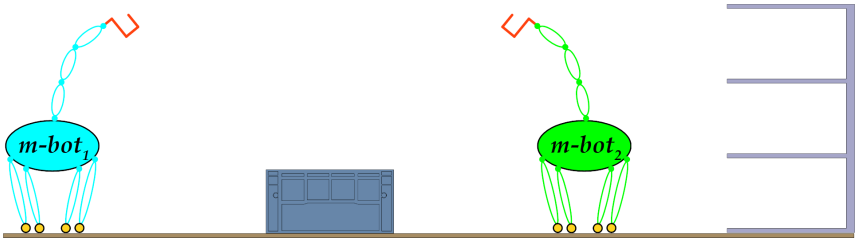
2.3.3 Phases de réalisation de la tâche en p-bot

Pour la réalisation de la tâche en p-bot, il est nécessaire de préciser préalablement le nombre de m-bots utilisés ainsi que la configuration de la structure :

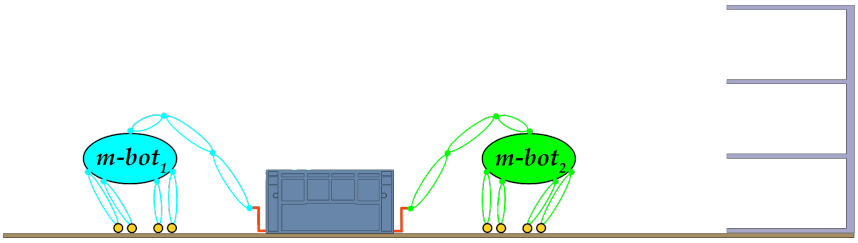
- **Nombre de m-bots :**
  Pour la réalisation de la tâche, nous considérons que deux m-bots sont suffisants pour la manipulation coopérative d'une seule caisse remplie.
- **Mode de formation du p-bot :**
  Puisque la caisse présente une symétrie de ses poignées (figure 2.11), nous appliquons le mode co-manipulation et non pas le mode connexion. Ainsi, les deux m-bots seront équipés de bras opérationnels pour la manipulation de la caisse remplie.

Nous présentons maintenant les phases de réalisation de la tâche par un p-bot à deux m-bots, comme illustré à la figure 2.13. Globalement, les différentes phases sont les mêmes qu'en configuration m-bot avec quelques différences à chaque phase :

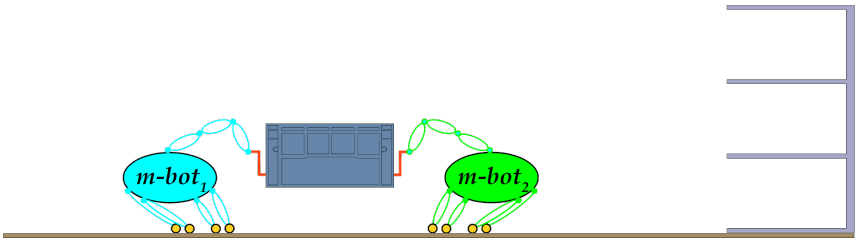
- *Phase d'approche :*
  Cette phase consiste à guider les deux m-bots en vis-à-vis pour qu'ils s'approchent chacun près d'une poignée de la caisse (petits cotés du rectangle) (figure 2.13a). Le positionnement et l'orientation de chaque m-bot doit s'adapter à l'orientation de la caisse. Cette phase a pour but de préparer le levage de la caisse.



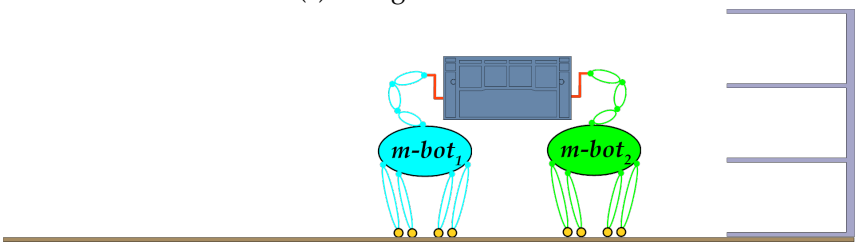
(a) Position initiale des deux m-bots



(b) Préhension de la caisse

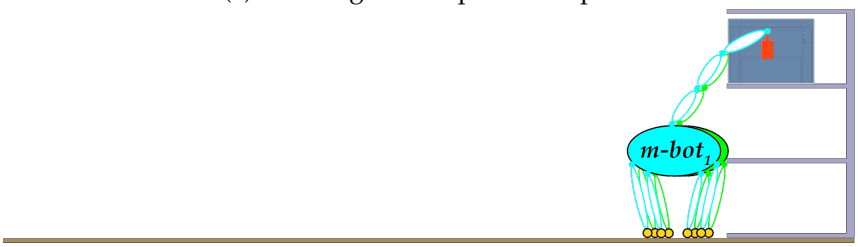


(c) Levage de la caisse



(d) Locomotion vers le rack

(e) Reconfiguration pour la dépose



(f) Dépose de la caisse sur l'étagère

FIGURE 2.13 – Phases de réalisation de la tâche en p-bot

- *Phase de préhension :*
  Le rôle de cette phase est la formation du p-bot en connectant les deux m-bots à la caisse (figure 2.13b). Avant de réaliser cette connexion, chaque m-bot doit se préparer en modifiant sa posture afin de pouvoir réaliser la prochaine étape sans atteindre des positions singulières, ni des limites articulaires, tout en conservant son équilibre. La connexion de chaque m-bot correspond à la phase d'ancrage des m-bots (figure 2.12b).

- *Phase de levage :*
  Une fois le p-bot formé, cette phase consiste à lever la caisse remplie à partir du sol (figure 2.13c). Comme précédemment, les mouvements des m-bots doivent être synchronisés afin d'assurer la stabilité de l'ensemble du p-bot (c'est-à-dire des m-bots et de leur charge).

- *Phase de locomotion :*
  Dans cette phase, la caisse est transportée vers le rack (figure 2.13d). Une difficulté dans cette phase consiste à synchroniser les m-bots lors du transport.

- *Phase de reconfiguration :*
  Cette phase de reconfiguration est nécessaire pour le p-bot car l'orientation de la caisse pour la phase de dépose n'est pas forcément la même que lors du levage. Ainsi, la caisse doit être levée à la hauteur nécessaire pour l'étagère considérée tout en présentant une face libre de la caisse face à l'étagère et en escamotant les m-bots latéralement au fur et à mesure que la caisse avance sur l'étagère. Ceci assure un transfert progressif du poids de la caisse depuis le p-bot vers l'étagère. Cela implique également de ré-orienter le p-bot avec le grand côté de la caisse vers l'avant puisque la préhension est réalisée sur les petits côtés de la caisse (figure 2.13e).

- *Phase de dépose :*
  Durant cette dernière phase (figure 2.13f), la caisse est poussée au fond du rack sur l'étagère souhaitée par une modification posturale du p-bot permise par ses mobilités internes. Une fois la caisse au fond du rack, les deux m-bots se désaccouplent de celle-ci. Ainsi, cette tâche est terminée et chaque m-bot peut être dirigé vers une autre tâche.

2.3.4 Structure cinématique des manipulateurs mobiles

La présentation des phases de réalisation de la tâche dans les deux configurations m-bot et p-bot permet de dégager quelques spécifications cinématiques de la partie locomotion et manipulation (figure 2.14) :

- *Partie locomotion :*
  Au vu de l'environnement de l'atelier, nous retenons la locomotion à roues qui est la plus performante sur ce type de sol. Pour que notre m-bot ait une empreinte au sol et des capacités de manipulation semblables à celles d'un opérateur humain, nous considérons la partie locomotion composée de deux roues sans nécessité d'articulations pour réaliser le passage des obstacles. Le robot *Handle* de *Boston Dynamics* [Boston Dynamics, 2017] est un exemple d'un MM à deux roues qui contient des articulations dans sa partie locomotion mais qui semble inutilement

complexe (et donc coûteux et peu rigide) en environnement d'atelier.

– *Partie manipulation :*
Pour la partie manipulation, nous considérons que chaque m-bot est équipé d'une seule chaîne de manipulation : soit un bras opérationnel pour la configuration m-bot et p-bot en co-manipulation, soit un bras opérationnel pour le premier m-bot et un bras de connexion pour le deuxième m-bot pour la réalisation de la tâche en mode connexion. Les bras opérationnels et de connexions partagent la même cinématique et ne se différencient que par la nature de l'organe terminal.

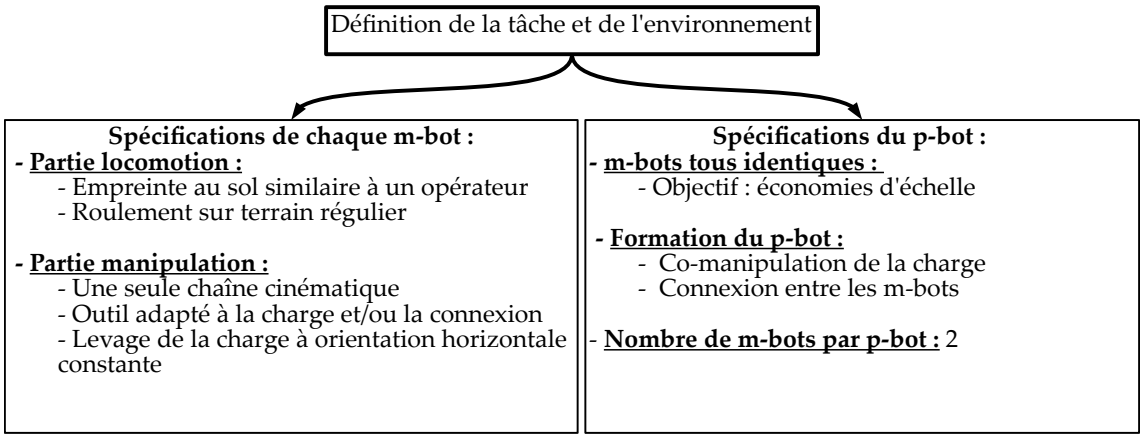


FIGURE 2.14 – Caractéristiques générales de la structure des m-bots

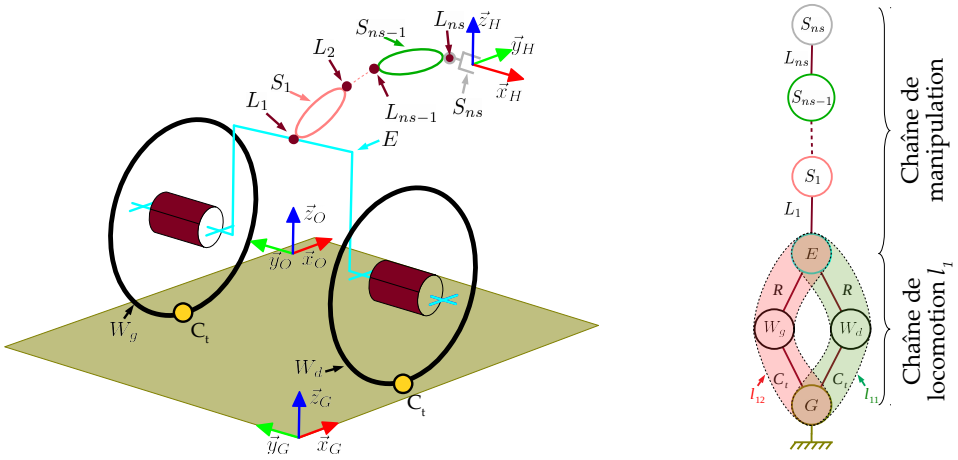
La définition de la partie locomotion et manipulation nécessite une étude plus approfondie des mobilités. Pour les caractériser, nous utilisons les paramètres structuraux des mécanismes (connectivité, mobilité, redondance et hyperstatisme). Nous présentons maintenant les méthodes de calcul des paramètres structuraux des manipulateurs mobiles.

2.4 Analyse structurale des manipulateurs mobiles

Notre objectif est de proposer une méthode de conception d'un manipulateur mobile intégrant les parties locomotion et manipulation. Dans la littérature, les méthodes existantes se focalisent sur la conception des bras manipulateurs [Manoochehri et Seireg, 1990; Angeles et Park, 2008], les structures parallèles [Angeles, 2004; Gogu, 2008] ou les bases mobiles [Hirose et Morishima, 1990; Huang *et al.*, 2004; Bouzgarrou *et al.*, 2009] mais jamais les trois simultanément. Nous présentons maintenant les paramètres structuraux des mécanismes qui sont utilisés comme critères de sélection des cinématiques.

Chaque m-bot comporte deux jambes à roue sans articulations pour sa partie locomotion et une seule chaîne cinématique dans sa partie manipulation qui se termine par un effecteur opérationnel ou de connexion. Le diagramme structurel du m-bot est présenté à la figure 2.15a avec l'énumération des solides, liaisons et repères, tandis que la représentation sous forme de graphe de structure est illustrée à la figure 2.15b.

Le repère $R_G(\vec{x_G}, \vec{y_G}, \vec{z_G})$ est le repère global relié au sol (solide G) de l'environnement de travail. Pour situer le m-bot par rapport à cet environnement, le repère $R_O(O, \vec{x_O}, \vec{y_O}, \vec{z_O})$ est relié au manipulateur mobile. Il est fixé à mi-chemin entre les deux roues W_d et W_g (point O). L'axe $\vec{y_O}$ est celui de l'essieu E et l'axe $\vec{z_O}$ a la même direction que l'axe $\vec{z_G}$. L'axe $\vec{x_O}$ complète le repère orthonormé direct. Le repère $R_H(H, \vec{x_H}, \vec{y_H}, \vec{z_H})$



(a) Diagramme structurel du m-bot (b) Graphe de liaison

FIGURE 2.15 – Structure cinématique du manipulateur mobile

est le repère relié à l'effecteur du m-bot (solide S_{ns}) de centre H. Son orientation dépend de l'angle de tangage du m-bot et les valeurs articulaires de la chaîne cinématique de manipulation. Des repères intermédiaires sont utilisés pour la modélisation du m-bot et seront présentés dans le chapitre 4. D'autre part, la partie manipulation du m-bot est composée de n_S solides $(S_1, S_2, ..., S_{ns-1}, S_{ns})$ et n_S liaisons $(L_1, L_2, ..., L_{ns-1}, L_{ns})$ (chaîne cinématique ouverte). Ce qui est imposé dans l'architecture du m-bot est la liaison entre les roues et l'essieu. Tout le reste des liaisons de la chaîne cinématique de manipulation et les liaisons Ct qui représentent le contact roue-sol restent à déterminer.

Nous présentons à présent les différents paramètres structuraux qui permettent la description de la chaîne cinématique d'un mécanisme. Il existe quatre paramètres structuraux : la connectivité, la mobilité, la redondance et le degré d'hyperstatisme (souvent appelé hyperstatisme). Leurs définitions sont présentées dans différents ouvrages de référence [IFToMM, 2015; Gogu, 2008]. Nous précisons maintenant les paramètres structuraux pour les MMs en mode m-bot ou en mode p-bot.

2.4.1 Paramètres structuraux des manipulateurs mobiles

– **Connectivité :**
La connectivité S entre deux solides d'un mécanisme représente le nombre de déplacements indépendants finis et/ou infinitésimaux permis par le mécanisme entre les deux solides. Par correspondance, la connectivité d'une chaîne cinématique est définie entre ses deux solides extrémités. Par ailleurs, et en utilisant la théorie des transformations linéaires, les mouvements relatifs entre deux solides d'un mécanisme sont définis par l'espace vectoriel des vitesses relatives noté R. Finalement, la connectivité d'un mécanisme n'est autre que la dimension de cet espace vectoriel, et on note :

$$S = dim(R) \tag{2.1}$$

Et sachant que la dimension maximale de cet espace vectoriel $dim^{max}(R) = 6$ dans un espace à trois dimensions, la connectivité de n'importe quel mécanisme dans cet espace est limitée, avec :

$$0 \leq S \leq 6 \tag{2.2}$$

Dans notre cas, la connectivité du m-bot S_m est la dimension de l'espace vectoriel des vitesses relatives entre l'effecteur de centre H (point caractéristique) et le sol G, noté $R^m_{H/G}$. Sa dimension donne le nombre de déplacements indépendants finis que peut réaliser l'effecteur du m-bot par rapport au sol. La connectivité du p-bot est notée S_p.

– **Mobilité :**
La mobilité M ou le degré de liberté (ddl) d'un mécanisme est le *nombre de variables indépendantes qui doivent être définies comme mouvement d'entrée* [IFToMM, 2015]. Si l'on s'intéresse à la structure cinématique du mécanisme, la mobilité est le nombre de coordonnées indépendantes requises pour la définition de la configuration de la chaîne cinématique [Gogu, 2008]. Dans le cas des MMs, la mobilité d'un m-bot est notée M_m et celle du p-bot M_p. Elle représente la mobilité de l'organe terminal par rapport au sol. Pour le calcul de la mobilité (et les autres paramètres structuraux), la plupart des études utilisent la formule de *Chebychev-Grübler-Kutzbach*, mais les travaux présentés par *Gogu* [Gogu, 2005] montrent les limites de cette formule et en proposent une formulation plus générale adaptée à tout type de mécanisme. De ce fait, nous utilisons les formulations de *Gogu* pour le calcul des paramètres structuraux des MMs.

– **Redondance :**
La redondance T se décompose en deux types : opérationnelle (cinématique) et structurelle. **La redondance opérationnelle** se mesure toujours par rapport à une tâche donnée, d'où son nom. Elle apparait lorsque la mobilité du mécanisme est strictement supérieure à celle nécessaire pour réaliser une tâche donnée [Chiaverini *et al.*, 2008; IFToMM, 2015]. Quant à **la redondance structurelle**, elle caractérise la différence entre la dimension de l'espace articulaire et la dimension de l'espace opérationnel d'un mécanisme. Ainsi, c'est la redondance structurelle qui décrit la structure du robot. C'est donc elle qui va être utilisée comme paramètre structurel et son calcul pour les MMs (notée T_m pour les m-bots et T_p pour les p-bots) va être présenté par la suite.

– **Degré d'hyperstatisme :**
Le degré d'hyperstatisme N est un paramètre structural pour les mécanismes qui contiennent des boucles fermées dans leurs chaînes cinématiques. Il représente la 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. Ce paramètre sera calculé au même titre que les autres paramètres structuraux pour les m-bots, noté N_m, et pour les p-bots, noté N_p.

Les contraintes associées à ces différents paramètres seront présentées à la section 3.1. Avant cela, nous devons préciser le contact roue-sol et l'espace vectoriel des vitesses R_{Ct}.

2.4.2 Recherche d'une liaison équivalente au contact roue-sol

Nous considérons le contact roue-sol comme une liaison et nous étudions les différents cas possibles de mobilité. Une étude similaire a été réalisée [Kim *et al.*, 2002] en utilisant la théorie des torseurs pour l'évaluation des mobilités des plateformes mobiles. Dans notre cas, nous utilisons la formulation proposée par *Gogu* [Gogu, 2005].

La liaison roue-sol est entre deux solides (les roues W_d ou W_g avec le sol G) et sa

connectivité $S_{W/G}$ est calculée en fonction de l'espace vectoriel des vitesses relatives $R_{W/G}$ correspondant. Cet espace vectoriel est issu de l'analyse des mouvements possibles entre la roue et le sol, ce qui dépend essentiellement du type de roue et du type de rotation considéré. Comme chaque liaison dans l'espace, Il existe six mouvements possibles pour une roue sur le sol, décrits à l'aide des vitesses présentées à la figure 2.16 :

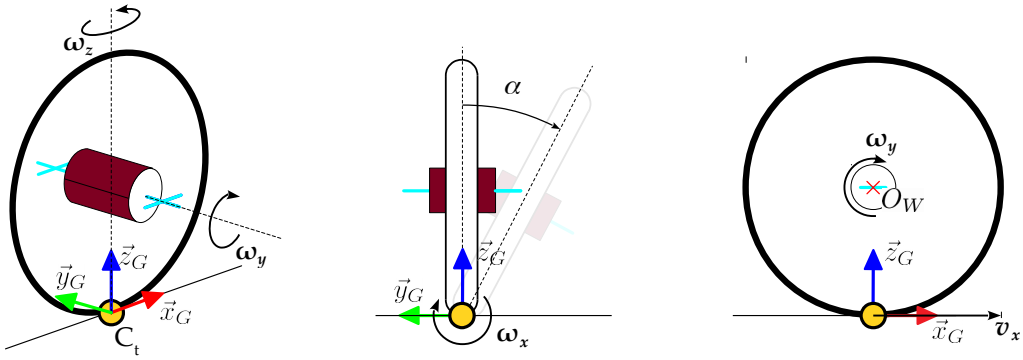


FIGURE 2.16 – Description des mouvements naturels d'une roue torique

- *Le mouvement d'avance ($\vec{v}_x$ ou $\vec{\omega}_y$) :*
  D'une manière générale, les vitesses qui interviennent lors du mouvement d'une roue sont soit la vitesse d'avance du point centre roue (O_W) sur l'axe longitudinal $\vec{v}_x$, soit la vitesse de rotation propre de la roue $\vec{\omega}_y$ autour de l'axe $\vec{y}_O$ de la roue. Le cas idéal de roulement est le Roulement Sans Glissement (*RSG*) et on a le choix d'utiliser les vitesses $\vec{v}_x$ et $\vec{\omega}_y$ pour décrire le mouvement d'avance de la roue car elles sont liées par l'équation 2.3 :

$$\vec{v}_x = r.\vec{\omega}_y \tag{2.3}$$

  avec r le rayon de la roue.
  Par contre, en cas de glissement, la présence des deux vitesses est obligatoire. Le *RSG* dépend de la nature de la roue (rigide ou déformable, nature du revêtement extérieur, etc.), de la nature du sol (dureté, planéité, matériau, etc.) et du coefficient de frottement roue-sol résultant. En pratique, le *RSG* n'est approximativement obtenu qu'avec une roue rigide dotée d'un bandage caoutchouté mince, sur un sol rigide et adhérent (par exemple macadam). À noter que les roues sur pneus génèrent toujours du glissement longitudinal, du fait de l'écrasement du pneu [Wong, 2008]. Ainsi, dans la suite du document, nous présentons le mouvement d'avance de la roue par la vitesse $\vec{v}_x$ et la vitesse $\vec{\omega}_y$ n'est considérée qu'en cas de glissement.

- *Le glissement latéral ($\vec{v}_y$) :*
  Ce mouvement n'est pas un mouvement naturel de la roue, donc celui-ci n'est pas considéré dans l'étude.

- *Le décollage du sol ($\vec{v}_z$) :*
  Pour assurer le maintien du contact de la roue avec le sol, cette vitesse doit être nulle, et donc elle n'est pas considérée dans l'étude.

– *Le basculement latéral en carrossage ($\vec{\omega}_x$) :*
L'angle dû à cette rotation est appelé angle de carrossage qui est souvent utilisé dans la conception des châssis de voiture (cf. angle α, figure 2.16). Il représente l'angle de rotation que réalise la roue par rapport à sa direction d'avance ($\vec{x}$) et génère la vitesse $\vec{\omega}_x$.

– *La rotation verticale de braquage ($\vec{\omega}_z$) :*
C'est la capacité de la roue de réaliser des rotations par rapport à un axe vertical. Cette rotation génère la vitesse $\vec{\omega}_z$ et permet surtout de changer la direction du véhicule (braquage).

Finalement, la combinaison entre les différents types de mouvement permis ($\vec{v}_x$, $\vec{\omega}_x$, $\vec{\omega}_y$, $\vec{\omega}_z$) donne huit possibilités pour la base de l'espace vectoriel $R_{W/G}$, notés $(R^i_{W/G})$ ($i = 1, ..., 8$). Ces bases sont présentées dans la table 2.1.

$(R^i_{W/G})$	*RSG*	Carrossage $\vec{\omega}_x$	Braquage $\vec{\omega}_z$
$(R^1_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x)$	✓	✗	✗
$(R^2_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	✓	✗	✓
$(R^3_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x)$	✓	✓	✗
$(R^4_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	✓	✓	✓
$(R^5_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$	✗	✗	✗
$(R^6_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	✗	✗	✓
$(R^7_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$	✗	✓	✗
$(R^8_{W/G}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	✗	✓	✓

TABLE 2.1 – Les bases possibles pour $R_{W/G}$

Dans le cadre de nos travaux, nous retenons l'hypothèse de *RSG* avec la rotation verticale de braquage $\vec{\omega}_z$ et latérale de carrossage $\vec{\omega}_x$ qui donnent lieu à la base $(R^4_{W/G})$, et on écrit :

$$(R^4_{W/G}) = (R_{C_t}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{2.4}$$

avec :

$$dim(R_{C_t}) = 3 \tag{2.5}$$

Par cette analyse, nous avons donc trouvé la liaison cinématique C_t, équivalente au contact d'une roue torique à section ronde avec le sol. C'est la liaison à trois mobilités $(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$. Ceci reste relié à la base $(R^4_{W/G})$, ainsi, et pour une étude plus approfondie, la prise en compte des autres bases de $R_{W/G}$ doit être réalisée.

2.4.3 Méthode de calcul des paramètres structuraux des m-bots

Les m-bots ont deux possibilités de locomotion :

– *Locomotion avec deux contacts au sol :*
Elle est réalisée en utilisant les deux roues du m-bots et en assurant sa stabilité par des accélérations/décélérations des roues, à la façon d'un robot *Segway* ou des robots *pendules inversés* [Grasser *et al.*, 2002; Kim *et al.*, 2005; Abeygunawardhana et Murakami, 2010]. L'ensemble des deux chaînes cinématiques de locomotion du m-bot dans cette configuration est désigné par l_1.

– *Locomotion avec trois contacts au sol :*
Elle est réalisée en utilisant l'effecteur du m-bot comme un troisième point de contact entre celui-ci et le sol. La chaîne cinématique équivalente est désignée par l_2.

Ainsi, deux configurations cinématiques sont possibles pour les m-bots et le calcul des paramètres structuraux est réalisé à part pour chaque cas.

2.4.3.1 m-bot en locomotion avec deux contacts au sol

Dans ce cas, le m-bot est partagé en deux parties : la partie locomotion l_1 entre le sol G et l'essieu E et la partie manipulation entre l'essieu E et l'effecteur S_{ns} (figure 2.15b). Cela représente une chaîne cinématique ouverte complexe où la complexité est due à la présence de la boucle fermée de la partie locomotion. Pour ce cas, on partage le calcul des paramètres structuraux du m-bot en deux parties : calcul des paramètres structuraux de la partie locomotion et ensuite ceux du m-bot en sa globalité :

– *Calcul des paramètres structuraux de la partie locomotion :*
La partie locomotion est la partie complexe de la chaîne cinématique du m-bot. Elle est composée de deux jambes simples l_{11} et l_{12}, qui contiennent chacune trois solides et deux liaisons ; le sol G, la roue W_d (ou W_g) et l'essieu E pour les solides, et les liaisons Ct, qui représentent le contact roue-sol, ainsi que les deux liaisons pivot d'axe $\vec{y}$, R_y. Sachant que la base de l'espace vectoriel de la liaison roue-sol (R_{Ct}) a été déterminée, toutes les données sont disponibles pour pouvoir calculer les paramètres structuraux de la chaîne cinématique de locomotion l_1.
Le premier paramètre à calculer est la connectivité S_{l1}. En se référant à l'équation 2.1, on note :

$$S_{l_1} = dim(R_{l_1}) = dim(R_{l_{11}} \cap R_{l_{12}}) \tag{2.6}$$

avec $R_{l_{11}}$ et $R_{l_{12}}$ les espaces vectoriels des jambes simples l_{11} et l_{12} respectivement, qui représentent les vitesses que peut réaliser un point caractéristique pris sur l'essieu E, déconnecté du système de locomotion (mécanisme parallèle) par rapport au sol G. Connaissant les types de liaison, avec une liaison simple $(\boldsymbol{\omega}_y)$ et une liaison triple $(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$, leur juxtaposition dans une seule jambe simple peut s'écrire :

$$dim(R_{l_{11}}) = dim(R_{l_{12}}) = 4 \tag{2.7}$$

Maintenant, nous devons choisir des bases pour les espaces vectoriels concernés. Néanmoins, une remarque très importante doit être prise en compte pour garder la validité de la méthode de calcul : 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 [Gogu, 2008, p. 129] [Note 1].
Ainsi, et pour chaque espace vectoriel $R_{l_{11}}$ et $R_{l_{12}}$, il existe huit écritures possibles des bases (R_l^i) (avec $i = 1, ..., 8$) qui sont la combinaison entre les bases possibles pour la liaison pivot R_y et les bases possibles pour la liaison de contact roue-sol C_t tout en vérifiant l'équation 2.7. Ces bases sont présentées dans la table 2.2 issues des calculs présentés dans la section A.1.1 de l'annexe A.
Avec l'obtention des bases possibles pour les deux jambes l_{11} et l_{12} de la partie locomotion, et en prenant en compte la note 1, nous obtenons :

$$S_{l_1} = dim(R_{l_1}) = 2 \tag{2.8}$$

Les calculs sont présentés dans la section A.1.2.

$(R_l^1) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_l^5) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(R_l^2) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$	$(R_l^6) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(R_l^3) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y)$	$(R_l^7) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x)$
$(R_l^4) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_l^8) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z)$

TABLE 2.2 – Différentes possibilités d'écritures des bases (R_l^i)

Une fois la connectivité de la partie locomotion déterminée, la mobilité M_{l_1} est obtenue par l'équation suivante :

$$M_{l_1} = \sum_{i=1}^{p_{l_1}} f_i - r_{l_1} \tag{2.9}$$

avec :
- p_{l_1} : Nombre total des liaisons de la partie locomotion l_1, avec $p_{l_1} = 4$ pour une liaison pivot et un contact roue-sol dans chaque jambe.
- f_i : Mobilité de la $i^{\text{ème}}$ liaison, avec $f_1 = 1$ et $f_2 = 3$ pour les deux liaisons R et C_t respectivement.
- r_{l_1} : Nombre des paramètres qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée composée des deux jambes simples l_{11} et l_{12}, calculé par :

$$r_{l_1} = \sum_{j=1}^{k} S_{l_{1j}} - S_{l_1} \tag{2.10}$$

avec :
- k : Nombre de jambes simples de la chaîne cinématique de locomotion l_1, soit $k = 2$.
- $S_{l_{1j}}$: Connectivité de la $j^{\text{ème}}$ jambe de la chaîne cinématique de locomotion l_1.

De l'équation 2.7, nous obtenons la connectivité de chaque jambe, à savoir $S_{l_{11}}$, qui est la même que $S_{l_{12}}$, et on note :

$$S_{l_{11}} = S_{l_{12}} = 4 \tag{2.11}$$

ainsi :

$$r_{l_1} = 4 + 4 - 2 = 6 \tag{2.12}$$

On utilise cette valeur dans l'équation 2.9 de la mobilité, ce qui donne :

$$M_{l_1} = 1 + 3 + 1 + 3 - 6 = 2 \tag{2.13}$$

La redondance T_{l_1} se déduit des équations 2.8 et 2.13 par la formule suivante :

$$T_{l_1} = M_{l_1} - S_{l_1} \tag{2.14}$$

et avec les deux termes connus, la redondance de la locomotion l_1 est :

$$T_{l_1} = 0 \tag{2.15}$$

Quant au degré d'hyperstatisme, il est calculé par la formule suivante :

$$N_{l_1} = 6q - r_{l_1} \tag{2.16}$$

avec :
- q : Nombre des boucles fermées dans les jambes de la locomotion l_1,
avec $q = p - m + 1$ avec m le nombre des solides et p le nombre de liaisons, soit $q = 1$.

Finalement, le degré d'hyperstatisme de la chaîne cinématique de locomotion l_1 est :

$$N_{l_1} = 0 \tag{2.17}$$

En résumé, les quatre paramètres structuraux pour la chaîne cinématique de locomotion l_1 sont :

- La connectivité :	S_{l_1}	=	2
- La mobilité :	M_{l_1}	=	2
- La redondance :	T_{l_1}	=	0
- Le degré d'hyperstatisme :	N_{l_1}	=	0

– *Calcul des paramètres structuraux du m-bot :*
Une fois le calcul de la partie complexe effectué, le reste du calcul des paramètres structuraux du m-bot est simple puisque la chaîne cinématique de locomotion et la chaîne cinématique de manipulation forment une chaîne cinématique ouverte. En effet, la connectivité du m-bot S_m est la dimension de l'espace vectoriel R_m du m-bot. Cette dernière est celle de l'espace vectoriel des vitesses relatives entre le point caractéristique H et le sol G noté $R_{H/G}$, et on note :

$$S_m = dim(R_m) = dim(R_{H/G}) \tag{2.18}$$

or R_m représente l'union de l'espace vectoriel R_{l_1} de la chaîne cinématique de locomotion du m-bot et de l'espace vectoriel R_{manip} de la chaîne cinématique de manipulation :

$$R_m = R_{l_1} \cup R_{manip} \tag{2.19}$$

En revenant à S_m, elle est calculée soit directement par l'équation 2.18 après avoir reconstruit R_m, avec :

$$S_m = dim(R_{l_1} \cup R_{manip}) \tag{2.20}$$

ou bien en utilisant les caractéristiques des transformations linéaires, à savoir la propriété d'intersection. Ainsi :

$$S_m = dim(R_{l_1}) + dim(R_{manip}) - dim(R_{l_1} \cap R_{manip}) \tag{2.21}$$

Cette dernière formulation est la plus avantageuse dans notre étude car elle permet de suivre la connectivité des chaînes cinématiques de locomotion et de manipulation du m-bot. De ce fait, la connectivité du m-bot va s'écrire en fonction de la connectivité de la partie locomotion $S_{l_1} = dim(R_{l_1})$, de la connectivité de la partie manipulation $S_{manip} = dim(R_{manip})$ et de la connectivité commune entre les deux parties $S_{com} = dim(R_{l_1} \cap R_{manip})$, et on note :

$$S_m = S_{l_1} + S_{manip} - S_{com} \tag{2.22}$$

C'est la formule qui donne la connectivité du m-bot en fonction des connectivités séparées des chaînes cinématiques de locomotion et de manipulation.
En ce qui concerne la mobilité du m-bot M_m, nous décomposons celle-ci en fonction des mobilités des deux parties : mobilité de la chaîne cinématique de locomotion M_{l_1} et la mobilité de la chaîne cinématique de manipulation M_{manip}. Puisque

le m-bot formé représente une chaîne cinématique ouverte, alors on peut écrire que :

$$M_m = M_{l_1} + M_{manip} \tag{2.23}$$

Sachant que la chaîne cinématique de manipulation est elle aussi une chaîne cinématique ouverte, le calcul de sa mobilité se fait par l'addition des mobilités de chaque liaison, soit :

$$M_{manip} = \sum_{i=1}^{p_{manip}} f_i \tag{2.24}$$

avec p_{manip} le nombre total des liaisons de la chaîne cinématique de manipulation. La formulation présentée dans l'équation 2.23 permet d'utiliser les paramètres structuraux déjà calculés pour la chaîne cinématique de locomotion du m-bot.
La redondance est de son côté directement déduite de la connectivité et la mobilité du m-bot, avec :

$$T_m = M_m - S_m \tag{2.25}$$

Une autre formulation peut être déduite des équations 2.22 et 2.23, ce qui mène à conclure que la redondance du m-bot n'est autre que la connectivité commune entre la partie locomotion et la partie manipulation, et on écrit :

$$T_m = S_{com} \tag{2.26}$$

Finalement pour le degré d'hyperstatisme, puisque celui-ci est calculé en fonction de la boucle fermée du m-bot qui est présente seulement sur la partie locomotion du m-bot (calculé dans l'équation 2.16), il est toujours le même dans ce cas, et on écrit :

$$N_m = N_{l_1} = 0 \tag{2.27}$$

En résumé, et en prenant en compte les paramètres structuraux de la locomotion l_1, les paramètres structuraux du m-bot en stabilisation avec deux contacts au sol sont :

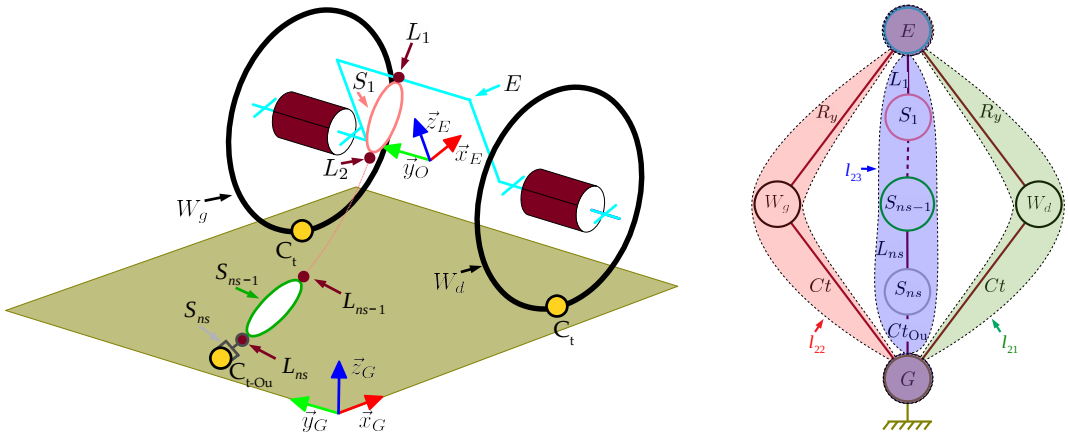
- La connectivité :	S_m	$=$	$2 + S_{manip} - S_{com}$
- La mobilité :	M_m	$=$	$2 + M_{manip}$
- La redondance :	T_m	$=$	$M_m - S_m$
- Le degré d'hyperstatisme :	N_m	$=$	0

2.4.3.2 m-bot en locomotion avec trois contacts au sol

Ce cas de locomotion est illustré à la figure 2.17. Le point caractéristique H dans ce cas se trouve sur l'essieu E ce qui mène à résumer le manipulateur mobile dans ce cas à un robot mobile, comme présenté dans le diagramme structurel (figure 2.17a) et le graphe de structure (figure 2.17b). Ainsi, les paramètres structuraux du m-bot seront ceux de la chaîne cinématique de locomotion l_2.

L'étude des paramètres structuraux dans ce cas nous permet de déterminer la configuration minimale qui assure ce mode de locomotion. Cela revient à caractériser le contact outil-sol C_{t-Ou} de façon similaire au contact roue-sol C_t présenté dans la section 2.4.2. Ce mode de locomotion implique que le contact entre l'outil et le sol doit être maintenu. Nous considérons le contact outil-sol comme une liaison point sur plan. En conséquence, la dimension de l'espace vectoriel des vitesses relatives entre les deux solides est :

$$dim(R_{Ou/G}) = 5 \tag{2.28}$$



(a) Diagramme structurel (b) Graphe de structure

FIGURE 2.17 – m-bot en locomotion avec trois contacts au sol

Cet espace vectoriel et sa dimension permet la locomotion du m-bot avec trois points de contacts. Ainsi, le calcul des paramètres structuraux du m-bot n'est pas nécessaire, surtout que les spécificités de l'environnement et de la tâche ne demandent pas un fonctionnement en p-bot pour ce mode de locomotion.

2.4.4 Méthode de calcul des paramètres structuraux des p-bots

Le cahier des charges élaboré dans la section 2.3.4 indique les configurations à prendre en compte dans l'étude de ce cas. Les m-bots sont utilisés de deux façons différentes pour former le p-bot :

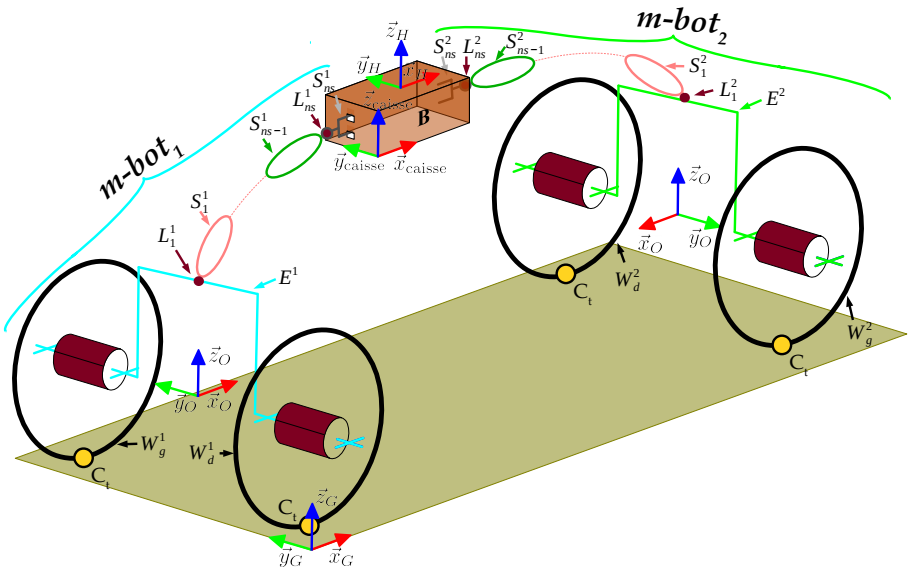
- *Co-manipulation de la charge :*
  Chaque m-bot se connecte à la caisse par le biais de l'outil de son bras opérationnel (figure 2.18). L'ensemble des m-bots et la charge forme le p-bot qui est un robot parallèle à jambes complexes de base fixe le sol G et de base mobile la charge B.
- *Connexion entre les m-bots :*
  Le *m-bot*$_1$ se connecte via son outil de connexion à l'essieu du *m-bot*$_2$, tandis que ce dernier manipule la charge avec son outil opérationnel (figure 2.19). Le p-bot formé est un robot sériel avec une chaîne cinématique complexe.

Donc, et comme pour les paramètres structuraux des m-bots (section 2.4.3), le calcul est réalisé séparément pour chaque cas.

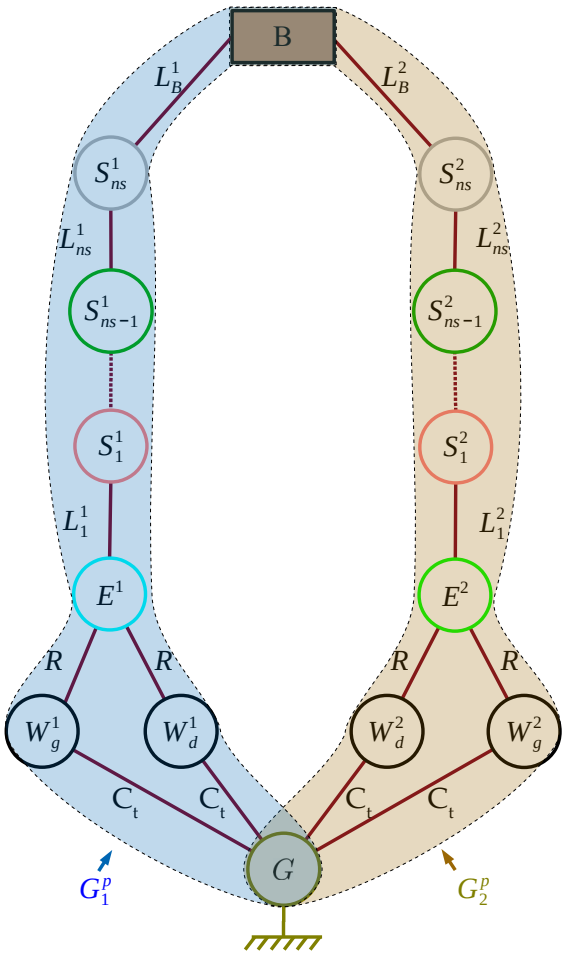
2.4.4.1 Méthode de calcul pour les p-bots en mode co-manipulation

La figure 2.18 représente le cas étudié. Pour les notations, et comme présenté dans le diagramme structurel (figure 2.18a), nous ajoutons des exposants pour indiquer l'appartenance des solides à chaque m-bot. Par exemple, les solides W_g^1 et W_g^2 représentent les roues gauches du *m-bot*$_1$ et *m-bot*$_2$ respectivement. Le diagramme structurel (figure 2.18b) va servir de base pour le calcul des paramètres structuraux du p-bot.

Le p-bot représente un mécanisme parallèle avec deux jambes complexes G_1^p et G_2^p (l'exposant p pour indiquer la jambe du p-bot) avec la base fixe définie par le sol G et la base mobile définie par la charge B. La connexion entre les outils des m-bots S_{ns}^1 et S_{ns}^2



(a) Diagramme structurel



(b) Graphe de structure

FIGURE 2.18 – p-bot en co-manipulation de la charge B

d'un côté et la charge B de l'autre côté est considérée comme un encastrement. Le point caractéristique H est situé sur la charge B.

Le premier paramètre structurel à calculer est la connectivité du p-bot en mode co-manipulation $S_{p-comanip}$. Dans ce mécanisme parallèle, la connectivité est calculée en fonction des espaces vectoriels des jambes du p-bot, on note :

$$S_{p-comanip} = dim(R_{p-comanip}) = dim(R_{G_1^p} \cap R_{G_2^p}) \tag{2.29}$$

Sachant que les dimensions des espaces vectoriels des vitesses relatives de chaque jambe sont celles des m-bots calculées au préalable dans l'équation 2.19, on note donc :

$$R_{G_1^p} = R_{G_2^p} = R_m \tag{2.30}$$

Cet espace vectoriel ne peut être évalué qu'après la définition de la chaîne cinématique de manipulation des m-bots et de l'espace vectoriel des vitesses relatives R_{manip}. Notons que le calcul de $S_{p-comanip}$ doit se faire pour obtenir la valeur minimale possible de la connectivité.

Ensuite, le calcul de la mobilité $M_{p-comanip}$ du p-bot est analogue à celui de la chaîne cinématique de locomotion du m-bot (équation 2.9). Nous obtenons la formule suivante :

$$M_{p-comanip} = \sum_{i=1}^{p} f_i - r_{p-comanip} \tag{2.31}$$

avec :
- p : Nombre total de liaisons du p-bot.
- f_i : Mobilité de la $i^{\text{ème}}$ liaison.
- $r_{p-comanip}$: Nombre de paramètres qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée du p-bot en mode co-manipulation. Il est calculé par :

$$r_{p-comanip} = \sum_{i=1}^{k_2} S_{G_i^p} - S_{p-comanip} + r_{l-comanip} \tag{2.32}$$

avec :
- k_2 : Nombre de jambes complexes dans le p-bot, i.e. $k_2 = 2$.
- $S_{G_i^p}$: Connectivité de la $i^{\text{ème}}$ jambe complexe du p-bot.
- $r_{l-comanip}$: Nombre de paramètres qui perdent leur indépendance dans les boucles fermées éventuelles des jambes complexes contenues dans le p-bot. Il est issu des calculs réalisés pour les m-bots. Les boucles fermées dans le m-bot ne sont contenues que dans la chaîne cinématique de locomotion (équation 2.27), définie par r_{l_1}, et calculée dans l'équation 2.12. Sachant que le p-bot est construit par deux m-bots identiques, nous pouvons écrire que :

$$r_{l-comanip} = 2.r_{l_1} = 12 \tag{2.33}$$

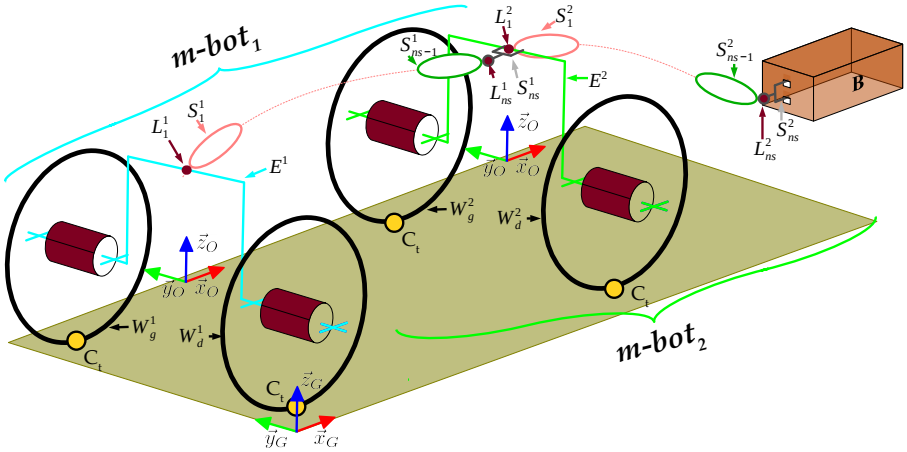
Finalement, l'évaluation de la mobilité $M_{p-comanip}$, et donc des autres paramètres structuraux (la redondance $T_{p-comanip}$ et le degré d'hyperstatisme $N_{p-comanip}$), dépendent de la définition de la chaîne cinématique de manipulation du m-bot. Pour le calcul de la redondance, nous utilisons la même formule que pour les m-bots (équation 2.25). Pour le calcul du degré d'hyperstatisme, nous utilisons la formule suivante :

$$N_{p-comanip} = 6q - r_{p-comanip} \tag{2.34}$$

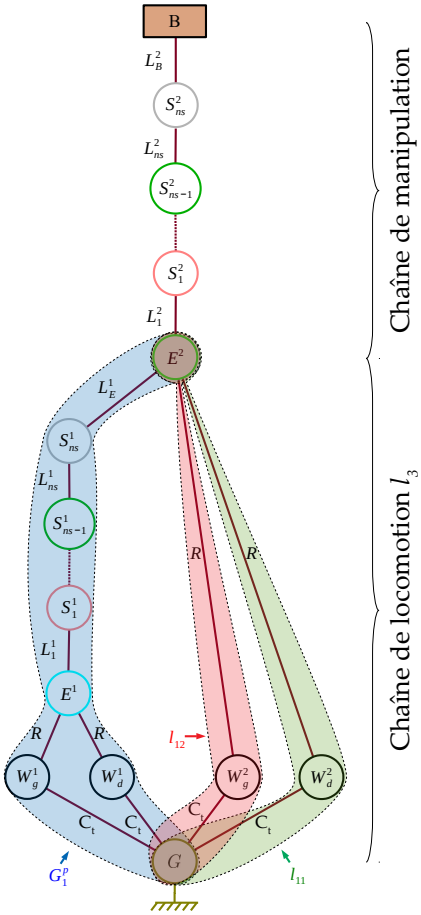
avec :
- q : Nombre des boucles fermées dans les jambes du p-bot.

2.4.4.2 Méthode de calcul pour les p-bots en mode connexion

La deuxième possibilité de la réalisation de la tâche en p-bot est présentée à la figure 2.19. Le *m-bot*$_1$ se connecte à l'essieu du *m-bot*$_2$ quand ce dernier manipule la charge **B**. Celle-ci doit être posée sur un rack éloigné du p-bot.



(a) Diagramme structurel



(b) Graphe de structure

FIGURE 2.19 – p-bot en connexion entre deux m-bots

Ce mode est illustré dans le diagramme structurel de la figure 2.19a. Dans ce scénario, le p-bot est assimilé à un robot sériel contenant une chaîne cinématique complexe, comme le montre le graphe de structure de la figure 2.19b. Le calcul des paramètres structuraux dans ce cas est analogue à l'étude réalisée pour le m-bot en mode locomotion avec deux contacts au sol. La différence dans ce cas est que la chaîne cinématique de locomotion du p-bot (appelée l_3) contient trois chaînes cinématiques, deux simples et une complexe (contre deux chaînes simples pour le m-bot). La même méthode de calcul est utilisée pour obtenir les paramètres structuraux du p-bot dans ce mode. La première étape concerne le calcul des paramètres structuraux de la chaîne cinématique de locomotion du p-bot.

- *Calcul des paramètres structuraux de la chaîne cinématique de locomotion l_3 :*
  Dans ce cas, la chaîne cinématique de locomotion l_3 est définie entre le sol G et l'essieu E^2 du *m-bot*$_2$. Elle est composée de trois chaînes cinématiques :
  - Une chaîne cinématique qui représente le *m-bot*$_1$. Cette chaîne a été étudiée dans le cas précédent correspondant à la chaîne complexe G_1^p ou G_2^p (nous notons G^p pour alléger les notations).
  - Deux chaînes cinématiques qui représentent les jambes simples de la chaîne cinématique de locomotion l_1 du *m-bot*$_2$. Ce cas a également été étudié dans le calcul des paramètres d'un m-bot, pour les jambes simples l_{11} et l_{12}.

  Ainsi, la connectivité de la partie locomotion du p-bot de ce mode S_{l_3} est obtenue par :
  $$S_{l_3} = dim(R_{l_3}) = dim(R_{G^p} \cap R_{l_{11}} \cap R_{l_{12}}) \tag{2.35}$$
  L'évaluation de cette équation nécessite l'élaboration de toutes les intersections des bases possibles pour chaque espace vectoriel, et les bases seront choisies afin que la connectivité S_{l3} soit de valeur minimale.
  Le calcul de la mobilité de cette partie M_{l_3} est fourni par l'équation suivante :
  $$M_{l_3} = \sum_{i=1}^{p_{l_3}} f_i - r_{l_3} \tag{2.36}$$
  avec :
  - p_{l_3} : Nombre total de liaisons de la chaîne cinématique de locomotion l_3.
  - f_i : Mobilité de la $i^{\text{ème}}$ liaison.
  - r_{l_3} : Nombre de paramètres qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée de la locomotion l_3, avec dans ce cas la coexistence de jambes simples et complexes. Ce paramètre est donc calculé par :
  $$r_{l_3} = \sum_{i=1}^{k_1} S_{l_{1i}} + \sum_{j=1}^{k_2} S_{G_j^p} - S_{l_3} + r_{l-l_3} \tag{2.37}$$
  avec :
  - k_1 : Nombre de jambes simples dans la locomotion l_3, i.e. $k_1 = 2$.
  - k_2 : Nombre de jambes complexes dans la locomotion l_3, i.e. $k_2 = 1$.
  - $S_{l_{1i}}$: Connectivité de la $i^{\text{ème}}$ jambe simple de la locomotion l_3.
  - $S_{G_i^p}$: Connectivité de la $j^{\text{ème}}$ jambe complexe de la locomotion l_3.
  - r_{l-l_3} : Nombre des paramètres qui perdent leur indépendance dans les boucles fermées des jambes complexes contenues dans la chaîne cinématique de locomotion l_3. Dans ce cas, une seule jambe complexe contient une boucle fermée, qui est la chaîne cinématique de locomotion l_1. Ainsi, on note :
  $$r_{l-l_3} = r_{l_1} = 6 \tag{2.38}$$

La connectivité et la mobilité de la chaîne cinématique de locomotion l_3 suffisent pour calculer les paramètres structuraux du p-bot en mode connexion. Comme dans le cas du p-bot en co-manipulation, le calcul des paramètres structuraux de l'ensemble nécessite la définition de la chaîne cinématique de manipulation des m-bots. Cette définition est aussi nécessaire pour le calcul des paramètres de la partie locomotion l_3 car elle contient la chaîne cinématique de manipulation du *m-bot*$_1$.

– *Calcul des paramètres structuraux du p-bot en connexion :*
Le calcul étant analogue à la section 2.4.3.1, et à partir de l'équation 2.21, nous exprimons la connectivité du p-bot par :

$$S_{p-connex} = dim(R_{l_3}) + dim(R_{manip}) - dim(R_{l_3} \cap R_{manip}) \tag{2.39}$$

De même, la mobilité du p-bot est déduite de l'équation 2.23, et sachant que la chaîne cinématique de manipulation est une chaîne cinématique ouverte, nous obtenons la même mobilité que pour l'équation 2.24. Nous pouvons écrire que :

$$M_{p-connex} = M_{l_3} + M_{manip} \tag{2.40}$$

Il reste à calculer la redondance du p-bot dans ce mode $T_{p-connex}$, qui est la différence entre la mobilité et la connectivité du p-bot. On écrit :

$$T_{p-connex} = M_{p-connex} - S_{p-connex} \tag{2.41}$$

Finalement, la redondance du p-bot $N_{p-connex}$ est calculée à partir de l'équation 2.16, adaptée au p-bot :

$$N_{p-connex} = 6q - r_{p-connex} \tag{2.42}$$

avec :
- q : le nombre de boucles fermées dans le p-bot.
- $r_{p-connex}$: le nombre de paramètres qui perdent leur indépendance.
Ces deux paramètres viennent de la chaîne cinématique de locomotion, ainsi $q = 3$ et $r_{p-connex} = r_{l_3}$ (cf. équation 2.27).

Conclusion

La première partie de ce chapitre présente quelques exemples d'intégration possible des manipulateurs mobiles dans les secteurs de l'industrie et des services. Ceux-ci sont constitués d'une chaîne cinématique de locomotion à plusieurs jambes et d'une chaîne cinématique de manipulation à plusieurs bras. Nous présentons tout d'abord différents scénarios montrant les apports de reconfigurabilité et d'adaptabilité des manipulateurs mobiles coopératifs pour la réalisation de tâches opératives et de transport. Nous montrons l'intérêt de l'association des m-bots en configuration p-bot, en mode co-manipulation ou connexion, afin de renforcer la rigidité et la stabilité de la structure pour la réalisation de tâches sollicitantes ou le transport de charges lourdes.

Nous présentons ensuite l'application retenue, issue des défis présentés dans le cadre du *PSA Booster Day* concernant la manipulation et le transport de caisses vides ou pleines et les contraintes d'environnement qui ont conduit à la définition d'un cahier des charges relatif à la tâche et à l'environnement. Un des objectifs consiste à concevoir un m-bot en couplant dés le départ la partie locomotion et manipulation tout en respectant l'ensemble des contraintes d'environnement et pour un coût d'investissement

réduit. A l'issue du cahier des charges établi, la partie locomotion du m-bot est assurée par deux roues, la partie manipulation en mode co-manipulation ou connexion est réalisé par un seul bras.

Nous présentons dans la deuxième partie l'ensemble des paramètres structuraux : connectivité, mobilité, redondance et hyperstatisme, qui vont intervenir ensuite dans la démarche de synthèse structurale. Nous précisons les notations et les calculs de ces différents paramètres en configuration m-bot, puis p-bot en mode co-manipulation ou connexion qui seront utilisés par la suite.

Le troisième chapitre déroule la méthode de synthèse structurale permettant d'aboutir à une solution optimisée de manipulateur mobile respectant les contraintes imposées par la tâche et l'environnement à la fois pour le fonctionnement d'un m-bot seul et aussi de plusieurs m-bots agrégés en p-bots.

Chapitre 3

Synthèse structurale des manipulateurs mobile modulaires

Sommaire

3.1 Démarche de synthèse structurale 62
3.1.1 Contraintes sur les paramètres structuraux des m-bots 62
3.1.2 Contraintes sur les paramètres structuraux du p-bot 63
3.1.3 Caractérisation de la partie manipulation 63
3.1.4 Démarches de synthèse structurale 64
3.2 Synthèse structurale des m-bots 65
3.2.1 Conception de la chaîne de manipulation 66
3.2.2 Vérification des paramètres structuraux des m-bots 76
3.3 Synthèse structurale des p-bots 79
3.3.1 Paramètres structuraux des p-bots en mode co-manipulation 79
3.3.2 Paramètres structuraux des p-bots en mode connexion 85
Conclusion 91

Ce chapitre présente la méthode et le résultat de la démarche de synthèse structurale appliquée à la définition des manipulateurs mobiles modulaires et coopératifs. La méthode consiste à appliquer les contraintes liées à la tâche afin de définir les valeurs des paramètres structuraux des MMs dans leurs deux modes de fonctionnement m-bot et p-bot. Pour chaque configuration, le résultat de la démarche est présenté avec une vérification des calculs à l'aide de l'analyse structurale présentée au chapitre précédent.

3.1 Démarche de synthèse structurale

L'objectif de la synthèse structurale est de définir la nature des chaînes cinématiques des m-bots qui composent le p-bot. Contrairement à la plupart des architectures actuelles des MMs constitués par l'ajout d'un bras manipulateur sur une plateforme mobile, nous proposons de prendre en compte les contraintes des tâches et de l'environnement afin de minimiser le nombre de liaisons et aboutir à une architecture optimisée.

3.1.1 Contraintes sur les paramètres structuraux des m-bots

La réalisation des tâches de levage et de transport des caisses nécessite de concevoir une structure adaptée des m-bots. Nous allons maintenant exprimer un ensemble de contraintes sur les paramètres structuraux. Ce jeu de contraintes va permettre de définir un sous-espace de l'espace de conception dans lequel se situent les solutions du problème, à savoir des structures cinématiques acceptables des m-bots adaptées à la tâche présentée à la section 2.3 :

- *Connectivité :* la connectivité du m-bot S_m, qui représente la dimension de l'espace vectoriel R_m des déplacements possibles de l'organe terminal du m-bot par rapport au sol, doit permettre la réalisation de la tâche, sachant que celle-ci nécessite quatre composantes de vitesse pour être réalisée : les trois vitesses dans le plan $(v_x, v_y, \boldsymbol{\omega}_z)$ et la composante de vitesse de levage de la charge v_z. Ainsi, une base minimale possible pour R_m peut s'écrire :

$$(R_m^{min}) = (v_x, v_y, v_z, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.1}$$

  Cette base minimale permet de représenter l'intégralité des déplacements de l'espace vectoriel R_m mais elle n'est pas unique. Ainsi, on pourrait choisir d'autres bases équivalentes, sans que cela n'affecte l'exhaustivité de notre démarche. De cette base, on peut donc déduire la connectivité minimale d'un m-bot destiné à effectuer la tâche considérée :

$$S_m^{min} = 4 \tag{3.2}$$

  Ainsi, toute architecture de m-bot ayant une connectivité S_m supérieure ou égale à S_m^{min} sera retenue car elle permet la réalisation de la tâche. On note :

$$S_m^d \geq S_m^{min} \tag{3.3}$$

- *Redondance :* l'objectif de notre démarche de synthèse structurale est de concevoir des m-bots les plus légers et rigides possibles, ayant une architecture cinématique simple. Le p-bot sera probablement redondant, mais nous choisissons ici d'éviter toute redondance pour le m-bot. C'est pour cela que nous proposons que le m-bot ait une redondance nulle, ainsi :

$$T_m^d = 0 \tag{3.4}$$

- *Mobilité :* la contrainte sur la mobilité du m-bot n'a pas besoin d'être exprimée. En effet, celle-ci est reliée à la redondance T_m et à la connectivité S_m du m-bot par l'équation 2.25.

- *Dégré d'hyperstatisme :* un MM avec un degré d'hyperstatisme nul garde un contact au sol constant. Pour un fonctionnement en environnement industriel structuré, le m-bot n'aura pas d'obstacles à franchir. Nous avons choisi la locomotion à roues

avec maintien d'un contact continu avec le sol. le m-bot n'aura donc pas besoin d'appuis supplémentaires, tels que les insectes qui disposent de six appuis au sol alors que trois suffisent pour un support stable. Donc, le degré d'hyperstatisme souhaité est nul, et on écrit :

$$N_m^d = 0 \tag{3.5}$$

3.1.2 Contraintes sur les paramètres structuraux du p-bot

On rappelle que nous considérons le cas d'un p-bot composé de deux m-bots (cf. cahier des charges présenté à la section 2.3.4). La structure cinématique de chaque m-bot doit déjà satisfaire les contraintes listées à la section 3.1.1. Nous allons maintenant définir un second jeu de contraintes portant sur les paramètres structuraux du p-bot :

- *Connectivité :* De même que pour les m-bots, le p-bot doit pouvoir réaliser la tâche, nous posons :

$$S_p^d \geq 4 \tag{3.6}$$

- *Redondance :* obtenir une valeur de redondance nulle pour un p-bot est très difficile puisqu'il est construit par l'association de deux m-bots identiques. De ce fait, nous allons sélectionner pour le p-bot les architectures qui possèdent le moins de redondances possibles. On note :

$$T_p^d \rightarrow 0 \tag{3.7}$$

- *Mobilité :* comme pour les m-bots, elle s'écrit en fonction des contraintes sur la redondance et la connectivité.
- *Degré d'hyperstatisme :* la concaténation de deux m-bots identiques, chacun étant isostatique pris indépendamment, a de fortes chances de conduire à un p-bot hyperstatique. On cherchera donc ici à minimiser le degré d'hyperstatisme du p-bot. On note :

$$N_p^d \rightarrow 0 \tag{3.8}$$

3.1.3 Caractérisation de la partie manipulation

L'étape finale de caractérisation des m-bots concerne la définition des chaînes cinématiques de manipulation qui respectent le cahier des charges traduit en termes de contraintes sur les paramètres structuraux des MMs.

Comme présentée à la section 2.3.4, la chaîne cinématique de manipulation du m-bot est une chaîne ouverte sérielle. La concevoir revient à définir la structure d'un bras manipulateur sériel à M_{manip} mobilités, avec :

$$S_{manip} = M_{manip} \tag{3.9}$$

Une contrainte sur la connectivité S_{manip} de la chaîne cinématique de manipulation peut être obtenue en combinant l'équation 2.22 à la contrainte 3.3 :

$$S_{manip} \geq S_m^{min} - S_{l1} + S_{com} \tag{3.10}$$

D'autre part, et pour une redondance nulle d'après l'équation 2.26, la connectivité commune entre la partie manipulation et la partie locomotion doit être nulle. Par conséquent :

$$S_{com} = 0 \tag{3.11}$$

Donc, l'inéquation 3.10 peut être simplifiée par :

$$S_{manip} \geq S_m^{min} - S_{l1} \tag{3.12}$$

Avec les valeurs des connectivités S_m^{min} et S_{l_1} connues (équations 3.2 et 2.8 respectivement), on peut écrire que :

$$S_{manip} \geq 2 \tag{3.13}$$

Par ailleurs, la connectivité d'un mécanisme S est limitée par l'inéquation 2.2. Par conséquent, la connectivité désirée S_m^d pour un m-bot est limitée par :

$$4 \leq S_m^d \leq 6 \tag{3.14}$$

En remplaçant S_m par S_m^{max} dans l'équation 2.22, nous obtenons la limite maximale de la connectivité de la chaîne cinématique de manipulation telle que :

$$S_{manip} \leq 4 \tag{3.15}$$

Finalement, pour avoir un m-bot dont la connectivité permet la réalisation de la tâche, et en même temps possède une redondance nulle, la connectivité de la chaîne cinématique de manipulation doit respecter l'inéquation suivante :

$$2 \leq S_{manip} \leq 4 \tag{3.16}$$

En conclusion, la chaîne cinématique de manipulation du m-bot doit contenir au minimum deux liaisons pour que la tâche puisse être réalisée, et au maximum quatre pour que le m-bot soit non redondant. Ce constat n'est valable qu'avec une chaîne cinématique ouverte.

3.1.4 Démarches de synthèse structurale

Une fois que la mobilité de la chaîne cinématique de manipulation est connue, le processus de conception peut être lancé. Initialement, nous avons procédé à une énumération combinatoire de toutes les architectures des m-bots permises respectant les structures cinématiques des m-bots et du p-bot établies à la section 2.3.4. Ainsi, l'algorithme suivant est executé :

- Pour un nombre de liaisons allant de 2 à 4 :
    - Pour un type de liaison (Pivot (R) ou prismatique (P)) :
        - Pour une orientation initiale de la liaison (suivant $\vec{x}$, $\vec{y}$ ou $\vec{z}$) :
            - Dessiner l'architecture possible.

Cet algorithme génère 1548 architectures possibles des m-bots (le détail des calculs est présenté en annexe B), avec :
- 36 architectures possibles pour les chaînes cinématiques à deux liaisons simples.
- 216 architectures possibles pour les chaînes cinématiques à trois liaisons simples.

- 1296 architectures possibles pour les chaînes cinématiques à quatre liaisons simples.

Pour chacune de ces 1548 architectures, il faut en premier déterminer la base de l'espace vectoriel des vitesses permises par la partie manipulation (R_{manip}), ensuite calculer la connectivité commune entre les chaînes cinématiques de locomotion et de manipulation S_{com}, pour finalement calculer les paramètres structuraux des m-bots résultants et les comparer aux contraintes exigées sur ces paramètres présentés à la section 3.1.1. Une fois que les architectures des m-bots respectant le cahier des charges sont obtenues, on procède à la construction des p-bots en respectant le cahier des charges sur leur structure cinématique présenté à la section 2.3.4. Pour chaque p-bot construit, on calcule ses paramètres structuraux dans les deux modes (co-manipulation et connexion) et on ne retient finalement que les constructions qui respectent les contraintes sur les paramètres structuraux du p-bot présentées à la section 3.1.2.

Cette démarche propose des architectures de m-bots et de p-bots mais elle ne prend pas en compte les contraintes sur les valeurs des paramètres structuraux, ce qui nécessite un calcul manuel de ces paramètres pour chaque architecture proposée (1548 cas possibles). Cela représente un nombre d'architectures considérable à explorer manuellement.

Pour ces deux raisons, nous proposons une démarche de synthèse structurale (figure 3.1) qui prend en compte initialement les contraintes sur les valeurs des paramètres structuraux des m-bots et p-bots, et ne génère donc que les architectures satisfaisant le cahier des charges. Cette démarche est composée de deux étapes : la première concerne l'élaboration des m-bots, la deuxième concerne la construction des p-bots.

3.2 Synthèse structurale des m-bots

Cette étape est présentée dans le schéma général de la figure 3.1. L'étape de synthèse structurale des m-bots commence par la prise en compte des caractéristiques attendues pour la partie manipulation, qui concernent :

- *Nombre de chaînes cinématiques :* une seule chaîne cinématique de manipulation par m-bot.
- *Type de liaisons :* ne seront considérées que les liaisons prismatiques $[P]$ et les liaisons rotoïdes $[R]$.
- *Axes des liaisons :* nous utilisons les axes principaux du repère R_O du m-bot.

La prochaine étape dans la démarche consiste à écrire toutes les bases possibles de R_{l_1}. Rappelons que la chaîne cinématique de locomotion l_1 a été étudiée dans la section 2.4.3.1 permettant le calcul des paramètres structuraux des m-bots. De ces calculs ont été extraites les différentes bases des mouvements possibles de la chaîne de locomotion l_1 qui sont présentées dans la table 3.1.

$(R_{l_1})_1 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$	$(R_{l_1})_3 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z)$
$(R_{l_1})_2 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_{l_1})_4 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y)$

TABLE 3.1 – Différentes possibilités d'écritures des bases (R_{l_1})

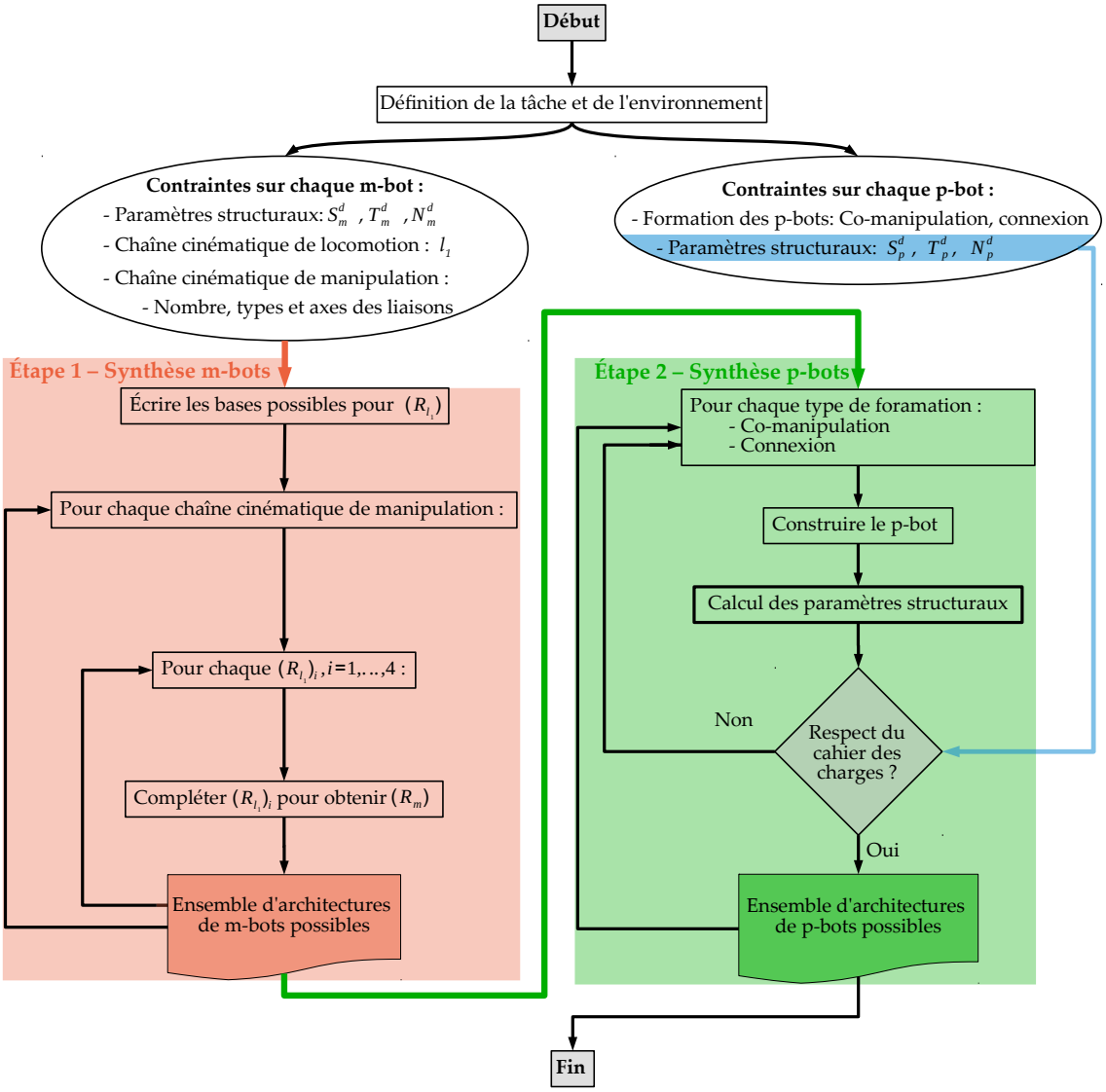


FIGURE 3.1 – Méthode de synthèse structurale retenue pour les m-bots et p-bots

3.2.1 Conception de la chaîne de manipulation

L'étape suivante consiste à construire la base (R_m^{min}) du m-bot à partir des bases $(R_{l_1})_i$ (avec $i = 1, ..., 4$) en définissant à chaque fois la base de la chaîne cinématique de manipulation (R_{manip}) pour les cas à deux, trois ou quatre liaisons (équation 2.19).

3.2.1.1 Construction des chaînes de manipulation à deux liaisons

Dans ce cas, les deux liaisons sont choisies de façon à construire la base $(R_m^{min}) = (v_x, v_y, v_z, \omega_z)$, c'est-à-dire qu'il faut que les deux liaisons génèrent les vitesses manquantes de (R_m^{min}) par rapport à $(R_{l_1})_i$. Par ailleurs, les vitesses choisies doivent vérifier l'inéquation 3.13.

– *Pour la base* $(R_{l_1})_1 = (v_x, \omega_y)$:
Dans ce cas, nous observons que nous ne pouvons pas obtenir la base (R_m^{min}) en utilisant $(R_{l_1})_1$ car ce dernier impose la vitesse ω_y qui n'est pas présente dans

(R_m^{min}). Ainsi, cette base n'est pas utilisable dans ce cas et il n'existe pas de solution pour la chaîne cinématique de manipulation du m-bot.

– *Pour la base* $(R_{l_1})_2 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$ *:*
Ici, le problème précédent ne se pose pas car $(R_{l_1})_2 \subset (R_m^{min})$. Les vitesses manquantes pour reconstruire (R_m^{min}) sont $\boldsymbol{v}_y$ et $\boldsymbol{v}_z$. Ainsi, la première base pour l'espace vectoriel de la chaîne cinématique de manipulation à deux liaisons peut s'écrire sous la forme :

$$(R^2_{manip})_1 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z) \tag{3.17}$$

où l'exposant 2 de (R^2_{manip}) représente le nombre de liaisons dans la chaîne cinématique de manipulation.
De cette première base, nous pouvons construire les autres bases possibles, car la vitesse $\boldsymbol{v}_x$ peut être générée par $\boldsymbol{\omega}_y$ ou $\boldsymbol{\omega}_z$. De même pour la vitesse $\boldsymbol{v}_y$, qui peut être générée par $\boldsymbol{\omega}_x$ ou $\boldsymbol{\omega}_z$. Ainsi, les bases possibles sont présentées dans la table 3.2.

$(R^2_{manip})_1 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z)$	$(R^2_{manip})_5 = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(R^2_{manip})_2 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x)$	$(R^2_{manip})_6 = (\boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(R^2_{manip})_3 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_y)$	$(R^2_{manip})_7 = (\boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$
$(R^2_{manip})_4 = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x)$	$(R^2_{manip})_8 = (\boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$

TABLE 3.2 – Les bases (R^2_{manip}) complétant $(R_{l_1})_2$ pour atteindre (R_m^{min})

Maintenant, nous construisons l'agencement des liaisons qui permettent d'obtenir les vitesses présentes dans chaque base de R_{manip}. En première étape, les vitesses $\boldsymbol{v}$ et $\boldsymbol{\omega}$ sont générées par les liaisons $[P]$ et $[R]$ respectivement, ce qui donne les chaînes cinématiques $[L^2_{manip}]_i$ calquées sur les résultats de la table 3.2, avec $i = 1, \ldots, 8$. La deuxième étape consiste à remplacer les liaisons prismatiques par des liaisons rotoïdes qui génèrent les mêmes vitesses à condition que la chaîne cinématique résultante ne soit pas déjà obtenue à l'étape précédente.

$[L^2_{manip}]_1 = [P_y, P_z]$	$[L^2_{manip}]_6 = [R_x, R_z]$
$[L^2_{manip}]_2 = [P_y, R_x]$	$[L^2_{manip}]_7 = [R_x, R_y]$
$[L^2_{manip}]_3 = [P_y, R_y]$	$[L^2_{manip}]_8 = [R_y, R_z]$
$[L^2_{manip}]_4 = [P_z, R_x]$	$[L^2_{manip}]_9 = [R_x, R_x]$
$[L^2_{manip}]_5 = [P_z, R_z]$	

TABLE 3.3 – Cinématiques des bras de manipulation à deux liaisons pour $(R_{l_1})_2$

Dans le cas présent, la table 3.3 présente les chaînes cinématiques de manipulation obtenues, avec $[L^2_{manip}]_9$ issue de la représentation de $[L^2_{manip}]_1$ avec deux liaisons pivots. C'est le seul changement possible car les autres changements génèrent des chaînes cinématiques déjà obtenues par remplacement direct des vitesses.

Pour la suite, nous appliquons la même démarche pour déterminer les chaînes

cinématiques permettant de générer les déplacements des autres bases de l'espace vectoriel R_{l_1}.

– *Pour la base* $(R_{l_1})_3 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z)$ *:*
Nous suivons les mêmes étapes que précédemment, en continuant l'énumération des bases à partir de $(R^2_{manip})_8$. Ainsi, la prochaine base pour l'espace vectoriel de manipulation peut s'écrire sous la forme :

$$(R^2_{manip})_9 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.18}$$

Cette écriture est retenue car elle n'est pas redondante avec les bases résultantes de l'étape précédente. De cette base, une seule autre base pourrait être générée, qui est :

$$(R^2_{manip})_{9'} = (\boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.19}$$

Cette dernière base n'est pas retenue car elle est redondante avec la base $(R^2_{manip})_6$. Ensuite, les chaînes cinématiques résultantes sont générées en faisant attention à ne pas avoir de redondance avec celles qui ont été générées pour les bases déjà considérées. Les cinématiques des bras de manipulation sont présentés à la table 3.4.

$[L^2_{manip}]_{10} = [P_y, R_z]$	$[L^2_{manip}]_{11} = [R_z, R_z]$

Table 3.4 – Cinématiques des bras de manipulation à deux liaisons pour $(R_{l_1})_3$

– *Pour la base* $(R_{l_1})_4 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y)$ *:*
Nous suivons les mêmes étapes que précédemment. La prochaine base de l'espace vectoriel de manipulation à deux liaisons peut s'écrire sous la forme :

$$(R^2_{manip})_{10'} = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.20}$$

Cette base est la même que $(R^2_{manip})_5$, ainsi toutes les solutions qui vont être générées par cette base ont déjà été présentées auparavant.

Finalement, les cinématiques des bras de manipulation à deux liaisons qui peuvent être utilisés comme partie manipulation pour les m-bots sont présentées dans la table 3.5.

$[L^2_{manip}]_1 = [P_y, P_z]$	$[L^2_{manip}]_7 = [R_x, R_y]$
$[L^2_{manip}]_2 = [P_y, R_x]$	$[L^2_{manip}]_8 = [R_y, R_z]$
$[L^2_{manip}]_3 = [P_y, R_y]$	$[L^2_{manip}]_9 = [R_x, R_x]$
$[L^2_{manip}]_4 = [P_z, R_x]$	$[L^2_{manip}]_{10} = [P_y, R_z]$
$[L^2_{manip}]_5 = [P_z, R_z]$	$[L^2_{manip}]_{11} = [R_z, R_z]$
$[L^2_{manip}]_6 = [R_x, R_z]$	

Table 3.5 – Cinématiques des bras de manipulation à deux liaisons

Cette méthode génère 11 solutions qui respectent les contraintes appliquées aux paramètres structuraux des m-bots. Ceci est à comparer avec les 36 architectures possibles

générées par l'énumération combinatoire et qui nécessitent chacune le calcul des paramètres structuraux pour vérifier si celles-ci respectent le cahier des charges.

3.2.1.2 Construction des chaînes de manipulation à trois liaisons

En utilisant trois liaisons, nous obtenons un degré de redondance opérationnelle au sein du m-bot sans pour autant affecter la redondance structurelle. Dans ce cas, on vise à construire une base (R_m^5) (exposant 5 pour indiquer la connectivité du m-bot) qui possède une vitesse supplémentaire par rapport à la base minimale $(R_m^{min}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z)$. Cette vitesse supplémentaire représente la redondance opérationnelle. Deux vitesses encore non considérées sont possibles, et donc deux bases des déplacements (R_m) du m-bot :

- $(R_m^{5a}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$ où la vitesse $\boldsymbol{\omega}_x$ représente la redondance opérationnelle.
- $(R_m^{5b}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$ où la vitesse $\boldsymbol{\omega}_y$ représente la redondance opérationnelle.

Ainsi, pour les deux bases possibles des mouvements du m-bot, nous suivons la même méthode utilisée pour la génération des solutions à deux liaisons. Le but est d'obtenir les bases des espaces vectoriels de la partie manipulation à trois liaisons (R_{manip}^3) et l'ensemble des cinématiques $[L_{manip}^3]$ des bras de manipulation correspondants.

Synthèse pour $(R_m^{5a}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$

- *Pour* (R_m^{5a}) *et* $(R_{l1})_1 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$ *:*
  Pas de solution possible.
- *Pour* (R_m^{5a}) *et* $(R_{l_1})_2 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$ *:*
  Les bases possibles sont présentées en table 3.6 et les cinématiques des bras de manipulation résultants sont présentées en table 3.7.

$(R_{manip}^3)_1 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x)$	$(R_{manip}^3)_3 = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(R_{manip}^3)_2 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$	$(R_{manip}^3)_4 = (\boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$

TABLE 3.6 – Les bases (R_{manip}^3) complétant $(R_{l_1})_2$ pour atteindre (R_m^{5a})

$[L_{manip}^3]_1 = [P_y, P_z, R_x]$	$[L_{manip}^3]_5 = [P_y, R_x, R_x]$
$[L_{manip}^3]_2 = [P_y, R_x, R_y]$	$[L_{manip}^3]_6 = [R_x, R_x, R_x]$
$[L_{manip}^3]_3 = [P_z, R_x, R_z]$	$[L_{manip}^3]_7 = [R_z, R_x, R_x]$
$[L_{manip}^3]_4 = [R_x, R_y, R_z]$	$[L_{manip}^3]_8 = [R_x, R_y, R_x]$

TABLE 3.7 – Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour $(R_{l_1})_2$ du m-bot de base (R_m^{5a})

Dans cette table, les cinématiques $[L_{manip}^3]_i$ $(i = 1, \ldots, 4)$ sont directement issues des bases de la table 3.6, et $[L_{manip}^3]_j$ $(j = 5, \ldots, 8)$ sont obtenues par substitution

des liaisons rotoïdes.

– *Pour* (R_m^{5a}) *et* $(R_{l_1})_3 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z)$ *:*
Une seule base possible pour R^3_{manip} dans ce cas, qui est notée :

$$(R^3_{manip})_5 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.21}$$

Cette base peut générer deux chaînes cinématiques (présentées en table 3.8) de manipulation qui ne sont pas redondantes avec les solutions précédentes. La cinématique $[L^3_{manip}]_9$ est directement issue de la base $(R^3_{manip})_5$, et $[L^3_{manip}]_{10}$ est obtenue par substitution de la liaison prismatique par une rotoïde.

$[L^3_{manip}]_9 = [P_y, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{10} = [R_z, R_x, R_z]$

Table 3.8 – Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour $(R_{l_1})_3$ du m-bot de base (R_m^{5a})

– *Pour* (R_m^{5a}) *et* $(R_{l_1})_4 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y)$ *:*
Une seule base possible pour R^3_{manip} dans ce cas, qui est notée :

$$(R^3_{manip})_{6'} = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.22}$$

Cette base est la même que $(R^3_{manip})_3$. Ainsi, ce dernier cas de figure ne génère pas d'autres solutions pour la chaîne cinématique de manipulation du m-bot.

Finalement, les chaînes cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons qui permettent la construction du m-bot de base (R_m^{5a}) sont présentées en table 3.9.

$[L^3_{manip}]_1 = [P_y, P_z, R_x]$	$[L^3_{manip}]_6 = [R_x, R_x, R_x]$
$[L^3_{manip}]_2 = [P_y, R_x, R_y]$	$[L^3_{manip}]_7 = [R_z, R_x, R_x]$
$[L^3_{manip}]_3 = [P_z, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_8 = [R_x, R_y, R_x]$
$[L^3_{manip}]_4 = [R_x, R_y, R_z]$	$[L^3_{manip}]_9 = [P_y, R_x, R_z]$
$[L^3_{manip}]_5 = [P_y, R_x, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{10} = [R_z, R_x, R_z]$

Table 3.9 – Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour le m-bot (R_m^{5a})

Ces architectures représentent toutes les solutions possibles pour le m-bot de base $(R_m^{5a}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$ qui respectent les contraintes associées aux paramètres structuraux. Des calculs de vérifications des paramètres structuraux sont présentées un peu plus loin dans ce chapitre.

Synthèse pour $(R_m^{5b}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$

En suivant la même méthode pour générer les solutions pour le m-bot de base (R_m^{5a}), nous obtenons les solutions des bases présentées en table 3.10 en poursuivant la numérotation de la dernière base $(R^3_{manip})_5$. Les bras de manipulation sont, quant à eux, présentés en table 3.11.

$(R^3_{manip})_6 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R^3_{manip})_{11} = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y)$
$(R^3_{manip})_7 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R^3_{manip})_{12} = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$
$(R^3_{manip})_8 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R^3_{manip})_{13} = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$
$(R^3_{manip})_9 = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R^3_{manip})_{14} = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(R^3_{manip})_{10} = (\boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	

TABLE 3.10 – Les bases des vitesses (R^3_{manip}) pour le m-bot (R_m^{5b})

$[L^3_{manip}]_{11} = [P_y, P_z, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{20} = [P_y, P_z, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{12} = [P_y, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{21} = [P_y, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{13} = [P_y, R_y, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{22} = [P_z, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{14} = [R_z, R_z, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{23} = [P_z, R_y, R_z]$
$[L^3_{manip}]_{15} = [R_x, R_y, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{24} = [P_y, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{16} = [P_z, R_z, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{25} = [R_x, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{17} = [R_x, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{26} = [R_x, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{18} = [R_x, R_z, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{27} = [R_z, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{19} = [R_y, R_z, R_z]$	

TABLE 3.11 – Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons pour le m-bot (R_m^{5b})

En conclusion de la démarche de synthèse structurale concernant la partie manipulation à trois liaisons, la table 3.12 présente toutes les chaînes cinématiques possibles qui respectent les contraintes associées aux paramètres structuraux des m-bots.

$[L^3_{manip}]_1 = [P_y, P_z, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{15} = [R_x, R_y, R_z]$
$[L^3_{manip}]_2 = [P_y, R_x, R_y]$	$[L^3_{manip}]_{16} = [P_z, R_z, R_z]$
$[L^3_{manip}]_3 = [P_z, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{17} = [R_x, R_x, R_z]$
$[L^3_{manip}]_4 = [R_x, R_y, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{18} = [R_x, R_z, R_z]$
$[L^3_{manip}]_5 = [P_y, R_x, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{19} = [R_y, R_z, R_z]$
$[L^3_{manip}]_6 = [R_x, R_x, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{20} = [P_y, P_z, R_y]$
$[L^3_{manip}]_7 = [R_z, R_x, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{21} = [P_y, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_8 = [R_x, R_y, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{22} = [P_z, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_9 = [P_y, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{23} = [P_z, R_y, R_z]$
$[L^3_{manip}]_{10} = [R_z, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{24} = [P_y, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{11} = [P_y, P_z, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{25} = [R_x, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{12} = [P_y, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{26} = [R_x, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{13} = [P_y, R_y, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{27} = [R_z, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{14} = [R_z, R_z, R_z]$	

Table 3.12 – Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons

3.2.1.3 Construction des chaînes de manipulation à quatre liaisons

Une chaîne de manipulation contenant quatre liaisons est redondante avec une redondance opérationnelle de degrés deux avec la base de l'espace vectoriel des vitesses du m-bot $(R_m^6) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$. Les deux vitesses angulaires $\boldsymbol{\omega}_x$ et $\boldsymbol{\omega}_y$ sont les redondances opérationnelles qui n'influencent pas les paramètres structuraux des m-bots, et ainsi ne changent pas la redondance T_m du m-bot.

En suivant la même démarche que précédemment, nous obtenons les bases possibles pour l'espace vectoriel de manipulation (R_{manip}^4) de dimension quatre présentées à la table 3.13, et les chaînes cinématiques correspondantes $[L_{manip}^4]$ présentées à la table 3.14.

$(R_{manip}^4)_1 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_{manip}^4)_3 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(R_{manip}^4)_2 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$	$(R_{manip}^4)_4 = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$

TABLE 3.13 – Les bases des vitesses (R_{manip}^4) pour le m-bot (R_m^6)

$[L_{manip}^4]_1 = [P_y, P_z, R_x, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{10} = [P_y, P_z, R_x, R_y]$
$[L_{manip}^4]_2 = [P_y, R_x, R_y, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{11} = [R_z, R_y, R_z, R_z]$
$[L_{manip}^4]_3 = [P_y, R_x, R_x, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{12} = [P_y, R_x, R_x, R_y]$
$[L_{manip}^4]_4 = [P_z, R_x, R_x, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{13} = [P_y, R_x, R_y, R_y]$
$[L_{manip}^4]_5 = [P_z, R_x, R_z, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{14} = [P_z, R_x, R_x, R_y]$
$[L_{manip}^4]_6 = [R_x, R_x, R_x, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{15} = [R_x, R_x, R_x, R_y]$
$[L_{manip}^4]_7 = [R_x, R_x, R_z, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{16} = [R_x, R_x, R_y, R_y]$
$[L_{manip}^4]_8 = [R_x, R_x, R_y, R_z]$	$[L_{manip}^4]_{17} = [R_x, R_y, R_y, R_z]$
$[L_{manip}^4]_9 = [R_x, R_y, R_z, R_z]$	

TABLE 3.14 – Cinématiques des bras de manipulation à trois liaisons

Finalement, cette démarche de synthèse structurale génère 55 solutions présentées en table 3.15. Ces solutions sont à comparer aux 1548 architectures possibles générées par énumération combinatoire. La différence vient du fait que les solutions générées par notre démarche respectent les contraintes associées aux paramètres structuraux établis dans la section 3.1.

$[L^2_{manip}]_1 = [P_y, P_z]$	$[L^2_{manip}]_7 = [R_x, R_y]$
$[L^2_{manip}]_2 = [P_y, R_x]$	$[L^2_{manip}]_8 = [R_y, R_z]$
$[L^2_{manip}]_3 = [P_y, R_y]$	$[L^2_{manip}]_9 = [R_x, R_x]$
$[L^2_{manip}]_4 = [P_z, R_x]$	$[L^2_{manip}]_{10} = [P_y, R_z]$
$[L^2_{manip}]_5 = [P_z, R_z]$	$[L^2_{manip}]_{11} = [R_z, R_z]$
$[L^2_{manip}]_6 = [R_x, R_z]$	
$[L^3_{manip}]_1 = [P_y, P_z, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{15} = [R_x, R_y, R_z]$
$[L^3_{manip}]_2 = [P_y, R_x, R_y]$	$[L^3_{manip}]_{16} = [P_z, R_z, R_z]$
$[L^3_{manip}]_3 = [P_z, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{17} = [R_x, R_x, R_z]$
$[L^3_{manip}]_4 = [R_x, R_y, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{18} = [R_x, R_z, R_z]$
$[L^3_{manip}]_5 = [P_y, R_x, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{19} = [R_y, R_z, R_z]$
$[L^3_{manip}]_6 = [R_x, R_x, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{20} = [P_y, P_z, R_y]$
$[L^3_{manip}]_7 = [R_z, R_x, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{21} = [P_y, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_8 = [R_x, R_y, R_x]$	$[L^3_{manip}]_{22} = [P_z, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_9 = [P_y, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{23} = [P_z, R_y, R_z]$
$[L^3_{manip}]_{10} = [R_z, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{24} = [P_y, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{11} = [P_y, P_z, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{25} = [R_x, R_x, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{12} = [P_y, R_x, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{26} = [R_x, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{13} = [P_y, R_y, R_z]$	$[L^3_{manip}]_{27} = [R_z, R_y, R_y]$
$[L^3_{manip}]_{14} = [R_z, R_z, R_z]$	
$[L^4_{manip}]_1 = [P_y, P_z, R_x, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{10} = [P_y, P_z, R_x, R_y]$
$[L^4_{manip}]_2 = [P_y, R_x, R_y, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{11} = [R_z, R_y, R_z, R_z]$
$[L^4_{manip}]_3 = [P_y, R_x, R_x, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{12} = [P_y, R_x, R_x, R_y]$
$[L^4_{manip}]_4 = [P_z, R_x, R_x, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{13} = [P_y, R_x, R_y, R_y]$
$[L^4_{manip}]_5 = [P_z, R_x, R_z, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{14} = [P_z, R_x, R_x, R_y]$
$[L^4_{manip}]_6 = [R_x, R_x, R_x, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{15} = [R_x, R_x, R_x, R_y]$
$[L^4_{manip}]_7 = [R_x, R_x, R_z, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{16} = [R_x, R_x, R_y, R_y]$
$[L^4_{manip}]_8 = [R_x, R_x, R_y, R_z]$	$[L^4_{manip}]_{17} = [R_x, R_y, R_y, R_z]$
$[L^4_{manip}]_9 = [R_x, R_y, R_z, R_z]$	

TABLE 3.15 – Les 55 chaînes cinématiques de manipulation synthétisées, 11 à deux liaisons, 27 à trois liaisons et 17 à quatre liaisons

Remarque :
Les chaînes cinématiques solutions présentées peuvent être modifiées en changeant l'ordre des liaisons. Par exemple :

$$[R_z, R_x, R_x] \equiv [R_x, R_x, R_z] \tag{3.23}$$

Si cette option est prise en compte, le nombre de chaînes cinématiques va augmenter. Ce n'est pas l'option retenue car le but de la démarche présentée est de proposer au moins une solution pour chaque cas, et non pas de lister toutes les solutions possibles.

3.2.1.4 Règles de sélection des m-bots

Les solutions présentées dans la table 3.15 respectent les contraintes associées aux paramètres structuraux des m-bots. Maintenant, nous devons confronter ces solutions aux spécifications de la tâche et de l'environnement. C'est l'un des intérêts de cette méthode, car pour un autre type de tâche à réaliser, il est juste nécessaire de définir des nouvelles règles de sélection et de choisir parmi les architectures déjà présentées dans la table précédente.

Pour les tâches considérées, trois règles de sélection des solutions sont utilisées pour définir les architectures retenues pour les m-bots :

- Règle 1 : *RS_Levage*
  La chaîne cinématique de locomotion considérée est stabilisée dynamiquement uniquement dans les phases de manipulation et transport de la charge. Pour permettre cette stabilisation, l'angle de tangage ne doit pas être utilisé comme mobilité pour effectuer la tâche, mais plutôt pour la stabilisation dynamique. Ainsi, les mobilités du levage possibles dans le plan (xz) ($\boldsymbol{v}_z$ et/ou $\boldsymbol{\omega}_y$) doivent être contenues dans la chaîne cinématique de manipulation. Ainsi, toutes les solutions qui ne contiennent pas une liaison qui permet de générer au moins une de ces mobilités doivent être éliminées.

- Règle 2 : *RS_Charge_Horizontale*
  Dans la description de la tâche, la charge doit toujours rester quasi horizontale car les caisses sont ouvertes sur le dessus et contiennent de petites pièces ne devant pas être renversées ou mises en désordre. Sachant que la chaîne cinématique de locomotion contient déjà une rotation $\boldsymbol{\omega}_y$, la chaîne cinématique de manipulation doit donc permettre la mobilité dans le plan (xz), réalisée soit par les deux vitesses $\boldsymbol{v}_x$ et $\boldsymbol{v}_z$ ou bien par la vitesse $\boldsymbol{\omega}_y$.

- Règle 3 : *RS_Braquage_p-bot*
  Dans le cas du p-bot, les architectures de m-bots utilisées sont celles retenues après l'application des règles de sélection 1 et 2. En plus, pour permettre le braquage sans ripage lors de leur utilisation en configuration p-bot, chaque m-bot doit comporter dans sa chaîne cinématique de manipulation une liaison pivot d'axe $\vec{z}_O$ (cf. figure 2.15a).

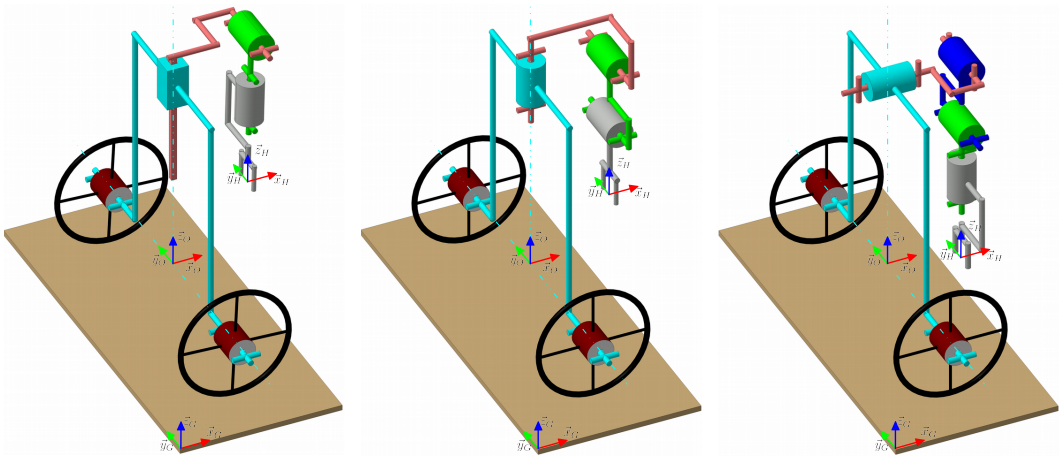
Ainsi, nous appliquons ces règles sur les chaînes cinématiques de manipulation de la table 3.15. Finalement, les architectures qui respectent ces règles de sélection sont présentées dans la table 3.16.

Les m-bots résultants sont nommés suivant leur bras de manipulation, c'est-à-dire *m-bot*$^{L3-23}$, *m-bot*$^{L3-27}$ et *m-bot*$^{L4-17}$ pour les m-bots équipés des bras $[L^3_{manip}]_{23}$, $[L^3_{manip}]_{27}$ et

$[L^3_{manip}]_{23} = [P_z, R_y, R_z]$
$[L^3_{manip}]_{27} = [R_z, R_y, R_y]$
$[L^4_{manip}]_{17} = [R_x, R_y, R_y, R_z]$

TABLE 3.16 – Les bras de manipulation retenus après sélection

$[L^4_{manip}]_{17}$ respectivement. Une première présentation sous forme de schéma cinématique 3D en CAO est illustrée à la figure 3.2.



(a) *m-bot*$^{L3-23}$ (b) *m-bot*$^{L3-27}$ (c) *m-bot*$^{L4-17}$

FIGURE 3.2 – Les m-bots retenus après la sélection

3.2.2 Vérification des paramètres structuraux des m-bots

Après obtention des chaînes cinématiques de manipulation des m-bots, et pour confirmer que la démarche de synthèse structurale aboutit à des architectures qui respectent les contraintes associées aux paramètres structuraux, ces derniers vont être calculés pour les trois solutions retenues. Nous rappelons les contraintes qui ont été établies dans la section 3.1.1 :

- Connectivité désirée : $S^d_m \geq 4$
- Redondance désirée : $T^d_m = 0$
- Degré d'hyperstatisme désiré : $N^d_m = 0$

Sachant que les paramètres structuraux de la partie locomotion ont déjà été calculés, nous reprenons donc le calcul à partir de l'équation 2.21. Dans cette équation, deux inconnues restent à déterminer : $dim(R_{manip})$ et $dim(R_{l_1} \cap R_{manip})$. Pour la première inconnue, le calcul est direct à partir de la mobilité de la partie manipulation. Par ailleurs, pour la deuxième inconnue, le calcul doit être réalisé en considérant la note 1 (cf. page 49). Ceci nécessite de représenter toutes les bases possibles pour R_{l_1} et R_{manip} et ensuite sélectionner l'intersection qui donne la valeur minimale de la connectivité S_{com}. Sachant que les bases possibles pour R_{l1} ont été présentées dans la table 3.1, les bases possibles pour R_{manip} sont différentes pour chaque architecture de m-bot :

– *m-bot*$^{L3-23}$:
On commence par calculer la mobilité du m-bot. Pour ce calcul, il manque la mobilité de la chaîne cinématique de manipulation M_{manip}. Elle est calculée grâce à l'équation 2.24 en connaissant le nombre de liaisons (3) et la mobilité de chaque liaison (1), ainsi :

$$M_{manip}^{L3-23} = 3 \tag{3.24}$$

On remplace cette valeur dans l'équation 2.23, connaissant la valeur de M_{l_1} calculée dans l'équation 2.13. Finalement, on obtient la mobilité du *m-bot*$^{L3-23}$, avec :

$$M_m^{L3-23} = 5 \tag{3.25}$$

Pour la connectivité S_{manip}, et d'après l'équation 3.9, celle-ci est déduite de la mobilité de la chaîne de manipulation, c'est-à-dire :

$$S_{manip}^{L3-23} = 3 \tag{3.26}$$

La base des vitesses (R_{manip}) qui a généré le bras de manipulation $[L_{manip}^3]_{23}$ est $(R_{manip}^3)_{14} = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$. On remarque que l'intersection de cette base avec $(R_{l_1})_4 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y)$ donne une connectivité nulle, ainsi :

$$S_{com}^{L3-23} = 0 \tag{3.27}$$

et sachant que S_{l_1} a été déjà calculée dans l'équation 2.8, on déduit la connectivité du *m-bot*$^{L3-23}$, avec :

$$S_m^{L3-23} = 5 \tag{3.28}$$

Pour la redondance, elle est directement déduite en remplaçant les valeurs de la mobilité et la connectivité calculées dans l'équation 2.25, et on obtient la redondance du *m-bot*$^{L3-23}$:

$$T_m^{L3-23} = 0 \tag{3.29}$$

Cette valeur pourrait être déduite aussi de l'équation 2.26.
Finalement, le degré d'hyperstatisme du *m-bot*$^{L3-23}$ a été calculé dans l'équation 2.27, et on obtient :

$$N_m^{L3-23} = 0 \tag{3.30}$$

En résumé, les paramètres structuraux du *m-bot*$^{L3-23}$ sont :

- La connectivité :	S_m^{L3-23}	$=$	5
- La mobilité :	M_m^{L3-23}	$=$	5
- La redondance :	T_m^{L3-23}	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	N_m^{L3-23}	$=$	0

Ces valeurs sont en adéquation avec les contraintes sur les paramètres structuraux établies dans la section 3.1.1.

– *m-bot*$^{L3-27}$:
On suivra les mêmes étapes utilisées pour le calcul des paramètres structuraux du *m-bot*$^{L3-23}$. Ainsi, la mobilité du *m-bot*$^{L3-27}$ est :

$$M_m^{L3-27} = 5 \tag{3.31}$$

La chaîne cinématique de manipulation est générée par la même base génératrice $(R_{l_1})_4 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y)$, ce qui donne le même résultat pour la connectivité. Ainsi, la connectivité du *m-bot*$^{L3-27}$ est donnée par :

$$S_m^{L3-27} = 5 \tag{3.32}$$

Finalement, les paramètres structuraux du *m-bot*$^{L3-27}$ sont :

- La connectivité :	S_m^{L3-27}	$=$	5
- La mobilité :	M_m^{L3-27}	$=$	5
- La redondance :	T_m^{L3-27}	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	N_m^{L3-27}	$=$	0

Ce sont les mêmes valeurs que pour le *m-bot*$^{L3-23}$, ce qui est prévisible puisqu'ils contiennent le même nombre de liaisons et ils ont la même base génératrice du bras de manipulation.

– *m-bot*$^{L4-17}$:
De même pour cette configuration, le calcul sera similaire aux deux cas précédents. La différence concerne le nombre de solides dans la chaîne cinématique de manipulation, ce qui donne $M_{manip}^{L4-17} = 4$ suivant l'équation 2.24. Donc, l'évaluation de la mobilité du *m-bot*$^{L4-17}$ donne :

$$M_m^{L4-17} = 6 \tag{3.33}$$

Pour le calcul de la connectivité, il faut maintenant considérer la base génératrice de la chaîne cinématique de manipulation $[L_{manip}^4]_{17}$ qui est la base $(R_{manip}^4)_3 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$. Cette base a une intersection nulle avec la base $(R_{l_1})_2 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$ de la chaîne cinématique de locomotion. Ainsi, la connectivité du *m-bot*$^{L4-17}$ donne :

$$S_m^{L4-17} = 6 \tag{3.34}$$

Ceci implique une redondance nulle pour le *m-bot*$^{L4-17}$ et toujours la même valeur pour le degré d'hyperstatisme. Ainsi, les paramètres structuraux du *m-bot*$^{L4-17}$ sont :

- La connectivité :	S_m^{L4-17}	$=$	6
- La mobilité :	M_m^{L4-17}	$=$	6
- La redondance :	T_m^{L4-17}	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	N_m^{L4-17}	$=$	0

Finalement, les paramètres structuraux calculés pour les m-bots sélectionnés sont présentés à la table 3.17.

De l'évaluation des paramètres structuraux, on conclut que la méthode de synthèse structurale est efficace pour générer des architectures de m-bots respectant les contraintes associées aux paramètres structuraux présentées à la section 3.1.1.

	$m\text{-}bot^{L3-23}$	$m\text{-}bot^{L3-27}$	$m\text{-}bot^{L4-17}$
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

TABLE 3.17 – Les paramètres structuraux calculés des m-bots sélectionnés

3.3 Synthèse structurale des p-bots

Nous entrons maintenant dans la deuxième étape de la démarche de synthèse structurale qui concerne la synthèse des p-bots à partir des architectures des m-bots retenues (figure 3.1). Pour chacune d'entre elles, les deux types de formations de p-bots (co-manipulation et connexion) vont être considérés successivement. Ensuite, le calcul des paramètres structuraux des p-bots sera effectué et on ne gardera que les formations qui respectent les contraintes sur les paramètres structuraux du p-bot. Sachant que ce calcul est différent pour les deux types de formation, chaque cas va être étudié séparément.

3.3.1 Paramètres structuraux des p-bots en mode co-manipulation

La méthode de calcul des paramètres structuraux pour la formation en co-manipulation a été présentée dans la section 2.4.4.1. Nous appliquons la méthode sur les trois structures retenues des m-bots.

- $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$:
  Le graphe de structure correspondant à la formation du p-bot est présenté à la figure 3.3a. Quelques étapes critiques de scénario de la réalisation de la tâche sont présentées à la figure 3.3 : approche des m-bots des deux côtés de la charge (figure 3.3b), préhension et levage (figure 3.3c) et braquage sous charge en cours de déplacement (figure 3.3d). L'ensemble des étapes du scénario a été présenté à la section 2.3.3.
  Pour le calcul des paramètres structuraux, le premier paramètre à évaluer concerne la connectivité du $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$ notée $S^{L3-23}_{p-comanip}$. Pour ce faire, nous reprenons le calcul à partir de l'équation 2.29. Les espaces vectoriels $R_{G^p_1}$ et $R_{G^p_2}$ ont une écriture identique et unique (R_{G^p}), avec :

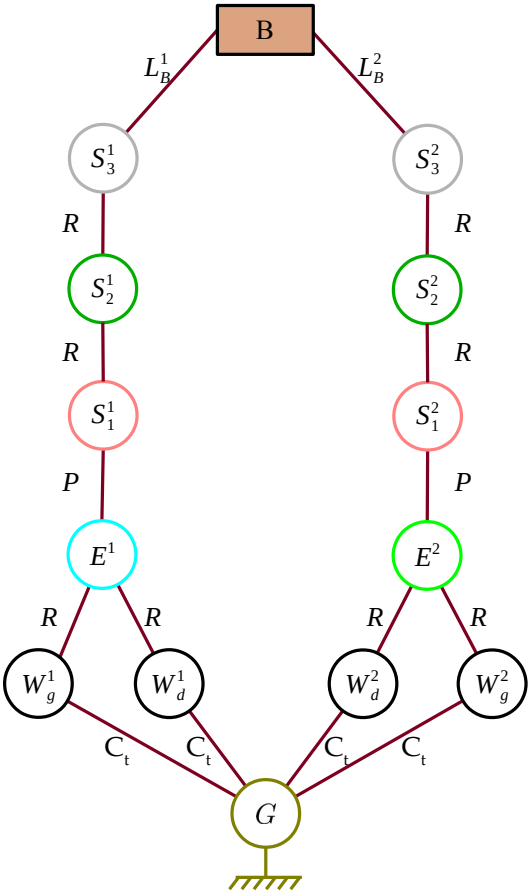
$$(R_{G^p}) = (R^{5b}_m) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.35}$$

  Par conséquent, la connectivité du $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$ est égale à :

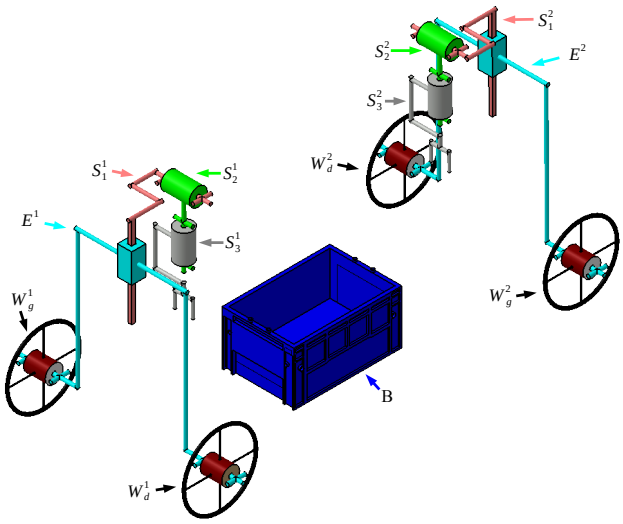
$$S^{L3-23}_{p-comanip} = 5 \tag{3.36}$$

  Le deuxième paramètre à calculer concerne la mobilité du $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$ notée $M^{L3-23}_{p-comanip}$. Elle nécessite le calcul du paramètre $r^{L3-23}_{p-comanip}$, évalué en utilisant l'équation 2.32, avec :

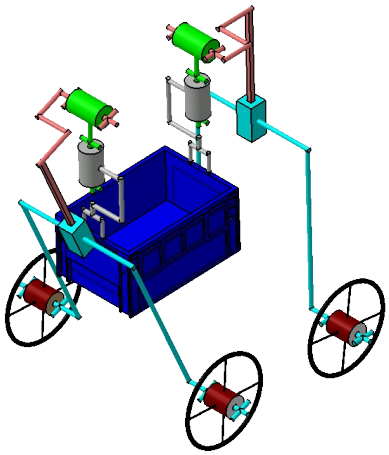
$$r^{L3-23}_{p-comanip} = S_{G^p_1} + S_{G^p_2} - S^{L3-23}_{p-comanip} + r_{l-comanip} \tag{3.37}$$



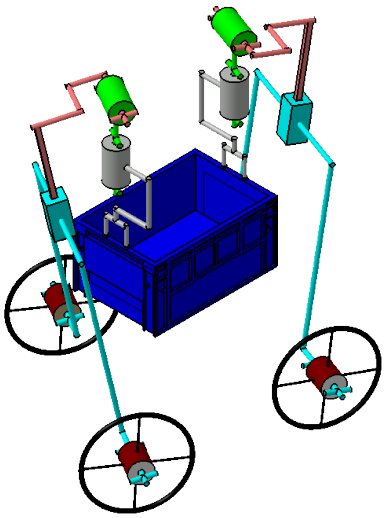
(a) Graphe de structure



(b) Approche



(c) Levage



(d) Braquage

FIGURE 3.3 – Présentation du *p-bot*$^{L3-23}$ en co-manipulation

Toutes les inconnus du deuxième terme de l'équation 3.37 sont connues, avec $S_{G_1^p} = S_{G_2^p} = 5$ (connectivité du m-bot^{L3-23}, équation 3.28), $S^{L3-23}_{p-comanip} = 5$ (équation 3.36) et $r_{l-comanip} = 12$ (équation 2.33). Ainsi :

$$r^{L3-23}_{p-comanip} = 5 + 5 - 5 + 12 = 17 \tag{3.38}$$

On remplace la valeur de $r^{L3-23}_{p-comanip}$ dans l'équation 2.31 pour le calcul de la mobilité, avec $p = 16$ liaisons dont 2 n'ont pas de mobilité (encastrement de l'outil à la charge), 4 ont 3 mobilités (contact roue-sol) et les autres liaisons (prismatiques et rotoïdes) ont une seule mobilité. On obtient finalement :

$$M^{L3-23}_{p-comanip} = (2 \times 0) + (4 \times 3) + (10 \times 1) - 17 = 5 \tag{3.39}$$

La connectivité et la mobilité étant connues, la redondance du $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$ est directement déduite (équation 2.25), avec :

$$T^{L3-23}_{p-comanip} = 0 \tag{3.40}$$

Finalement, le degré d'hyperstatisme est calculé en utilisant l'équation 2.34, sachant que $q = 3$, on obtient alors :

$$N^{L3-23}_{p-comanip} = 1 \tag{3.41}$$

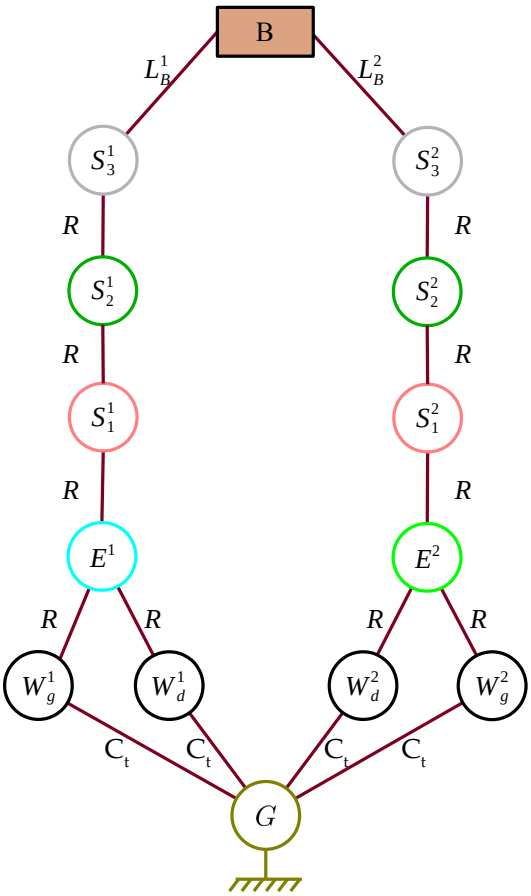
En récapitulant, les paramètres structuraux du $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$ en co-manipulation sont :

- La connectivité :	$S^{L3-23}_{p-comanip}$	$=$	5
- La mobilité :	$M^{L3-23}_{p-comanip}$	$=$	5
- La redondance :	$T^{L3-23}_{p-comanip}$	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	$N^{L3-23}_{p-comanip}$	$=$	1

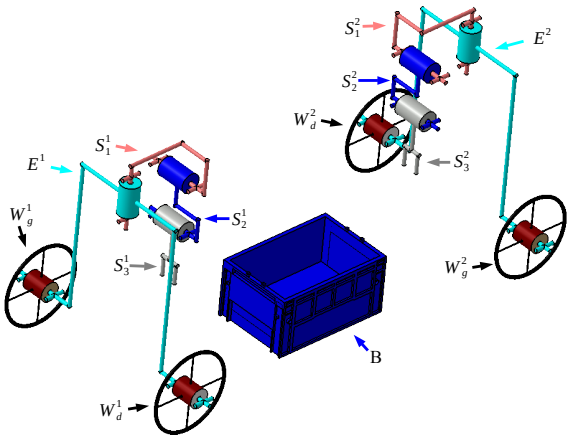
– $p\text{-}bot^{L3-27}_{comanip}$:
Le graphe de structure et la représentation des étapes critiques de la nouvelle cinématique en co-manipulation sont illustrés à la figure 3.4. Le calcul des paramètres structuraux est identique au cas précédent, car ceux-ci ont la même base (R_{G^p}) de leurs jambes complexes. Nous obtenons donc pour le $p\text{-}bot^{L3-27}_{comanip}$ en co-manipulation les paramètres suivants :

- La connectivité :	$S^{L3-27}_{p-comanip}$	$=$	5
- La mobilité :	$M^{L3-27}_{p-comanip}$	$=$	5
- La redondance :	$T^{L3-27}_{p-comanip}$	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	$N^{L3-27}_{p-comanip}$	$=$	1

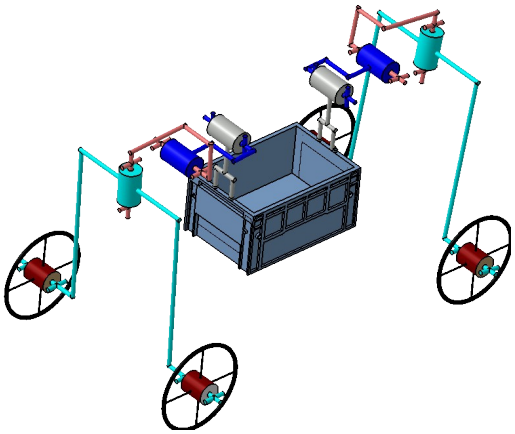
– $p\text{-}bot^{L4-17}_{comanip}$:
Cette cinématique est présentée à la figure 3.5. Le seul changement de cette formation par rapport au deux cas précédents concerne les chaînes cinématiques de manipulation des m-bots qui contiennent une liaison supplémentaire (figure 3.5a). Les étapes critiques de la réalisation de la tâche son présentées à la figure 3.5b (approche), figure 3.5c (levage) et figure 3.5d (braquage).



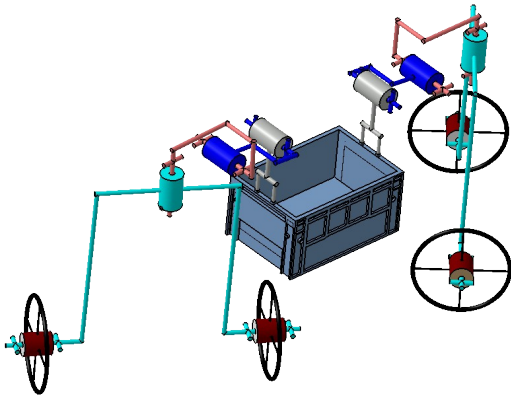
(a) Graphe de structure



(b) Approche

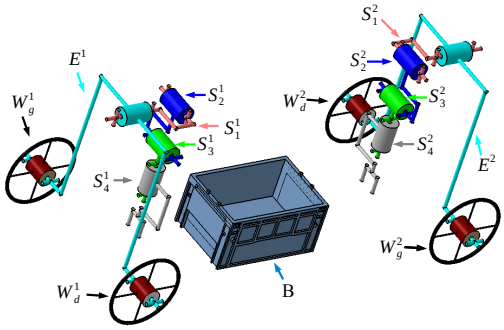


(c) Levage

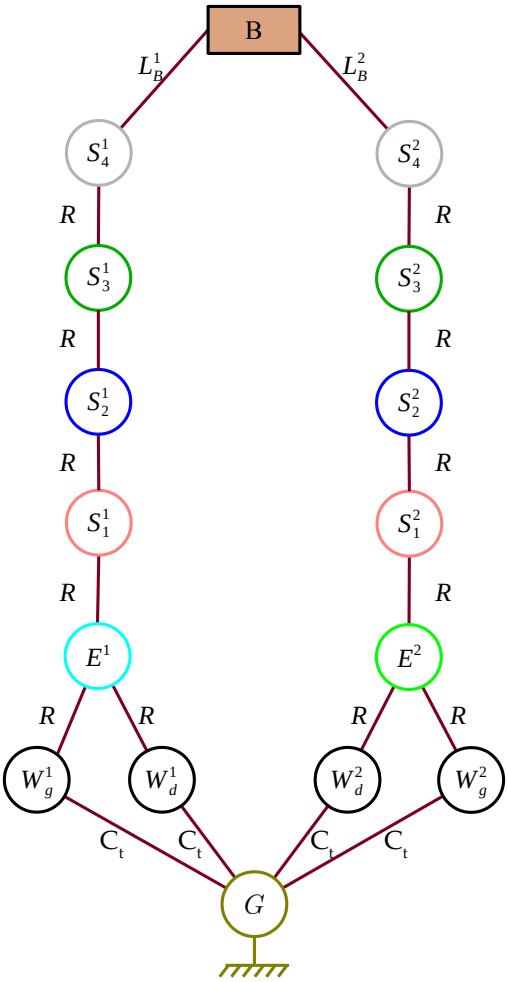


(d) Braquage

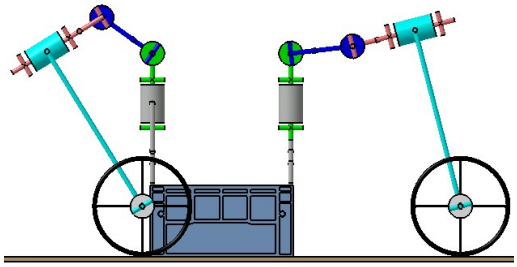
FIGURE 3.4 – Présentation du *p-bot*$^{L3-27}$ en co-manipulation



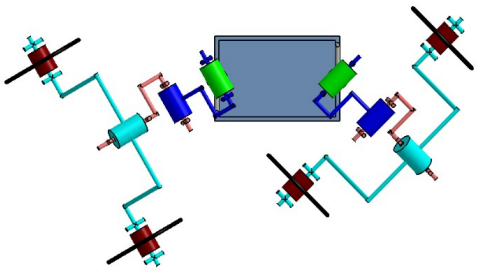
(b) Approche



(a) Graphe de structure



(c) Levage



(d) Braquage

FIGURE 3.5 – Présentation du *p-bot*$^{L4-17}$ en co-manipulation

La connectivité du p-bot dans cette configuration est calculée en prenant en compte l'espace vectoriel de chaque m-bot. Cet espace vectoriel a une seule et unique base génératrice $\left(R_{G^p}^{L4-17}\right)$. Elle est notée :

$$\left(R_{G^p}^{L4-17}\right) = (R_m^6) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{3.42}$$

La base génératrice de l'espace vectoriel connue, la connectivité du $p\text{-}bot_{comanip}^{L4-17}$ est déduite en utilisant l'équation 2.1, ce qui donne :

$$S_{p-comanip}^{L4-17} = 6 \tag{3.43}$$

On reprend les mêmes étapes utilisées pour le calcul des paramètres structuraux du $p\text{-}bot_{comanip}^{L4-17}$. Ainsi, le calcul de $r_{p-comanip}^{L4-17}$, qui représente le nombre de liaisons qui perdent leur indépendance dans la boucle fermée du p-bot, donne :

$$r_{p-comanip}^{L4-17} = S_{G_1^p} + S_{G_2^p} - S_{p-comanip}^{L4-17} + r_{l-comanip} = 18 \tag{3.44}$$

La mobilité $M_{p-comanip}^{L4-17}$ quant à elle est calculée en considérant les liaisons supplémentaires de la chaîne cinématique de manipulation des m-bots qui forment le p-bot, donc $p = 18$ dont 2 liaisons n'ont pas de mobilité (encastrement de l'outil avec la charge), 4 liaisons possèdent 3 mobilités (liaison du contact roue-sol) et les autres liaisons rotoïdes ont une seule mobilité. On obtient finalement :

$$M_{p-comanip}^{L4-17} = (2 \times 0) + (4 \times 3) + (12 \times 1) - 18 = 6 \tag{3.45}$$

Une fois la connectivité et la mobilité calculées, la redondance du $p\text{-}bot_{comanip}^{L4-17}$ est directement déduite :

$$T_{p-comanip}^{L4-17} = 0 \tag{3.46}$$

Enfin, le degré d'hyperstatisme est calculé comme dans le cas précédent, toujours avec $q = 3$, et on obtient :

$$N_{p-comanip}^{L4-17} = 0 \tag{3.47}$$

Finalement, les paramètres structuraux du $p\text{-}bot_{comanip}^{L4-17}$ en co-manipulation sont :

- La connectivité :	$S_{p-comanip}^{L4-17}$	$=$	6
- La mobilité :	$M_{p-comanip}^{L4-17}$	$=$	6
- La redondance :	$T_{p-comanip}^{L4-17}$	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	$N_{p-comanip}^{L4-17}$	$=$	0

En résumé, les paramètres structuraux des p-bots en co-manipualtion de la charge sont présentés à la table 3.18.

	$p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$	$p\text{-}bot^{L3-27}_{comanip}$	$p\text{-}bot^{L4-17}_{comanip}$
Connectivité $S_{p-comanip}$	5	5	6
Mobilité $M_{p-comanip}$	5	5	6
Redondance $T_{p-comanip}$	0	0	0
Degré d'hyperstatisme $N_{p-comanip}$	1	1	0

TABLE 3.18 – Les paramètres structuraux calculés des p-bots en co-manipualtion

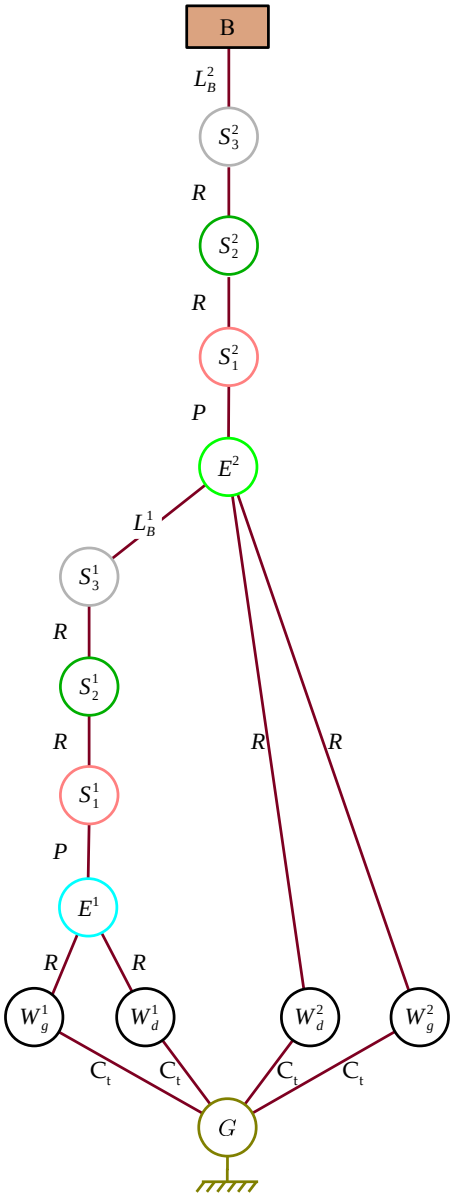
Discussion des résultats :

- Les paramètres structuraux des deux p-bots possédant un bras de manipulation à 3 liaisons sont identiques car ils sont formés par deux m-bots possédant le même espace vectoriel R^P_G.
- Les solutions proposées ont un degré de redondance nul. Cela vient du fait que le processus de synthèse structurale génère une connectivité commune S_{com} nulle.
- Le degré d'hyperstatisme d'ordre 1 qui apparait pour les p-bots possédant un bras de manipulation à 3 liaisons est dû à la difficulté de braquage du p-bot.
- Dans les deux types de formation des p-bots, la méthode de synthèse structurale proposée génère des solutions qui respectent les contraintes sur les paramètres structuraux établies en section 3.1.2. Si l'on doit choisir entre les solutions, le $p\text{-}bot^{L4-17}_{comanip}$ est le plus performant car il présente un degré d'hyperstatisme nul.
- La solution $p\text{-}bot^{L4-17}_{comanip}$ est isostatique grâce à la liaison R_x, qui permet non seulement que toutes les roues soient en contact sur un sol irrégulier, mais aussi un balancement latéral de la charge, toujours utile pour améliorer la stabilité du p-bot en dévers. Cette liaison R_x fait défaut aux solutions $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$ et $p\text{-}bot^{L3-27}_{comanip}$.
- Dans la réalité, en considérant un sol quasi-lisse, la rigidité non infinie des solutions $p\text{-}bot^{L3-23}_{comanip}$ et $p\text{-}bot^{L3-27}_{comanip}$ doit pouvoir compenser de petites irrégularités du sol.

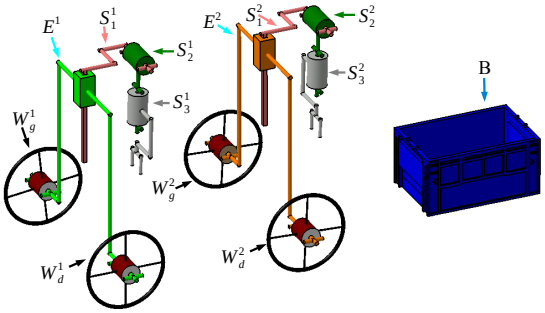
3.3.2 Paramètres structuraux des p-bots en mode connexion

La méthode de calcul des paramètres structuraux pour ce deuxième type de formation des p-bots a été présentée à la section 2.4.4.2. Nous appliquons de nouveau la méthode sur les trois structures retenues des m-bots.

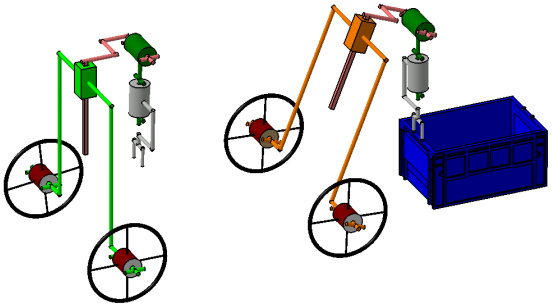
- $p\text{-}bot^{L3-23}_{connex}$:
  La figure 3.6 représente le $p\text{-}bot^{L3-23}_{connex}$ en mode connexion. Le graphe de structure correspondant est présenté à la figure 3.6a. Quatre étapes sont considérées : l'approche des deux m-bots par un côté de la charge (figures 3.6b) ; la prise de la charge par le premier m-bot (figure 3.6c) ; la connexion du second m-bot derrière le premier (3.6d) ; le levage coopératif de la charge (figure 3.6e).
  Dans ce cas, nous commençons par évaluer les paramètres structuraux de la chaîne cinématique de locomotion l_3. Pour cela, nous reprenons le calcul à partir de l'évaluation de la connectivité S_{l_3} de la chaîne cinématique de locomotion l_3 (équation 2.35). Les différentes écritures des bases pour chaque espace vectoriel ont été déjà présentées à l'équation 3.35 pour R_{G^p} et dans la table 2.2 pour $R_{l_{11}}$ et $R_{l_{12}}$.
  L'intersection $R_{l_{11}} \cap R_{l_{12}}$ a été précédemment évaluée et les différentes bases sont recensées dans la table 3.1. Nous devons maintenant déterminer l'intersection



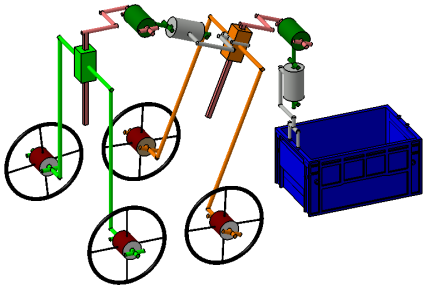
(a) Graphe de structure



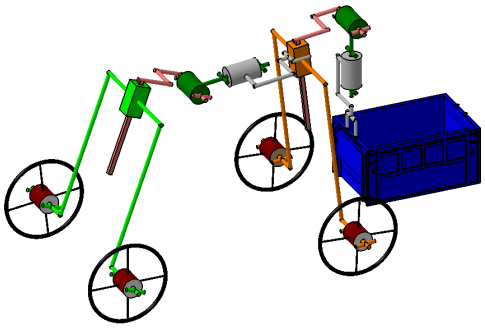
(b) Approche



(c) Prise de la charge



(d) Formation du p-bot



(e) Levage

FIGURE 3.6 – Présentation du *p-bot*$^{L3-23}$ en connexion

entre ces bases et l'unique base de R_{G^p} (équation 3.35) et nous retiendrons l'intersection qui génère la connectivité minimale. Ainsi, nous remarquons que les bases $(R_{l_1})_i$ $(i = 1, \ldots, 4)$ sont incluses dans $(R_m^{5b}) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$, ce qui signifie que la dimension de l'intersection qui représente la connectivité de la chaîne cinématique de locomotion l_3 du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-23}$, noté $S_{l_3}^{L3-23}$, est définie par :

$$S_{l_3}^{L3-23} = 2 \tag{3.48}$$

Pour la mobilité M_{l_3}, il est nécessaire de calculer au préalable le paramètre $r_{l_3}^{L3-23}$ défini par l'équation 2.37. En plus de la connectivité S_{l_3} calculé, les valeurs des autres variables de cette équation sont connues : $S_{l_{11}} = S_{l_{12}} = 4$ (équation 2.11), $S_{G^p} = 5$ (connectivité du m-bot^{L3-23}, équation 3.28) et $r_{l_3}^{l} = 6$ (équation 2.38), ce qui donne :

$$r_{l_3}^{L3-23} = (4+4) + (5) - 2 + 6 = 17 \tag{3.49}$$

En remplaçant cette valeur dans l'équation 2.36, on obtient la mobilité de la chaîne cinématique de locomotion l_3 du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-23}$. Les mobilités des liaisons existantes sont au nombre de $p_{l_3} = 12$ avec une liaison encastrement sans mobilité, 4 liaisons de contact roue-sol à trois mobilités chacune et les autres liaisons (prismatiques et rotoïdes) restent à une mobilité chacune. Le résultat de ce calcul donne :

$$M_{l_3}^{L3-23} = (1 \times 0) + (4 \times 3) + (7 \times 1) - 17 = 2 \tag{3.50}$$

Le calcul de la mobilité est direct en utilisant l'équation 2.40, en connaissant $M_{l_3}^{L3-23} = 2$ et $M_{manip}^{L3-23} = 3$ calculée dans l'équation 3.24. Finalement, la mobilité du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-23}$ en mode connexion est égale à :

$$M_{p-connex}^{L3-23} = 5 \tag{3.51}$$

De son côté, la connectivité du p-bot est calculée à partir de l'équation 2.39. Dans ce cas, $dim(R_{l_3} \cap R_{manip})$ représente la connectivité commune entre la chaîne cinématique de manipulation et la chaîne cinématique de locomotion l_3 du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-23}$. Pour la connectivité, nous devons prendre l'intersection qui donne le minimum à la valeur de la connectivité. Par conséquent, l'intersection de la base $(R_{l_1})_4 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y)$ avec la base $(R_{Manip}) = (\boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$ donne l'ensemble vide. Ainsi, la connectivité commune entre la chaîne cinématique de manipulation et la chaîne cinématique de locomotion du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-23}$ est égale à zéro, et on note :

$$S_{com-connex}^{L3-23} = 0 \tag{3.52}$$

Donc, la connectivité du p-bot en mode connexion se réduit à la somme des connectivités de la chaîne cinématique de locomotion $S_{l_3}^{L3-23} = 2$ et celle de la chaîne cinématique de manipulation $S_{manip}^{L3-23} = 3$ déjà calculées dans les équations 3.48 et 3.26 respectivement. Finalement, la connectivité du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-23}$ est :

$$S_{p-connex}^{L3-23} = 5 \tag{3.53}$$

La redondance est directement déduite de l'équation 2.41, ce qui donne :

$$T_{p-connex}^{L3-23} = 0 \tag{3.54}$$

Concernant le degré d'hyperstatisme, celui-ci est calculé à partir de l'équation 2.42 connaissant la valeur de $r_{l_3}^{L3-23} = 17$ calculée dans l'équation 3.49, ce qui donne :

$$N_{p-connex}^{L3-23} = 1 \tag{3.55}$$

Finalement, les paramètres structuraux du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-23}$ sont :

- La connectivité :	$S_{p-connex}^{L3-23}$	$=$	5
- La mobilité :	$M_{p-connex}^{L3-23}$	$=$	5
- La redondance :	$T_{p-connex}^{L3-23}$	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	$N_{p-connex}^{L3-23}$	$=$	1

– $p\text{-}bot_{connex}^{L3-27}$:

La démarche de calcul est identique au cas précédent. Les résultats de calculs sont identiques car les deux formations des p-bots possèdent la même structure cinématique et les mêmes bases pour les différents espaces vectoriels. Les paramètres structuraux du $p\text{-}bot_{connex}^{L3-27}$ sont :

- La connectivité :	$S_{p-connex}^{L3-27}$	$=$	5
- La mobilité :	$M_{p-connex}^{L3-27}$	$=$	5
- La redondance :	$T_{p-connex}^{L3-27}$	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	$N_{p-connex}^{L3-27}$	$=$	1

– $p\text{-}bot_{connex}^{L4-17}$:
Le graphe de structure et la représentation des étapes de ce dernier p-bot sont illustrés à la figure 3.7. La démarche est identique au cas précédent, nous commençons par le calcul de la connectivité et la mobilité de la nouvelle chaîne cinématique de locomotion l_3. La connectivité est basée sur le calcul des intersections entre les espaces vectoriels des différentes jambes de l_3. Les jambes simples l_{11} et l_{12} ont leurs bases définies dans la table 2.2 tandis que la jambe complexe, d'espace vectoriel de vitesses $R_{G^p}^{L4-17}$, a une seule écriture possible pour sa base (équation 3.42). De même que précédemment (équation 3.48), on obtient la connectivité de la chaîne cinématique de locomotion l_3 pour le $p\text{-}bot_{connex}^{L4-17}$:

$$S_{l_3}^{L4-17} = 2 \tag{3.56}$$

Pour le calcul de la mobilité, on commence par calculer le paramètre $r_{l_3}^{L4-17}$, ce qui donne :

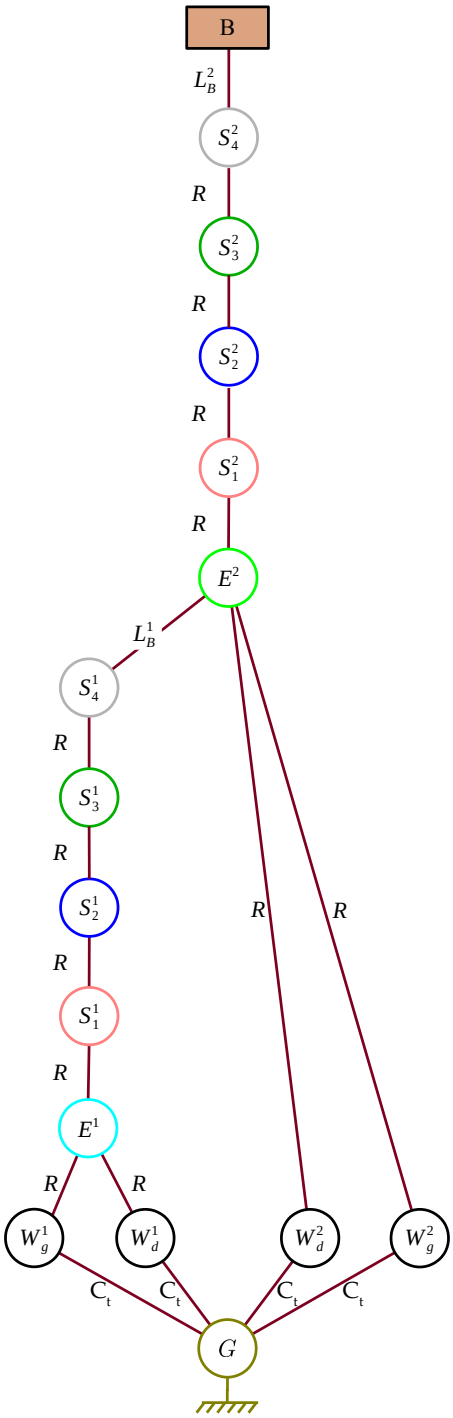
$$r_{l_3}^{L4-17} = (4+4) + (6) - 2 + 6 = 18 \tag{3.57}$$

Par conséquent, la mobilité $M_{l_3}^{L4-17}$ de la chaîne cinématique de locomotion l_3 pour le $p\text{-}bot_{connex}^{L4-17}$ est donnée par :

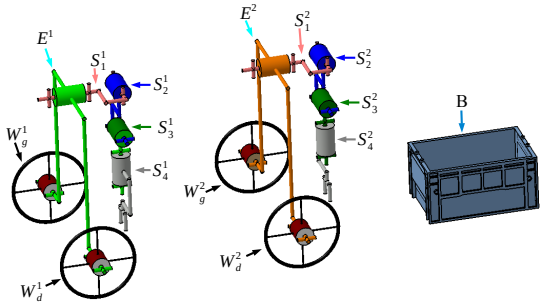
$$M_{l_3}^{L4-17} = (4 \times 3) + (8 \times 1) - 18 = 2 \tag{3.58}$$

Nous passons ensuite au calcul des paramètres structuraux du p-bot entier. La mobilité $M_{p-connex}^{L4-17}$ est calculée en utilisant l'équation 2.40, à partir de la mobilité de la chaîne cinématique de manipulation (équation 2.24) donnant $M_{manip} = 4$. Par conséquent, la mobilité du $p\text{-}bot_{connex}^{L4-17}$ est :

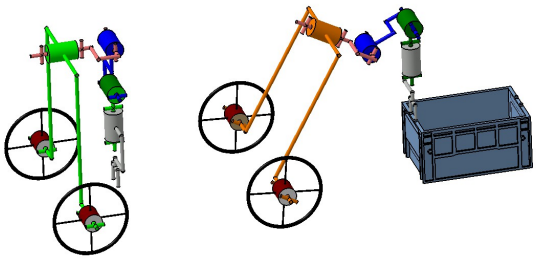
$$M_{p-connex}^{L4-17} = 6 \tag{3.59}$$



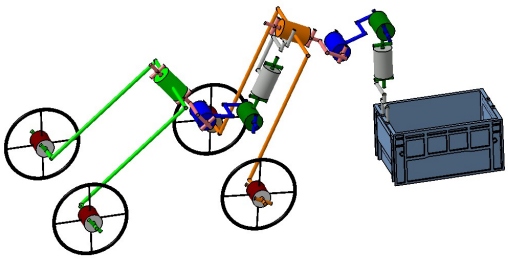
(a) Graphe de structure



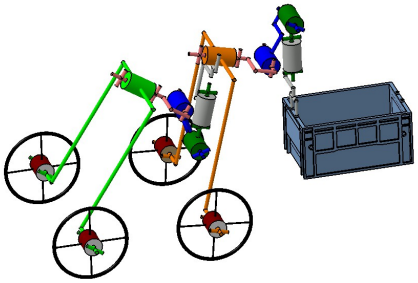
(b) Approche



(c) Prise de la charge



(d) Formation du p-bot



(e) Levage

FIGURE 3.7 – Présentation du *p-bot*$^{L4-17}$ en connexion

La connectivité est ensuite calculée (équation 2.39) en sachant que le résultat de la connectivité commune, entre la chaîne cinématique de manipulation et la chaîne cinématique de locomotion, est obtenue avec la même démarche que pour obtenir $S^{L3-23}_{com-connex}$ (équation 3.52). On note :

$$S^{L4-17}_{com-connex} = dim(R^{L4-17}_{l_3} \cap R^{L4-17}_{manip}) = 0 \tag{3.60}$$

Ce résultat est dû au fait que l'intersection de la base génératrice de la partie manipulation $(R^4_{manip})_2 = (\boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$ et la base $(R_{l_1})_2 = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$ donne un ensemble vide.
Ainsi, tous les termes de l'équation 2.39 sont connus, la connectivité du $p\text{-}bot^{L4-17}_{connex}$ est :

$$S^{L4-17}_{p-connex} = 6 \tag{3.61}$$

La redondance est directement déduite de l'équation 2.41 :

$$T^{L4-17}_{p-connex} = 0 \tag{3.62}$$

Finalement, connaissant r^{L4-17}_{l3} (équation 3.57), le degré d'hyperstatisme (équation 2.42) donne :

$$N^{L4-17}_{p-connex} = 0 \tag{3.63}$$

En résumé, les paramètres structuraux du $p\text{-}bot^{L4-17}_{connex}$ sont :

- La connectivité :	$S^{L4-17}_{p-connex}$	$=$	6
- La mobilité :	$M^{L4-17}_{p-connex}$	$=$	6
- La redondance :	$T^{L4-17}_{p-connex}$	$=$	0
- Le degré d'hyperstatisme :	$N^{L4-17}_{p-connex}$	$=$	0

Enfin, les paramètres structuraux des p-bots en mode connexion sont récapitulés dans la table 3.19.

	$p\text{-}bot^{L3-23}_{connex}$	$p\text{-}bot^{L3-27}_{connex}$	$p\text{-}bot^{L4-17}_{connex}$
Connectivité $S_{p-connex}$	5	5	6
Mobilité $M_{p-connex}$	5	5	6
Redondance $T_{p-connex}$	0	0	0
Degré d'hyperstatisme $N_{p-connex}$	1	1	0

TABLE 3.19 – Les paramètres structuraux calculés des p-bots en connexion

Discussions des résultats :

- Le résultat du calcul des paramètres structuraux pour les modes co-manipulation et connexion sont les mêmes, pourtant chaque mode a une structure cinématique différente. Cela est dû au choix du solide de connexion entre les deux m-bots. Un autre choix de solide donnera d'autres résultats.
- La possibilité de braquage du p-bot dépend de l'orientation de l'outil de connexion du premier m-bot. En effet, pour que cela soit possible, la condition nécessaire est que le m-bot de connexion puisse orienter ses liaisons pour avoir au minimum une rotation suivant l'axe z_G.

La démarche de synthèse structurale s'achève avec le choix de l'architecture de m-bots qui vérifie toutes les contraintes sur les paramètres structuraux à la fois en mode m-bot mais aussi en mode p-bot selon les deux modes de connexion. Le choix se porte sur le $m\text{-}bot^{L4-17}$. Cette architecture représente la solution optimale des m-bots pour la réalisation de la tâche dans l'environnement sélectionné du point de vue architecture cinématique.

Conclusion

Ce chapitre présente une démarche de synthèse structurale basée sur l'expression de contraintes fonctionnelles, reformulées sous forme de règles de conception portant sur les paramètres structuraux des mécanismes. Les contraintes fonctionnelles sont exprimées à deux niveaux : pour le m-bot effectuant sa tâche seul et pour le m-bot effectuant sa tâche conjointement avec d'autres m-bots, dans le cadre de la constitution d'un p-bot. L'originalité de la démarche réside dans le fait qu'elle ne génère que des solutions respectant le cahier des charges. Concrètement, toute architecture de manipulateur mobile issue de cette démarche a la capacité cinématique de réaliser la tâche considérée dans l'environnement défini, à la fois seule en tant que m-bot ou de façon coopérative au sein d'un p-bot. Cette capacité a fait l'objet de vérifications par les calculs de ses paramètres structuraux à la fin de chaque étape. Les autres avantages de cette démarche concernent la réduction du temps de calcul par rapport à une énumération combinatoire des solutions possibles, et l'obtention de solutions compatibles avec les contraintes posées. Cette démarche est transposable à d'autres tâches et d'autres espaces de travail, en exprimant ces conditions sous formes de contraintes sur les paramètres structuraux et des règles de sélection précises.

Le chapitre suivant propose une modélisation du m-bot retenu pour montrer l'efficacité de notre démarche de synthèse systématique mais aussi l'intérêt des concepts de robots modulaires pour l'industrie du futur.

Chapitre 4

Modélisation et commande des manipulateurs mobiles

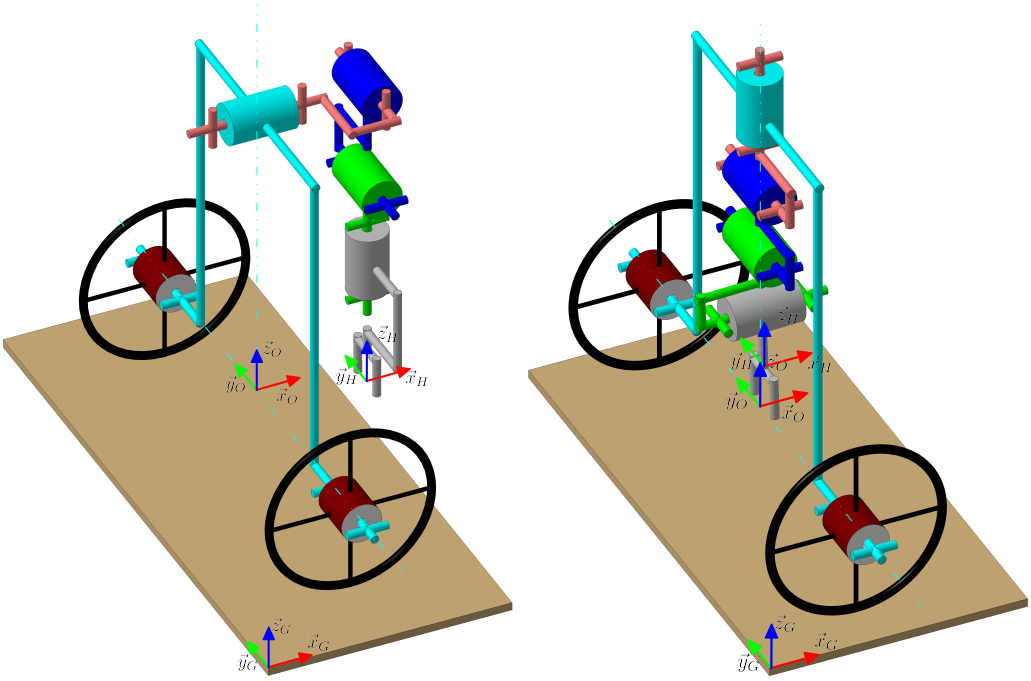
Sommaire

4.1 Modélisation des manipulateurs mobiles 94
4.1.1 Modélisation de la chaîne cinématique de locomotion 95
4.1.2 Modélisation de la partie manipulation 97
4.1.3 Simplification des modèles des manipulateurs mobiles 101
4.2 Synthèse dimensionnelle des robots 104
4.2.1 Contraintes liées à l'espace de travail 104
4.2.2 Contraintes liées à la conception mécanique des m-bots 105
4.2.3 Contraintes de fonctionnement en m-bot 106
4.2.4 Contraintes de fonctionnement en p-bot 108
4.3 Commande des manipulateurs mobiles 112
4.3.1 Commande en position 112
4.3.2 Commande hybride force-position 112
4.4 Validation des lois de commande 114
4.4.1 Outils de simulation 114
4.4.2 Simulation de la phase d'approche en mode m-bot 114
4.4.3 Simulation de la phase de levage en mode p-bot 120
Conclusion 124

Le chapitre précédent, consacré à la synthèse structurale, nous a permis de dégager une architecture de manipulateur mobile répondant à l'ensemble des besoins du cahier des charges. Nous présentons tout d'abord la modélisation de ce manipulateur mobile nécessaire à son contrôle pour la réalisation de la tâche en m-bot ou en coopération dans le mode p-bot. Puis, une synthèse dimensionnelle est présentée pour garantir la possibilité de réalisation de la tâche dans les deux modes m-bot et p-bot. Nous présentons ensuite les algorithmes de commande développés et implémentés dans un modèle dynamique multi-corps et les simulations réalisées en mode m-bot et p-bot.

4.1 Modélisation des manipulateurs mobiles

La démarche de synthèse structurale a permis d'aboutir à l'architecture *m-bot*$^{L4-17}$ comme solution. Celle-ci peut être déclinée en différents anagrammes, selon l'ordre adopté pour les liaisons constituant sa chaîne de manipulation. Deux de ces anagrammes sont visibles en figure 4.1. La figure 4.1a présente la version avec une chaîne de manipulation $[R_x, R_y, R_y, R_z]$ et la figure 4.1b une chaîne de manipulation $[R_z, R_y, R_y, R_x]$.



(a) Manipulateur $[R_x, R_y, R_y, R_z]$ (b) Manipulateur $[R_z, R_y, R_y, R_x]$

FIGURE 4.1 – Deux solutions dérivées du *m-bot*$^{L4-17}$ obtenues par permutation des liaisons de la chaîne cinématique de manipulation

Ces deux versions sont équivalentes en terme de paramètres structuraux car la démarche de synthèse structurale prend en considération uniquement le type des liaisons. Cela veut dire que deux chaînes cinématiques possédant les mêmes liaisons mais avec des agencements différents sont considérées équivalentes.

La version présentée à la figure 4.1b facilite la stabilisation dynamique du m-bot du fait des symétries à la fois longitudinale, par rapport au plan (y_O, z_O), et transversale, par rapport au plan (x_O, z_O), que propose cette architecture par rapport à celle de la figure 4.1a (symétrie longitudinale seulement). Pour cette raison, c'est l'architecture qui est retenue pour la suite.

Nous commençons tout d'abord par présenter les méthodes de modélisation utilisées dans la littérature pour modéliser puis piloter les manipulateurs mobiles.

La modélisation des manipulateurs mobiles se base sur la modélisation cinématique de la base mobile et du manipulateur embarqué [Bayle *et al.*, 2003; Tzafestas, 2013]. Ainsi, la démarche générale consiste à modéliser les deux parties du robot (locomotion et manipulation), puis de combiner les deux modèles en un seul représentant le robot.

4.1.1 Modélisation de la chaîne cinématique de locomotion

La chaîne cinématique de locomotion du m-bot, présentée à la figure 4.2, est un robot mobile à 2 roues (mono-essieu).

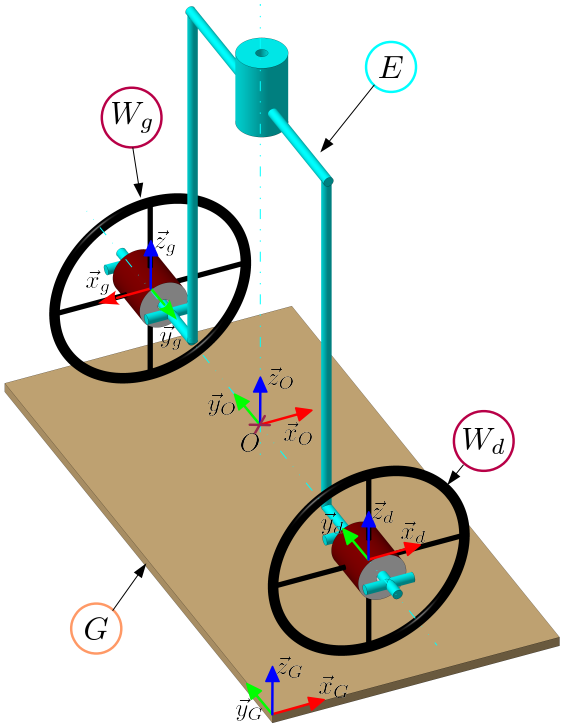


FIGURE 4.2 – Vue CAO de la chaîne cinématique de locomotion

On considère le repère $R_G(\vec{x_G}, \vec{y_G}, \vec{z_G})$ comme le repère global relié au sol (solide G). La chaîne cinématique de locomotion se compose de trois solides : deux roues W_d et W_g (repères $R_d(\vec{x_d}, \vec{y_d}, \vec{z_d})$ et $R_g(\vec{x_g}, \vec{y_g}, \vec{z_g})$ respectivement) de rayon r chacune, connectées par l'essieu E et séparées par la voie v. Nous considérons aussi comme point caractéristique de la locomotion le point O (repère $R_O(O, \vec{x_O}, \vec{y_O}, \vec{z_O})$) appartenant à l'essieu situé au centre de l'axe entre les 2 roues. Par conséquent, le mouvement du point O sera situé dans le plan (x_G, y_G) à la hauteur r.

L'objectif de la modélisation est la description de la position et de la vitesse de la chaîne cinématique de locomotion, donc du point O, par rapport au repère global R_G.

Le modèle géométrique permet l'expression de la situation de la chaîne cinématique de locomotion dans le plan en fonction de ses coordonnées articulaires. Dans notre cas, la situation de la chaîne cinématique de locomotion est celle du point O décrite par le vecteur X_O :

$$X_O = [x_O \; y_O \; \varphi]^T \tag{4.1}$$

avec :
- x_O : Coordonnée du point O sur l'axe $\vec{x}_G$.
- y_O : Coordonnée du point O sur l'axe $\vec{y}_G$.
- φ : Rotation du repère R_O par rapport au repère R_G suivant l'axe $\vec{z}_G$.

D'autre part, les coordonnées articulaires du vecteur Θ_L (L pour locomotion) sont les déplacements des roues W_d et W_g, notés respectivement ω_d et ω_g :

$$\Theta_L = [\omega_d, \omega_g]^T \tag{4.2}$$

avec :
- ω_d : Rotation propre de la roue W_d.
- ω_g : Rotation propre de la roue W_g.

D'autre part, les m-bots et p-bots se déplacent lentement sur un sol plat et plan avec de bonnes conditions d'adhérence. Ainsi, nous déduisons la condition de roulement sans glissement (RSG), qui décrit la relation entre les vecteurs X_O et Θ_L à l'aide des vitesses du point O, notées $\dot{X}_O$, en fonction des vitesses des roues, $\dot{\Theta}_L$ [Thuilot, 1995]. La figure 4.3 représente une vue de dessus de la chaîne cinématique de locomotion. Elle sera utilisée pour déterminer les relations entre les différentes vitesses.

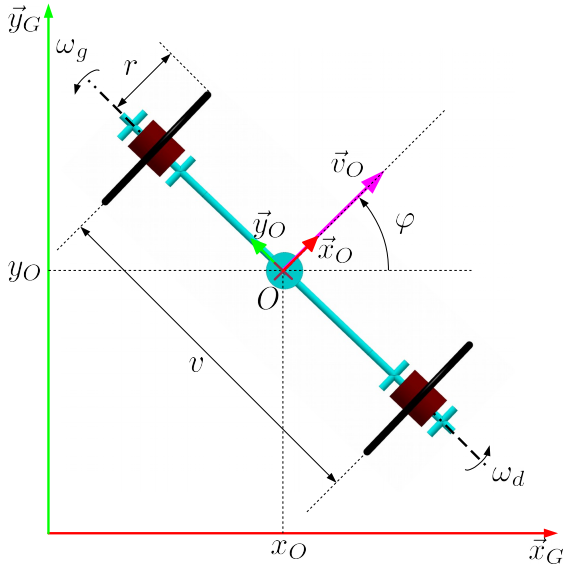


FIGURE 4.3 – Vue de dessus de la chaîne cinématique de locomotion

On note le vecteur vitesse du point O :

$$\dot{X}_O = [\dot{x}_O \; \dot{y}_O \; \dot{\varphi}]^T \tag{4.3}$$

avec :
- $\dot{x}_O$: Vitesse linéaire du point O projetée sur l'axe $\vec{x}_G$.
- $\dot{y}_O$: Vitesse linéaire du point O projetée sur l'axe $\vec{y}_G$.
- $\dot{\varphi}$: Vitesse angulaire du point O suivant l'axe perpendiculaire $\vec{z}_G$.

On note le vecteur des vitesses des roues :

$$\dot{\Theta}_L = [\dot{\omega}_d \; \dot{\omega}_g]^T \tag{4.4}$$

avec :
- $\dot{\omega}_d$: Vitesse de rotation propre de la roue W_d.
- $\dot{\omega}_g$: Vitesse de rotation propre de la roue W_g.

Ce vecteur peut s'écrire en fonction de la vitesse linéaire du point O, notée v_O, et sa vitesse angulaire noté $\dot{\varphi}$. On obtient :

$$\begin{cases} \dot{x}_O = v_O \cos\varphi \\ \dot{y}_O = v_O \sin\varphi \\ \dot{\varphi} = \dot{\varphi} \end{cases} \tag{4.5}$$

En utilisant la loi de composition des vitesses sur un corps rigide, on peut exprimer les vitesses v_O et $\dot{\varphi}$ en fonction des vitesses de rotation des roues $\dot{\omega}_d$ et $\dot{\omega}_g$, avec :

$$v_O = \frac{r}{2}(\dot{\omega}_d + \dot{\omega}_g) \tag{4.6}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{r}{v}(\dot{\omega}_d - \dot{\omega}_g) \tag{4.7}$$

Finalement, le modèle cinématique de la chaîne cinématique de locomotion est donné par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_O \\ \dot{y}_O \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2}\cos\varphi & \frac{r}{2}\cos\varphi \\ \frac{r}{2}\sin\varphi & -\frac{r}{2}\sin\varphi \\ \frac{r}{v} & -\frac{r}{v} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\omega}_d \\ \dot{\omega}_g \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Cette formulation est celle utilisée généralement dans la littérature pour la description des plateformes mobiles [Campion *et al.*, 1996; Vieira *et al.*, 2004; Lee et Jung, 2013], ainsi que la modélisation dynamique [Jones et Stol, 2010]. Cette modélisation cinématique est suffisante pour pouvoir commander le mouvement des m-bots et des p-bots.

4.1.2 Modélisation de la partie manipulation

Nous étudions maintenant la partie manipulation en considérant l'angle d'inclinaison de l'essieu comme une variable du problème de pendule inverse. Les paramètres de modélisation sont définis à la figure 4.4.

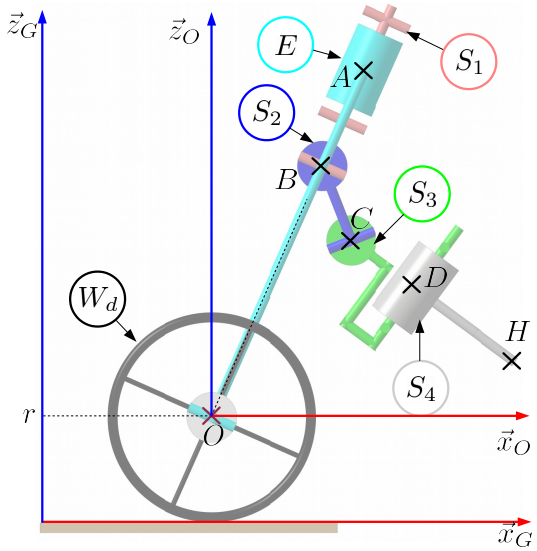


FIGURE 4.4 – Modélisation de la partie manipulation du m-bot

Pour faciliter la présentation, nous considérons une orientation nulle de la chaîne cinématique de locomotion, c'est-à-dire $\varphi = 0$. L'angle θ_0 est défini entre les repères

R_G et R_E suivant l'axe $\vec{y}_O$. Il s'agit de l'angle de tangage que l'on retrouve dans la problématique classique du pendule inverse.

Nous choisissons la méthode de *Denavit-Hartenberg* [Hartenberg et Denavit, 1964], et sa variante dite *Denavit-Hartenberg modifiée* [Dombre et Khalil, 1988] pour exprimer la situation du point H dans le repère R_O. Nous rappelons tout d'abord la méthode de définition des grandeurs caractéristiques d'une chaîne cinématique ouverte par cette dernière méthode.

4.1.2.1 Paramétrage selon la convention D-H modifiée

Nous considérons les deux liaisons pivots présentées à la figure 4.5 pour illustrer la convention des repères par la méthode de *Denavit-Hartenberg modifiée*.

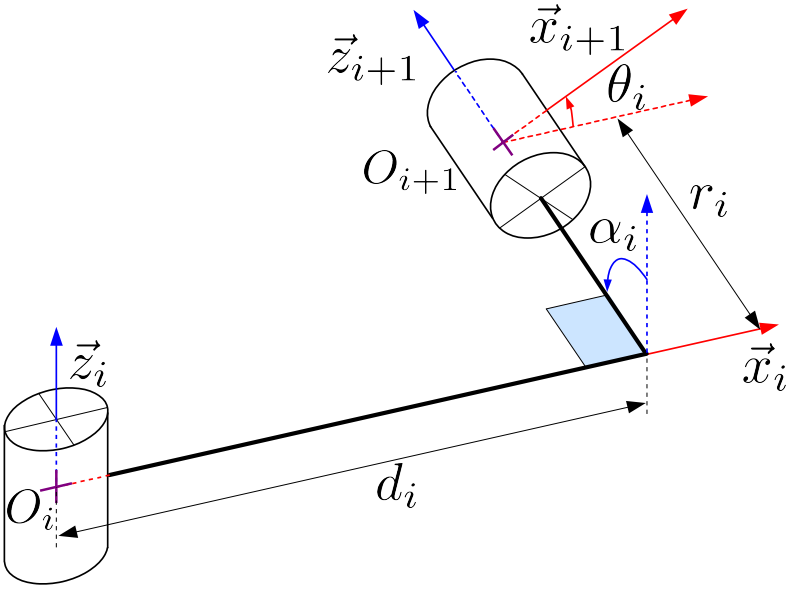


FIGURE 4.5 – Convention de *Denavit-Hartenberg modifiée*

La première étape consiste à définir les axes $\vec{z}_i$ des repères alignés avec les axes des liaisons qui constituent la chaîne cinématique. Ensuite, l'axe $\vec{x}_i$ est déterminé suivant la perpendiculaire commune entre $\vec{z}_i$ et $\vec{z}_{i+1}$. Ainsi, le point de référence pour la liaison i, noté O_i, est déterminé par l'intersection des axes $\vec{z}_i$ et $\vec{x}_i$. Par conséquent, le passage entre deux repères successifs se fait par deux translations notées par les variables d_i et r_i, et deux rotations notées α_i et θ_i.

Pour obtenir l'axe $\vec{z}_{i+1}$, il faut :
- Une rotation α_i autour de l'axe $\vec{x}_i$ depuis l'axe $\vec{z}_i$.
- Une translation d_i suivant l'axe $\vec{x}_i$.

D'autre part, pour l'obtention de l'axe $\vec{x}_{i+1}$, il faut :
- Une rotation θ_i autour de l'axe $\vec{z}_{i+1}$ depuis l'axe $\vec{x}_i$.
- Une translation r_i suivant l'axe $\vec{z}_{i+1}$, perpendiculaire commune aux axes $\vec{x}_i$ et $\vec{x}_{i+1}$.

Ensuite, la description du déplacement de la liaison i, noté q_i, se fait soit par la rotation θ_i ou bien par la translation r_i. Ainsi, on note :

$$q_i = \bar{\sigma}\theta_i + \sigma r_i \tag{4.9}$$

avec :
- $\sigma = 1$ si la liaison est prismatique.
- $\sigma = 0$ si la liaison est une pivot.

Connaissant les quatre paramètres définis (appelés paramètres D-H), ainsi que la variable q_i, on peut décrire la situation dans l'espace de la liaison par une matrice de transformation homogène.

La matrice de transformation homogène (équation 4.10) est composée de deux matrices : la matrice position P et la matrice rotation Rot, avec :

$$T = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & \text{Rot} & & \text{P} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

$$Rot = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, P = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} \tag{4.11}$$

Dans notre cas, la matrice homogène de transformation entre deux repères successifs ${}^iT_{i+1}$ est donnée par le produit matriciel des quatre mouvements effectués, et on note :

$${}^iT_{i+1} = Rot(x_i, \alpha_i).Trans(x_i, d_i).Rot(z_{i+1}, \theta_i).Trans(z_{i+1}, r_i) \tag{4.12}$$

Puisque chaque matrice de transformation est connue, le résultat du produit de l'équation 4.12 est donné en fonction des paramètres D-H, avec :

$${}^iT_{i+1} = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & d_i \\ \cos\alpha_i \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i & -r_i \sin\alpha_i \\ \sin\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \cos\theta_i & \cos\alpha_i & r_i \cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.13}$$

Cette méthode est utilisée pour la modélisation géométrique et cinématique du manipulateur mobile présenté sous forme de chaîne cinématique à la figure 4.6.

La chaîne cinématique de locomotion est modélisée par trois liaisons simples :
- La rotation θ_G suivie de la translation r_L pour représenter la position du point O dans le plan (x_G, y_G).
- La rotation θ_L pour représenter l'orientation dans le plan.

En se basant sur la figure 4.6, les paramètres D-H sont décrits en table 4.1, ce qui va permettre la détermination des matrices de transformations homogènes qui sont présentées en annexe C (section C.1).

4.1.2.2 Modélisation géométrique

- *Modèle géométrique direct :*
  Le vecteur X_H représente les coordonnées opérationnelles tel que :

$$X_H = [x_H \; y_H \; z_H \; \beta_x \; \beta_y \; \beta_z]^T \tag{4.14}$$

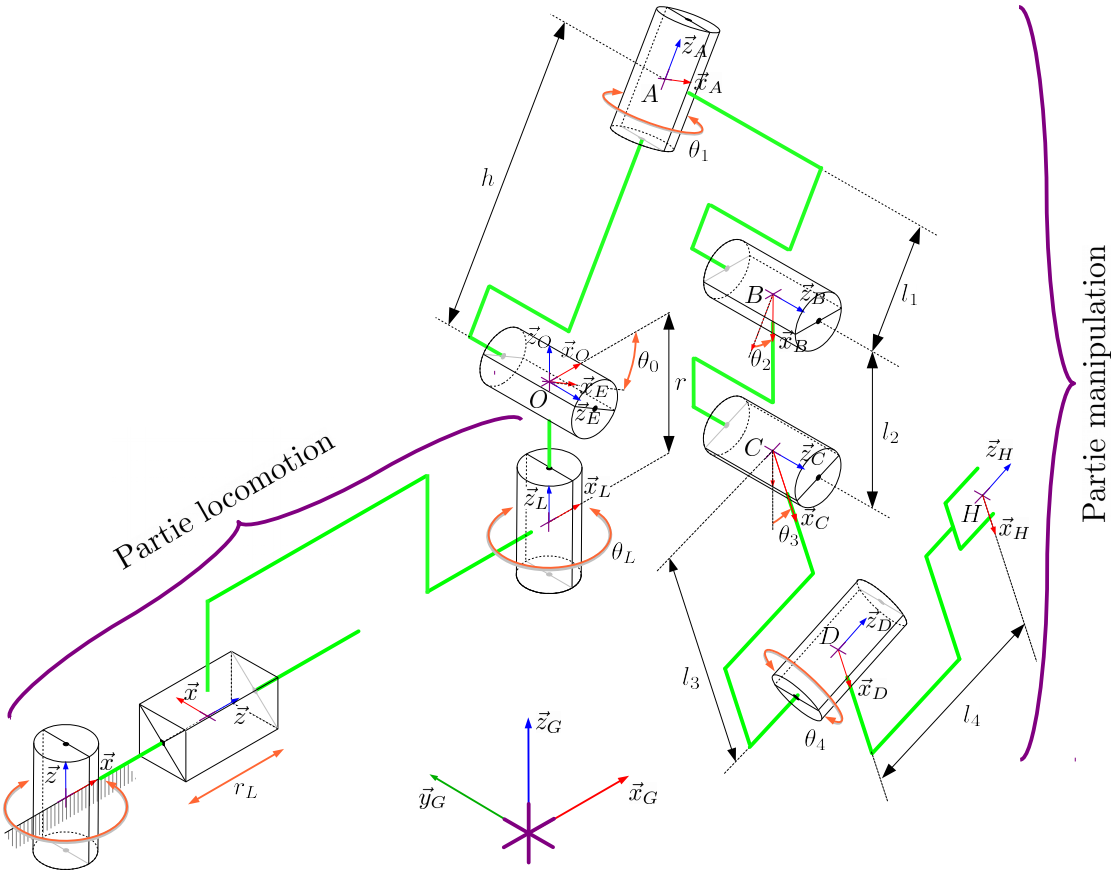


FIGURE 4.6 – Représentation cinématique du m-bot incluant une chaîne cinématique de locomotion équivalente ainsi que la chaîne cinématique de manipulation

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

TABLE 4.1 – Table des paramètres D-H modifiés de la partie manipulation

Le vecteur Θ_M représente les coordonnées articulaires de la partie manipulation du m-bot, tel que :

$$\Theta_M = [\theta_0\ \theta_1\ \theta_2\ \theta_3\ \theta_4]^T \tag{4.15}$$

Le modèle géométrique direct est la fonction qui décrit la situation de l'effecteur X_H en fonction des coordonnées articulaires θ_i du vecteur Θ_M. On écrit :

$$X_H = f_{MGD}(\Theta_M) \tag{4.16}$$

Cela revient à déterminer les composantes de la matrices de transformation ho-

mogène entre le repère R_H et le repère du m-bot R_O, notée ${}^{O}T_H$:

$$ {}^{O}T_H = {}^{O}T_A . {}^{A}T_B . {}^{B}T_C . {}^{C}T_D . {}^{D}T_H \tag{4.17} $$

– *Modèle géométrique inverse :*
Le modèle géométrique inverse est la fonction qui permet à partir d'une situation finale de l'effecteur X_H de connaitre les coordonnées articulaires Θ. On note :

$$ \Theta_M = f_{MGI}(X_H) \tag{4.18} $$

Pour le calcul de cette fonction, on peut utiliser deux méthodes principales : la plus utilisée est celle présentée par [Paul, 1981] qui est applicable à la plupart des cinématiques ou bien les méthodes géométriques utilisées pour des architectures spéciales des robots. Pour les manipulateurs mobiles présentés dans ce travail, la méthode de calcul dépendra des phases de réalisation des tâches.

4.1.2.3 Modélisation cinématique

Le modèle cinématique direct (MCD) relie les vitesses articulaires aux vitesses de l'effecteur. Il est caractérisé par la matrice Jacobienne J :

$$ \dot{X}_H = J(\Theta)\dot{\Theta}_M \tag{4.19} $$

La littérature présente différentes méthodes de calcul de la matrice Jacobienne par dérivation du MGD. Dans notre cas, le m-bot est un système redondant vis-à-vis de la tâche (redondance opérationnelle). Un certain nombre de méthodes d'optimisation ou de contrôle d'architecture redondante existe [Nenchev, 1989; Chiaverini *et al.*, 2008]. Une méthode classiquement utilisée consiste à introduire la Pseudo-inverse de *Moore Penrose* [Whitney, 1969, 1972]. Une autre solution pour simplifier la commande consiste à bloquer des liaisons afin de rendre le système non redondant.

4.1.3 Simplification des modèles des manipulateurs mobiles

Les architectures issues d'une démarche de synthèse structurale donnent la configuration minimale possible pour la réalisation de la tâche. Cette démarche ne tient pas compte de la redondance opérationnelle par rapport à la tâche. Afin de simplifier la modélisation et la commande, nous choisissons de bloquer certaines articulations suivant les différentes phases de réalisation de la tâche.

4.1.3.1 Mode m-bot

La configuration de la chaîne de manipulation dépend du mode de réalisation de la tâche (m-bot ou p-bot) et plus précisément la phase de la tâche. Aussi, nous présentons les hypothèses simplificatrices pour chaque phase de la tâche.

– *Modélisation géométrique :*
En analysant l'environnement de travail (figure 2.9) et toutes les phases de réalisation de la tâche (figure 2.12), le m-bot possède la capacité de rotation sur le plan du sol (x_G, y_G) via la chaîne cinématique de locomotion. Par conséquent, les liaisons de coordonnées articulaires θ_1 et θ_4 sont bloquées. Ainsi, la manipulation s'effectue dans le plan (x_O, z_O) du manipulateur mobile présenté à la figure 4.7.

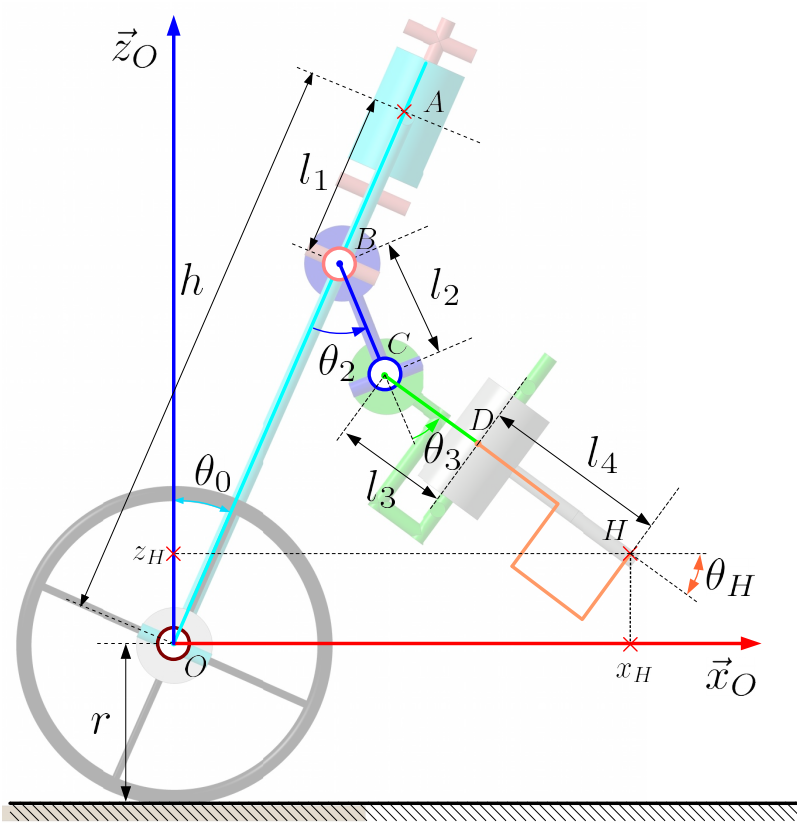


FIGURE 4.7 – Modélisation géométrique du m-bot

Cela revient à étudier un manipulateur 3R plan (cf. section C.2 de l'annexe C). Ainsi, les variables qui représentent le MGD de la partie manipulation sont les coordonnées x_H, z_H et l'angle θ_H qui décrivent la position et l'orientation de l'effecteur (point H) dans le repère $R_O(O, \vec{x}_O, \vec{y}_O, \vec{z}_O)$. Ainsi, le MGD de la partie manipulation est défini par :

$$\begin{cases} x_H = -(h - l_1)\sin(\theta_0) - l_2 \sin(\theta_0 + \theta_2) - (l_3 + l_4)\sin(\theta_0 + \theta_2 + \theta_3) \\ z_H = (h - l_1)\cos(\theta_0) - l_2 \cos(\theta_0 + \theta_2) - (l_3 + l_4)\cos(\theta_0 + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta_H = \theta_0 + \theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2} \end{cases} \tag{4.20}$$

En ce qui concerne le modèle géométrique inverse (MGI), la partie manipulation dans cette configuration représente un manipulateur 3R plan, dont son MGI peut être calculé algébriquement [Kumar, 2002; Spong *et al.*, 2006]. Le calcul algébrique du modèle est présenté à l'annexe C (section C.2.2).

– *Modélisation cinématique :*
Le modèle cinématique est défini par le calcul de la matrice Jacobienne J qui sera implémentée pour la commande de la partie manipulation. Les coordonnées opérationnelles utilisées pour situer l'effecteur par rapport à la base du m-bot sont les positions x_H et z_H et l'angle θ_H, la matrice jacobienne est calculée en se basant sur l'équation 4.19. Le calcul est présenté à l'annexe C (section C.2.3).

4.1.3.2 Mode p-bot

Dans ce cas, la tâche se base sur deux phases de mouvements distinctes : l'orientation des m-bots dans le plan (x_G, y_G) et le levage dans le plan (x_O, z_O). Le dernier étant le même que pour le mode m-bot, il reste à préciser les modèles relatifs à l'orientation.

– *Modélisation géométrique :*
La capacité d'orientation du p-bot est conditionnée par les angles θ_0 et θ_H de chaque m-bot. Nous prenons comme hypothèses des valeurs nulles pour ces angles, avec :

$$\theta_0 = 0 \text{ et } \theta_H = 0 \tag{4.21}$$

Ces hypothèses sont indispensables pour pouvoir braquer sous charge en mode p-bot en gardant les deux roues au sol. En remplaçant ces valeurs dans l'équation 4.20, la relation qui relie θ_2 à θ_3 est donc :

$$\theta_2 + \theta_3 = \frac{\pi}{2} \tag{4.22}$$

Le p-bot considéré est présenté à la figure 4.8 en une vue de dessus.

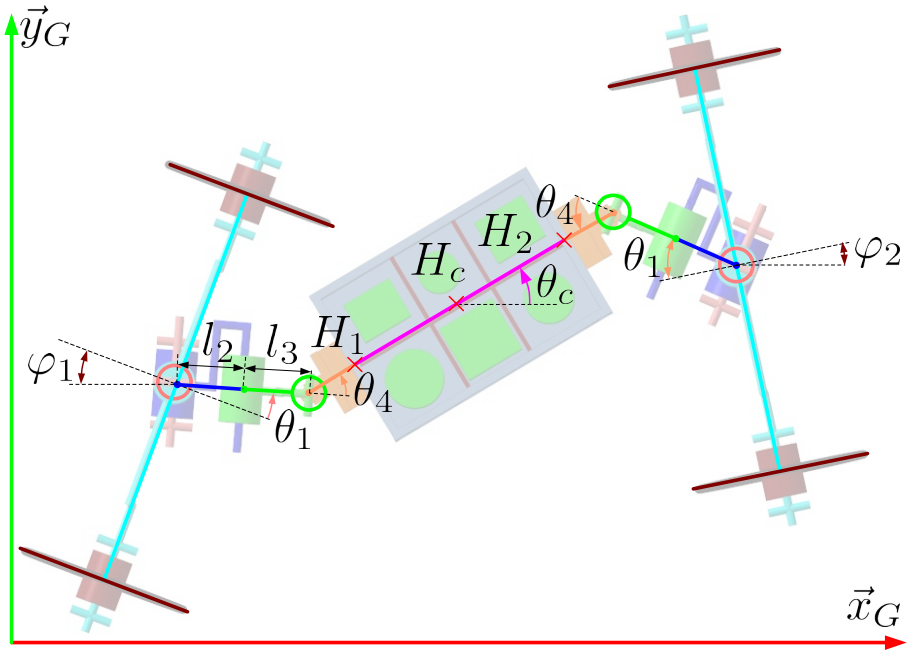


FIGURE 4.8 – Modélisation géométrique du p-bot

Cette figure montre une relation géométrique entre la situation de la caisse (point caractéristique H_c) et les positions des deux effecteurs (points caractéristiques H_1 et H_2). Ainsi, on décompose le mouvement du p-bot en définissant le mouvement

de chaque m-bot contraint par une relation géométrique qui le relie à la situation de la caisse. Cela revient à définir la situation des points H_1 et H_2 de chaque m-bot dans le plan (x_G, y_G). Finalement, le MGD qui décrit le point H_1 (ou H_2 par analogie) dans le repère du m-bot R_O est celui d'un mécanisme 2R plan, avec :

$$\begin{cases} x_{H_1} &= (l_2 \sin(\theta_2) + l_3)\cos(\theta_1) + l_4 \cos(\theta_4) \\ y_{H_1} &= (l_2 \sin(\theta_2) + l_3)\sin(\theta_1) + l_4 \sin(\theta_4) \end{cases} \tag{4.23}$$

Au préalable, une démarche de synthèse dimensionnelle doit être réalisée pour s'assurer que les dimensions des robots permettent la réalisation de la tâche.

4.2 Synthèse dimensionnelle des robots

Nous présentons une démarche de synthèse dimensionnelle permettant de dimensionner géométriquement les composantes des MMs. Ce dimensionnement permet la réalisation de chaque phase de la tâche considérée, soit en m-bot, soit en p-bot.
Les premières contraintes à considérer sont celles relatives à la disposition de l'espace de travail dans lequel vont évoluer les robots. Ces contraintes sont exprimées dans le cahier des charges de la tâche. Les dimensions de la configuration de l'espace de travail sont données à la figure 4.9.

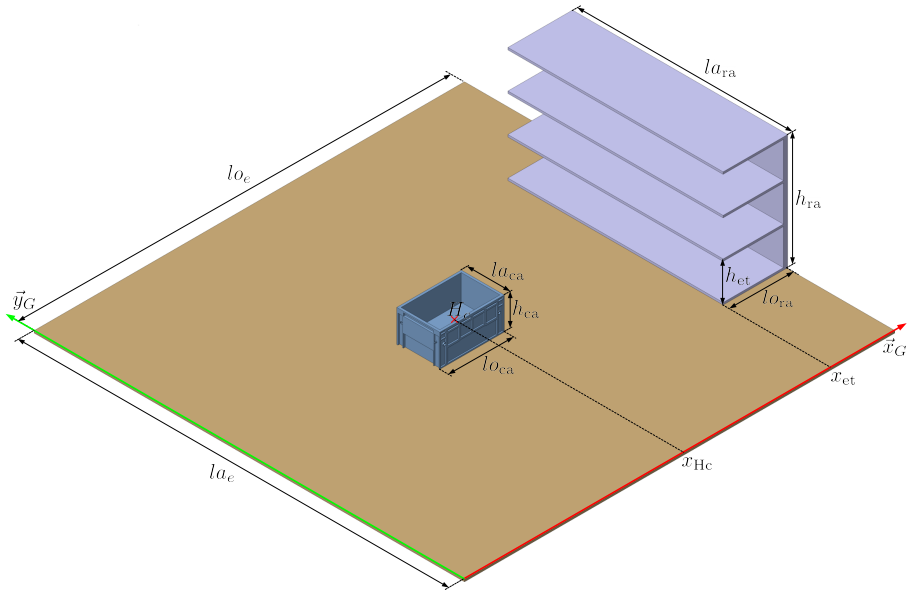


FIGURE 4.9 – Dimensions de la configuration de l'espace de travail

4.2.1 Contraintes liées à l'espace de travail

Nous considérons que les caisses (vides et remplies) vont être déposées sur la première étagère du rack. Par conséquent, pour que le m-bot puisse réaliser la tâche, son point caractéristique H du repère R_H doit pouvoir se positionner assez bas pour prendre la caisse et assez haut pour la déposer sur l'étagère. La figure 4.10 montre les positions initiales et finales de la caisse.

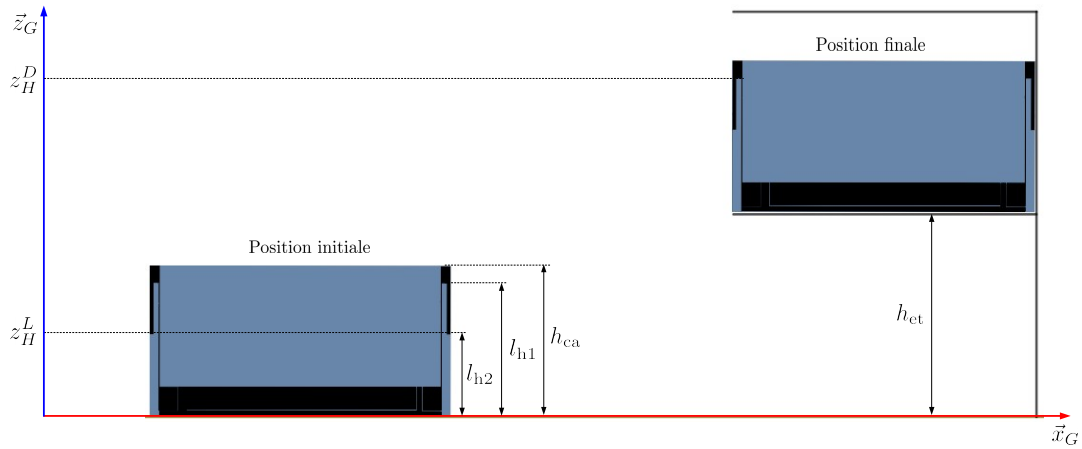


FIGURE 4.10 – Les hauteurs caractéristiques pour le point H

Comme présenté à la figure 2.11, l'outil se saisit de la caisse en trois étapes. Dans les deux premières étapes, l'outil est en position la plus basse avec la condition d'horizontalité ($\theta_H = \frac{\pi}{2}$). Cette position est notée z_{H_l} (l pour levage) et elle dépend de la forme des caisses. On note :

$$z_{H_l} = l_{h2} \tag{4.24}$$

L'effecteur doit également atteindre la position z_{H_d} (d pour dépose) pour pouvoir déposer la caisse sur la première étagère. Cette position est donnée en fonction des dimensions de la caisse et des dimensions du rack. On note :

$$z_{H_d} = h_{et} + l_{h1} \tag{4.25}$$

Ces deux positions représentent les contraintes dimensionnelles de l'espace de travail à prendre en considération dans la démarche de synthèse dimensionnelle des MMs. Les valeurs des variables de l'espace de travail sont présentées en table 4.2.

Environnement	mm	Rack	mm	Caisse	mm
lo_e	2000	lo_{ra}	300	lo_{ca}	300
la_e	2000	la_{ra}	1000	la_{ca}	200
		h_{ra}	600	h_{ca}	150
		h_{et}	200	l_{h1}	130
				l_{h2}	70

TABLE 4.2 – Valeurs des dimensions de l'espace de travail et de la caisse

4.2.2 Contraintes liées à la conception mécanique des m-bots

Du fait de l'encombrement des différentes pièces et des actionneurs, un ensemble de contraintes dimensionnelles sont imposées sur les longueurs des pièces et les limites articulaires. Les longueurs l_1, l_2, l_3 et l_4 doivent être supérieures à une longueur minimale l_{min} contrainte par le choix des actionneurs. Les limites articulaires sont notées $\theta_{i_{max}}$ ($i = 1,4$) avec $-\theta_{i_{max}} < \theta_i < \theta_{i_{max}}$. Seule la liaison θ_0 qui n'est pas limitée par l'encombrement mais par la hauteur de l'essieu h et le rayon des roues r, avec :

$$\theta_{0_{max}} = acos\left(\frac{r}{h}\right) \tag{4.26}$$

Afin de dimensionner un premier démonstrateur, nous retenons les caractéristiques suivantes :

$$\begin{cases} l_{min} & = & 60mm \\ \theta_{i_{max}} & = & \frac{2\pi}{3} \qquad (i = 1, 4) \end{cases} \tag{4.27}$$

4.2.3 Contraintes de fonctionnement en m-bot

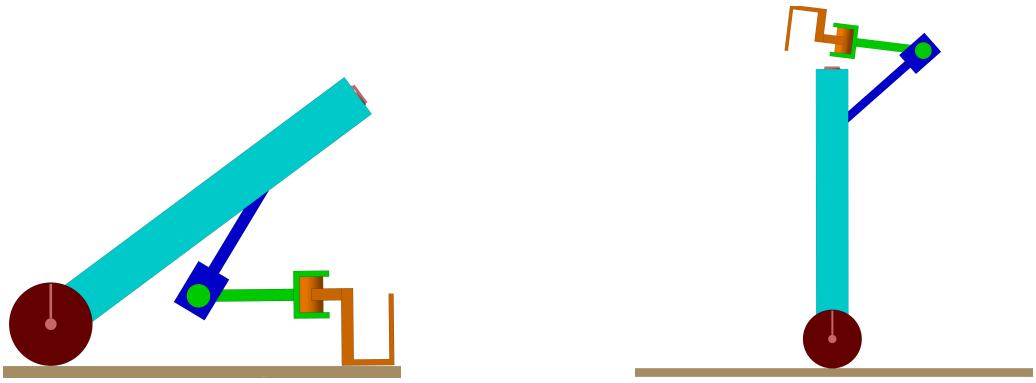
En plus de la structure cinématique qui doit permettre la réalisation de la tâche, d'autres caractéristiques doivent être précisées pour que le m-bot puisse réaliser sa tâche :

- *Partie locomotion :*
  L'organe de locomotion retenu étant des roues de rayon r, celles-ci doivent pouvoir supporter le poids du m-bot et de la charge et garantir un bon contact avec le sol en assurant un RSG. À cette étape, les masses ne sont pas précisées. En ce qui concerne l'essieu, nous proposons une forme en *U inversé* afin que le m-bot puisse manipuler des caisses au sol avec le moins d'effort de stabilisation dynamique, ce qui permet au m-bot d'enjamber les caisses. Par conséquent, la largeur de l'essieu ou la voie v du m-bot est :
  $$v > la_{ca} + \varepsilon_v \tag{4.28}$$
  avec ε_v le jeu sur la largeur de voie.
  Puisque le m-bot doit pouvoir enjamber une caisse, la hauteur h minimale de l'essieu est en relation avec la hauteur de la caisse h_{ca} et le rayon des roues r. On note :
  $$h + r > h_{caisse} + \varepsilon_h \tag{4.29}$$
  avec ε_h le jeu sur la hauteur.
  Pour la limite supérieure de la hauteur, il n'y a pas de condition précise mais plus l'altitude du centre de masse est élevée, plus la stabilisation dynamique est difficile à réaliser.
- *Partie manipulation :*
  En ce qui concerne la partie manipulation, le bras opérationnel doit atteindre toutes les étagères du rack en prenant en compte des limites articulaires. Celui-ci doit pouvoir atteindre le sol dans le cas de locomotion avec trois contacts et pouvoir prendre la caisse.

Pour un fonctionnement optimal, la stabilité du m-bot doit être prise en considération dans la démarche de synthèse dimensionnelle. Dans ce registre, le m-bot possède deux modes de fonctionnement (figure 4.11) : un mode avec trois contacts au sol (figure 4.11a) dans la phase d'approche et un mode de stabilisation dynamique (figure 4.11b).

À ce stade, les efforts dynamiques que doit générer le m-bot ne sont pas encore étudiés. Nous utilisons dans un premier temps les méthodes de caractérisation de la stabilité statique. Cette dernière a fait l'objet de plusieurs études [Garcia *et al.*, 2002] et a été appliquée sur plusieurs types de robots. Dans notre cas, elle se caractérise par la distance de la projection du centre de masse du m-bot et les arrêtes de son polygone de sustentation.

Dans le cas de locomotion avec trois contacts au sol, le m-bot est toujours stable puisque la projection de son centre de masse se situe toujours à l'intérieur du polygone de sustentation. D'ailleurs, une démarche de maximisation de la stabilité dans cette configuration peut être envisagée. Par contre, en locomotion avec deux contacts au sol

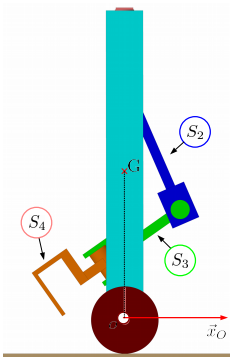


(a) Locomotion avec trois contacts au sol

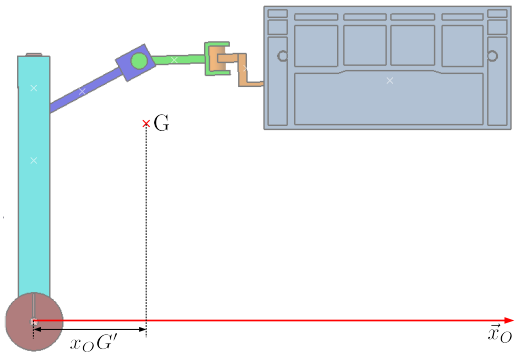
(b) Locomotion avec deux contacts au sol

FIGURE 4.11 – Modes de locomotion du m-bot

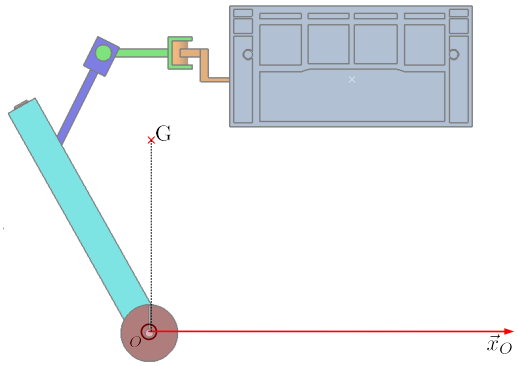
(mode *Segway*), le m-bot ou l'ensemble m-bot et caisse sera stable si la projection du centre de masse de l'ensemble est confondue avec la projection du point O (centre essieu) du m-bot. Cette condition n'est pas vérifiée à tout moment. Nous introduisons la marge de stabilité statique comme étant la distance entre les deux projections. Le but est de minimiser cette distance. La figure 4.12 représente les différents cas de stabilité d'un m-bot en mode Segway.



(a) Stable



(b) Plutôt instable



(c) Stable

FIGURE 4.12 – Stabilité statique du m-bot

Le point G représente le centre de gravité du m-bot avec ou sans la caisse, et le point G' sa projection sur l'axe $\vec{x}_O$. La marge de stabilité à minimiser est donc la distance $x_O G'$.

Dans le cas du m-bot seul, l'obtention de sa stabilité est possible grâce au positionnement adéquat des solides S_2, S_3 et S_4 (figure 4.12a). Pour les phases durant lesquelles le m-bot manipule la caisse (figures 4.12b et 4.12c), l'angle d'inclinaison θ_0 de l'essieu conditionne la stabilité du système (m-bot + caisse). Ainsi, les configurations avec un angle $\theta_0 > 0$ sont à privilégier pour la réalisation de la tâche en mode m-bot. On note :

$$0 < \theta_0 < \theta_{0_{max}} \tag{4.30}$$

Nous pouvons donc dégager des contraintes sur les longueurs h et l_2 ($l_1 = l^{min}$ est considérée optimale, de même pour l_3 et l_4), avec la relation entre $\theta_{0_{max}}$ et z_{H_d}, définie par :

$$z_{H_d} = (h - l_1)\cos(\theta_0) - l_2\cos(\theta_0 + \theta_2) \tag{4.31}$$

En ce qui concerne l'étape de levage, la contrainte particulière est l'obtention de z_{H_l}. Cette distance est exprimée en fonction des paramètres du m-bot, avec :

$$z_{H_l} = r - (h - l_1)\cos(\theta_{0_{max}}) + l_2(1 - \cos(\theta_{0_{max}} + \theta_2)) \tag{4.32}$$

4.2.4 Contraintes de fonctionnement en p-bot

Pour la réalisation de la tâche en mode p-bot, les contraintes dimensionnelles sont imposées principalement par les dimensions du rack lors de la dernière phase de dépose. En effet, et comme présentés à la figure 4.13, les étagères du rack empêchent les essieux des m-bots d'avoir une position optimale. Aussi, le manipulateur de chaque m-bot doit pouvoir atteindre la position désirée.

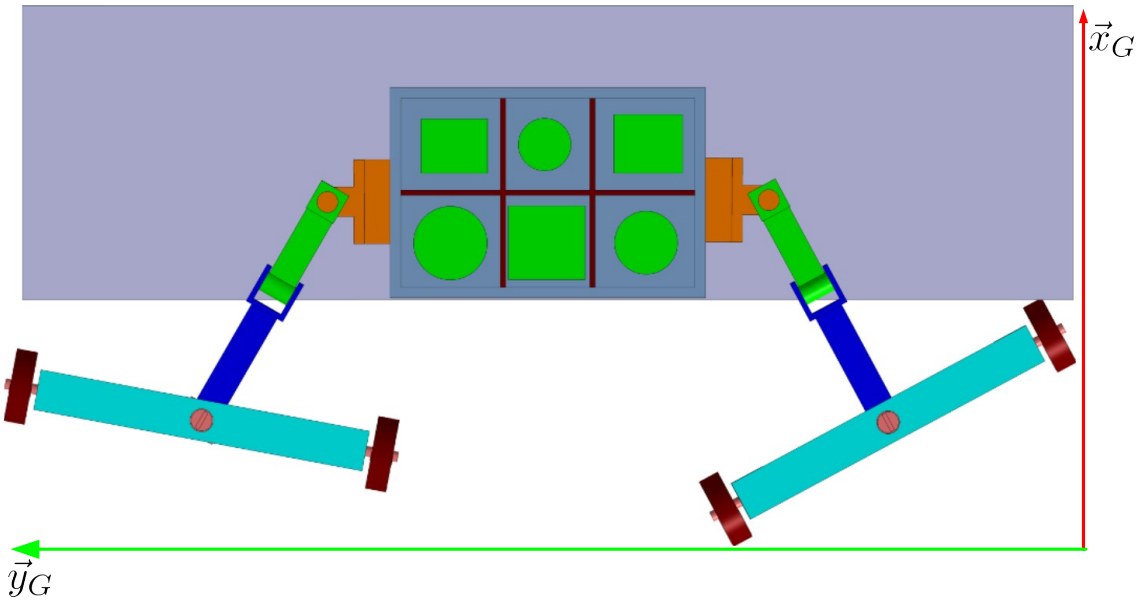


FIGURE 4.13 – Contraintes de fonctionnement en p-bot lors de la phase de dépôt

Ce mode de fonctionnement va restreindre les longueurs l_i, pour satisfaire la condition suivante :

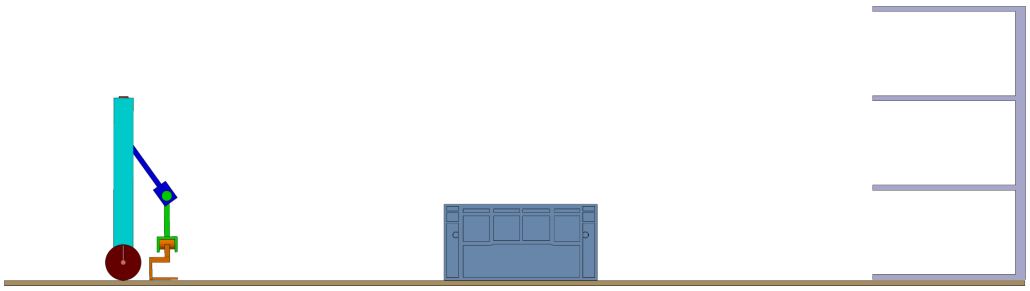
$$lo_{ra} = (l_1 + l_2\sin(\theta_1) + l_3)\cos(\theta_c) \tag{4.33}$$

Un premier dimensionnement des longueurs respectant les conditions exprimées pour chaque phase est présenté en table 4.3 :

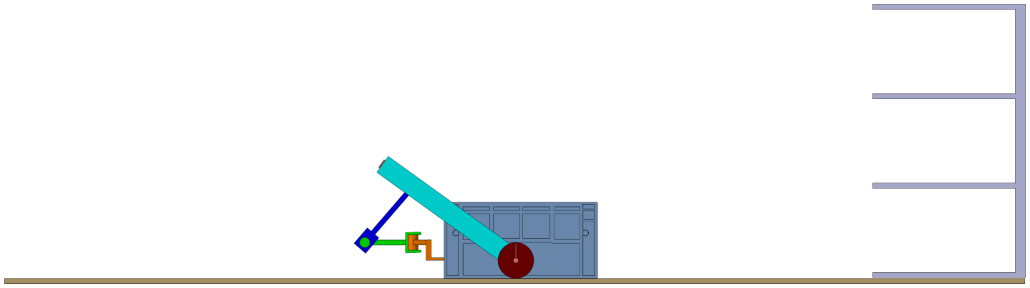
Solide	Longueur	mm
W_d/W_g	r	35
E	v	350
E	h	307
S_1	l_1	60
S_2	l_2	145
S_3	l_3	95
S_4	l_4	69

TABLE 4.3 – Longueurs des différentes solides du robot

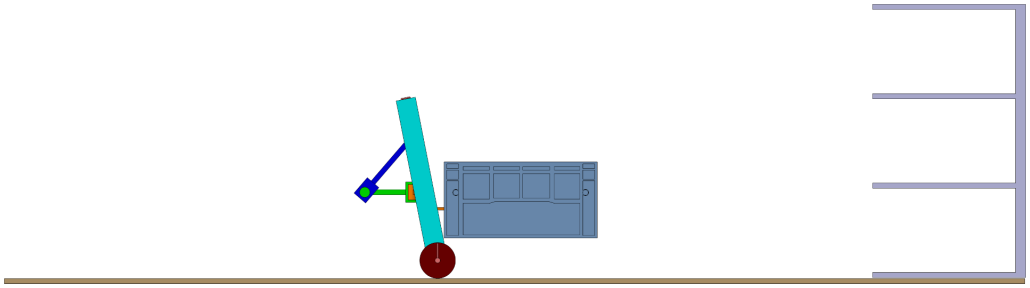
Cette synthèse dimensionnelle nous a permis d'avoir des MMs qui permettent la réalisation de la tâche dans les deux configurations m-bot et p-bot, présentées respectivement aux figures 4.14 et 4.15.



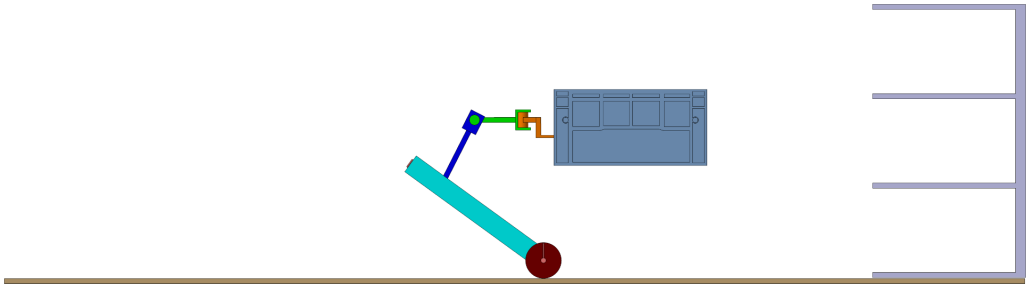
(a) Position initiale du m-bot face à la caisse



(b) Préhension de la caisse par l'outil de manipulation



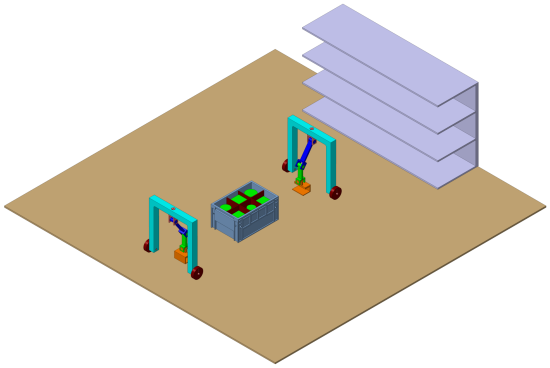
(c) Levage de la caisse



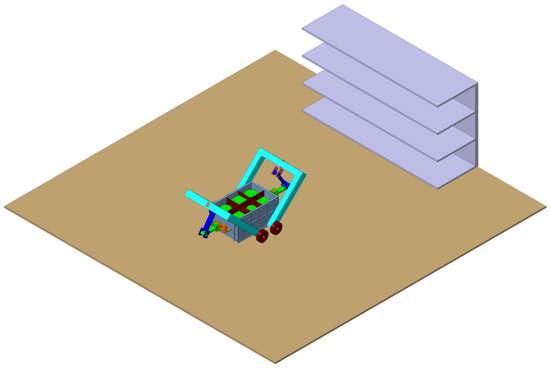
(d) Locomotion vers le rack

(e) Dépose de la caisse sur une étagère du rack

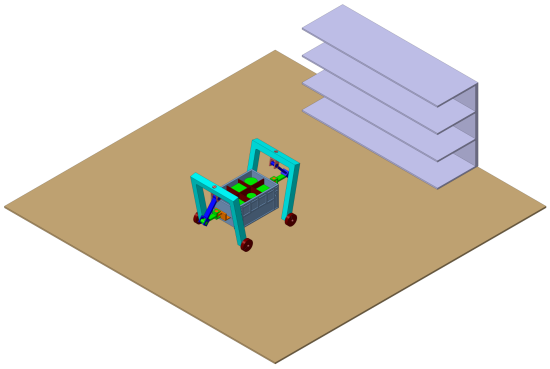
FIGURE 4.14 – Phases de réalisation de la tâche en m-bot



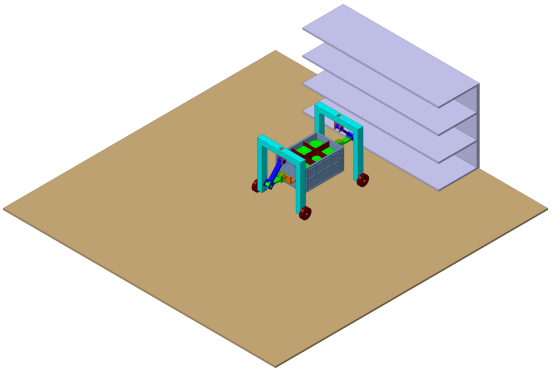
(a) Position initiale des deux m-bots



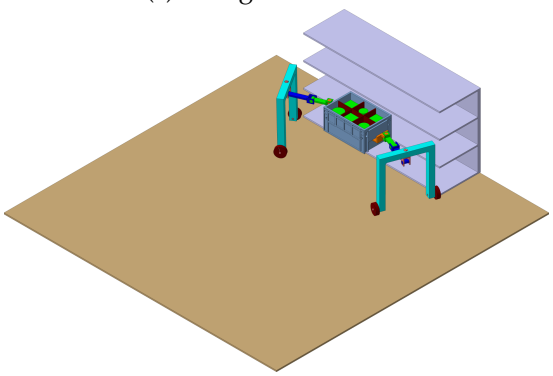
(b) Préhension de la caisse



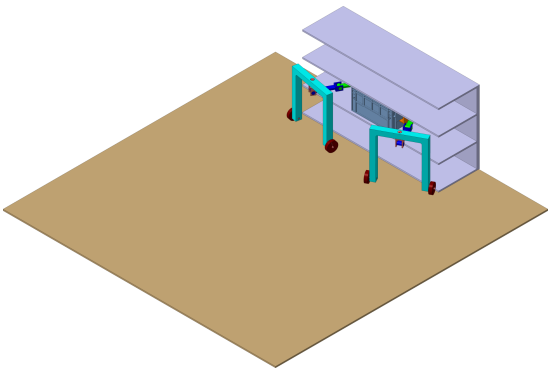
(c) Levage de la caisse



(d) Locomotion vers le rack



(e) Reconfiguration pour la dépose



(f) Dépose de la caisse sur l'étagère

FIGURE 4.15 – Phases de réalisation de la tâche en p-bot

4.3 Commande des manipulateurs mobiles

L'objectif est d'implémenter une loi de commande qui permette de réaliser la tâche dans ses différentes phases. Il existe dans la littérature plusieurs méthodes de commande pour les manipulateurs mobiles [Chan *et al.*, 2013]. Nous présentons deux lois de commandes qui vont être utilisées pour simuler la réalisation d'une phase de chaque mode (m-bot et p-bot).

4.3.1 Commande en position

Le schéma de commande est présenté à la figure 4.16.

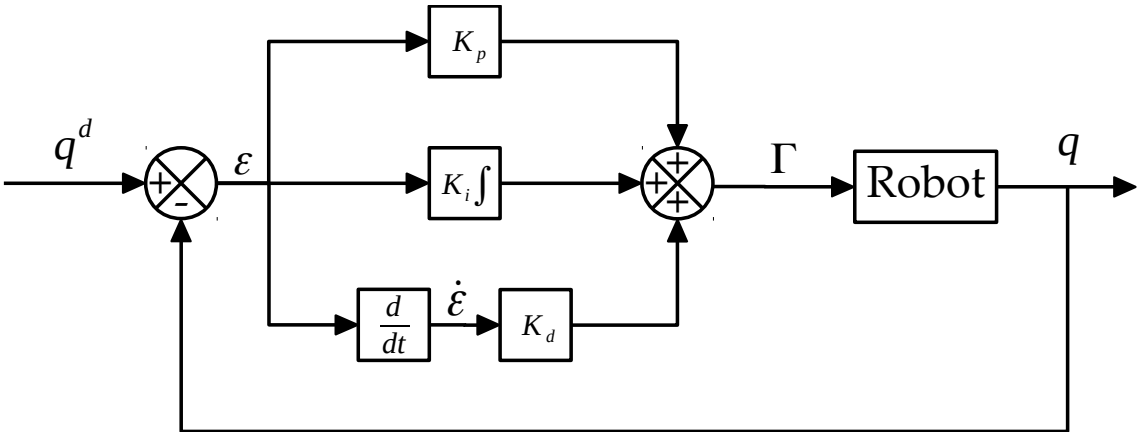


FIGURE 4.16 – Schéma de commande PID

C'est la commande classique utilisée pour la plupart des robots. Son but est d'annuler l'erreur entre la consigne q^d et la mesure effectuée q, notée ε, avec :

$$\varepsilon = q^d - q \tag{4.34}$$

Cette commande peut être utilisée pour l'asservissement en position. La commande Γ générée par un tel régulateur est décrite par l'équation 4.35 :

$$\Gamma = K_p.\varepsilon + K_i.\int \varepsilon + K_d.\dot{\varepsilon} \tag{4.35}$$

Ce type de commande permet l'annulation de l'erreur statique due aux forces de gravité grâce au terme intégral [Dombre et Khalil, 1988].

4.3.2 Commande hybride force-position

Cette commande est présentée à la figure 4.17. Celle-ci est très utilisée dans la littérature [Li *et al.*, 2007], surtout pour la commande de robots coopératifs [Andaluz *et al.*, 2012]. Elle consiste à commander le robot par la force F_c, à deux composantes F_1 et F_2, en se basant sur le modèle statique du robot donné par :

$$\Gamma = J_H^T.F \tag{4.36}$$

Les deux forces F_1 et F_2 sont issues des lois de commande en position et en force respectivement. La sélection se fait par les matrices S et S'. Il en résulte l'expression des deux forces, telles que :

$$\begin{cases} F_1 & = & S.CP \\ F_2 & = & S'.CF \end{cases} \tag{4.37}$$

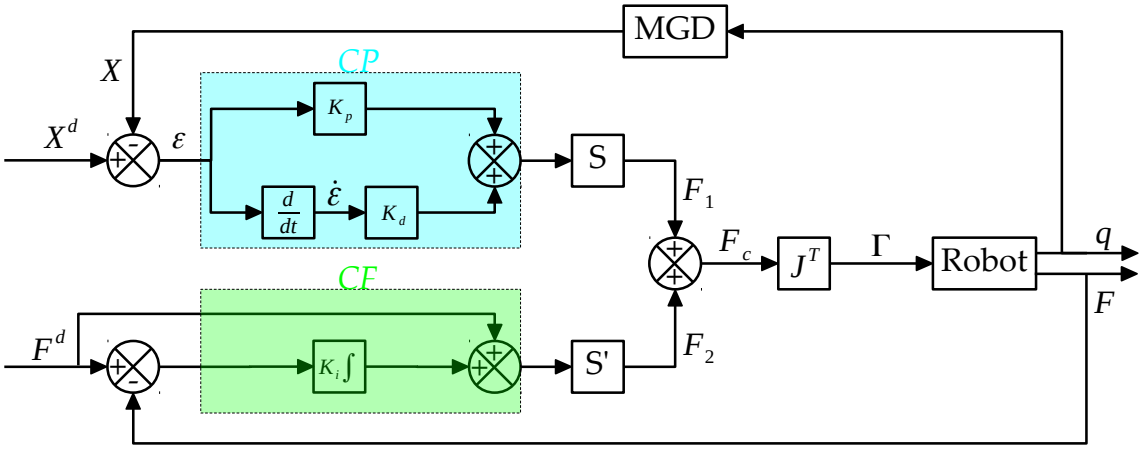


FIGURE 4.17 – Schéma de commande hybride force-position du manipulateur mobile

avec :
- CP : loi de commande en position.
- CF : loi de commande en effort.

– *Loi de commande en position :*
Pour la loi de commande en position, le but est d'imposer une erreur de position opérationnelle nulle de l'effecteur, notée ε_X, avec :

$$\varepsilon_X = X_H^d - X_H \tag{4.38}$$

Ainsi, nous imposons une dynamique de second ordre pour cette erreur, sans terme intégral :

$$\ddot{\varepsilon}_X + K_d.\dot{\varepsilon}_X + K_p.\varepsilon_X = 0 \tag{4.39}$$

Dans ce cas, $\ddot{\varepsilon}_X = -\ddot{X}_H$ car $\ddot{X}_H^d = 0$, et sachant que $\ddot{X}_H = F$ du modèle statique du robot (équation 4.36), la loi de commande en position PC s'écrit sous la forme :

$$CP = K_d.\dot{\varepsilon}_X + K_p.\varepsilon_X \tag{4.40}$$

– *Loi de commande en force :*
Cette loi de commande est implémentée pour commander la force exercée par l'effecteur, et plus spécifiquement en son point caractéristique H. On note :

$$F_H = [F_{Hx}, F_{Hy}, F_{Hz}]^T \tag{4.41}$$

L'erreur de commande en force est notée ε_F, avec :

$$\varepsilon_F = F_H^d - F_H \tag{4.42}$$

On impose une dynamique du premier ordre pour cette erreur :

$$\varepsilon_F + K_i \int \varepsilon_F = 0 \tag{4.43}$$

avec $F_H = F_H^d - \varepsilon_F$ et $\varepsilon_F = -K_i \int \varepsilon_F$, la loi de commande en force CF est donnée par :

$$CF = F_H^d + K_i \int \varepsilon_F \tag{4.44}$$

4.4 Validation des lois de commande

La commande est implémentée dans une simulation conjointe *Adams/Simulink*. Ce couplage permet de visualiser le comportement du système robotique sans calculer son modèle dynamique (calculé dans Adams).

4.4.1 Outils de simulation

La validation des lois de commande fait appel à trois outils : *CATIA*, *Adams* et *Matlab/Simulink*.

- *Modélisation des pièces :* Cette étape est réalisée avec le logiciel de CAO *CATIA*. Les différents composants sont représentés par des formes simples et les masses des différentes pièces sont présentées en table 4.4.

Solide	Masse (kg)
W_d/W_g	0.15
E	2.00
S_1	0.10
S_2	0.15
S_3	0.15
S_4	0.12

TABLE 4.4 – Masses des différents solides du MM

- *Modélisation dans Adams :* Les modèles des pièces sont importés dans l'outil de simulation multi-corps *Adams* puis les liaisons et les contacts sont définis.
- *Implémentation des schémas de commande :* la dernière étape consiste à implémenter les différents schémas de commande dans *Simulink* puis à réaliser le lien entre les entrées/sorties des deux outils.

Cet environnement de simulation nous permet de valider les lois de commande pour quelques étapes de réalisation de la tâche en m-bot et p-bot. Ces simulations permettent également le réglage des gains K_p, K_d et K_i des différentes lois de commande.

4.4.2 Simulation de la phase d'approche en mode m-bot

Afin de valider la loi de commande en position présentée à la section précédente, nous implémentons cette dernière pour la première phase de la tâche en mode m-bot (cf. section 2.3.2). Cette phase d'approche est caractérisée par l'état initial et final présentés en figure 4.18.

4.4.2.1 Conditions initiales

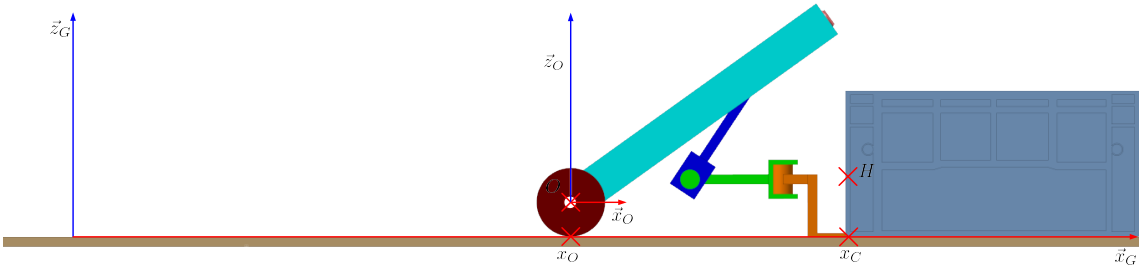
Cet état initial est présenté à la figure 4.18a. Dans cette phase, la locomotion s'effectue avec trois contacts au sol. Au début de la tâche, les vecteurs $\vec{z}_G$ et $\vec{z}_O$ sont colinéaires. Ainsi :

$$X_{O_{Init}} = [0, 0, r]^T \tag{4.45}$$

D'autre part, pour le point caractéristique de cette phase, noté H', la position initiale dans le repère R_O est notée $X_{H'_{Init}}$, avec :

$$X_{H'_{Init}} = [x_{H'}, 0, -r]^T \tag{4.46}$$

(a) Position initiale lors de la phase d'approche en m-bot



(b) Position finale lors de la phase d'approche en m-bot

FIGURE 4.18 – État initial et final lors de la phase d'approche en m-bot

4.4.2.2 Conditions finales

Cet état final est présenté à la figure 4.18b. La position finale souhaitée du m-bot est décrite par la position du point O et celle du point H'. La position désirée de ce dernier est réalisée pour maximiser la stabilité du m-bot lors de cette phase. Par conséquent, il est nécessaire de maximiser son polygone de sustentation, décrit par un triangle équilatéral d'arête v (figure 4.19). Ainsi, la consigne en position du point H' de l'effecteur

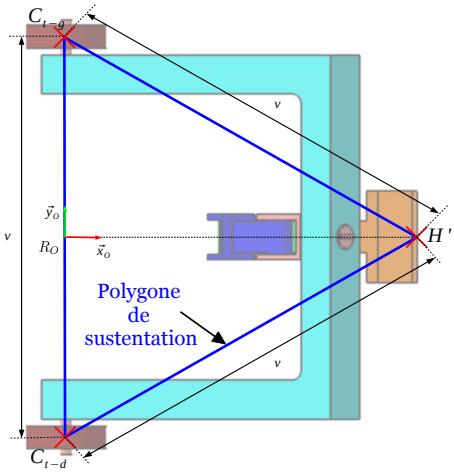


FIGURE 4.19 – Polygone de sustentation du m-bot avec trois contacts au sol

dans le repère R_O, notée $X_{H'_{Fin}}$, est :

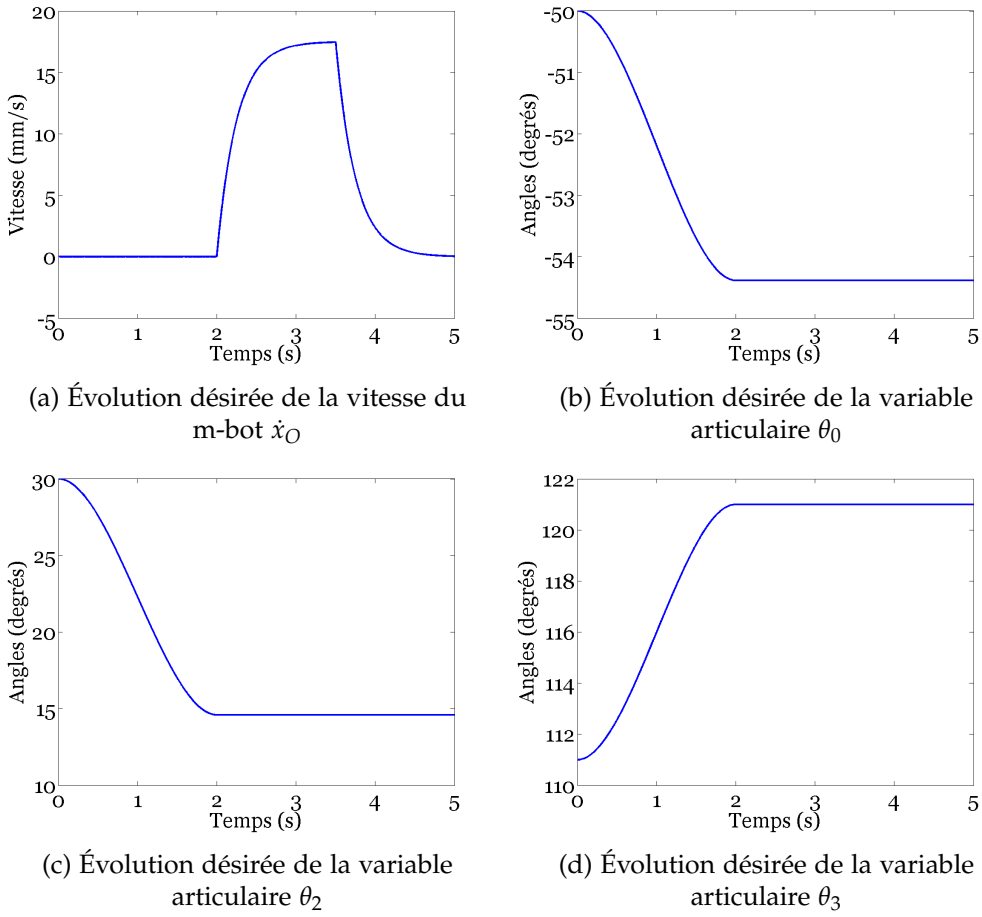
$$X_{H'_{Fin}} = [v.\cos\frac{\pi}{6}, 0, -r]^T \tag{4.47}$$

Cette consigne conditionne aussi la position finale du point O dans le repère global R_G, avec :

$$X_{O_{Fin}} = [x_C - x_{H'}, 0, r]^T \tag{4.48}$$

4.4.2.3 Génération de trajectoire

Afin de passer des conditions initiales aux conditions finales, nous utilisons un générateur de trajectoire polynomiale de degré 3 [Dombre et Khalil, 1988]. Le problème d'optimisation de la trajectoire du m-bot n'est pas traité dans cette thèse, mais on peut se baser sur différents travaux de la littérature [Lopez *et al.*, 2017]. Nous considérons un temps global de simulation de $5s$ avec un temps de stabilisation de $2s$. Durant ce temps, la commande du point H' est effectuée pour maximiser la stabilité statique du m-bot. Ensuite, à partir de $t = 2s$, la commande en locomotion est lancée tout en gardant les consignes pour la partie manipulation. L'évolution désirée des différentes variables est présentée à la figure 4.20.



(a) Évolution désirée de la vitesse du m-bot $\dot{x}_O$

(b) Évolution désirée de la variable articulaire θ_0

(c) Évolution désirée de la variable articulaire θ_2

(d) Évolution désirée de la variable articulaire θ_3

FIGURE 4.20 – Évolution désirée des différentes variables pour la réalisation de la phase d'approche en m-bot

4.4.2.4 Résultats de simulations

La commande en vitesse du point O est réalisée à l'aide d'une fonction du premier ordre. Pour la partie manipulation, elle est réalisée à l'aide de la commande en position

présentée à la figure 4.16. Les valeurs des gains sont présentées en table 4.5.

	θ_0	θ_2	θ_3
K_p	5	5	50
K_d	0.005	0.005	0.005
K_i	0.001	0.001	0.001

TABLE 4.5 – Valeurs des gains du régulateur PID

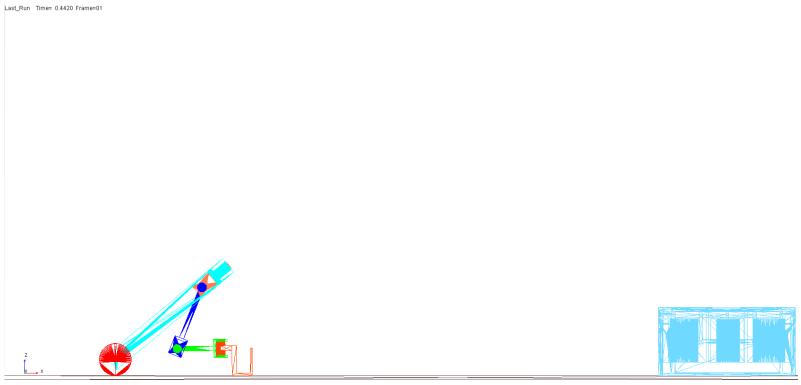
La figure 4.21 présente la validation des différentes étapes de la réalisation de la phase d'approche en m-bot, tandis que la figure 4.22 présente les différentes erreurs des angles de la partie manipulation.

4.4.2.5 Discussion des résultats de simulation en m-bot

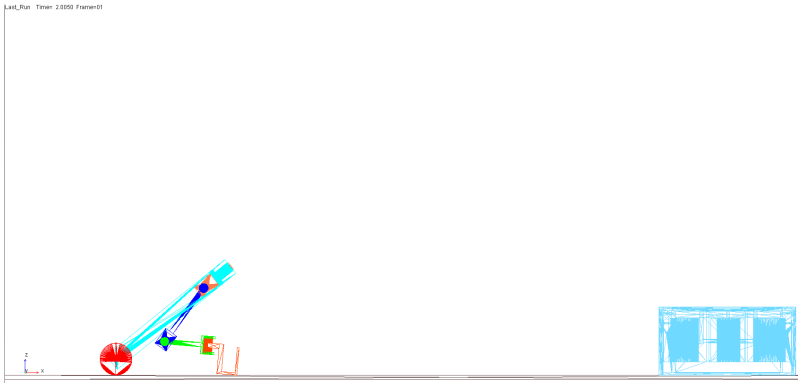
Les simulations réalisées nous ont permis de valider la commande PID (figure 4.16). Néanmois, pour chaque étape, des remarques doivent être présentées :

- *Étape de stabilisation :* Durant cette étape, l'erreur sur θ_0 est importante. Cela est dû à l'absence d'une boucle de stabilisation dynamique. D'autre part, les deux coordonnées θ_2 et θ_3 présentent des erreurs acceptables en régime permanent (1.3% et 4% respectivement). Un ajustement adéquat des paramètres du régulateur PID permettra d'améliorer encore le résultat.
- *Étapes d'accélération et de décélération :* Le début de ces deux étapes ($t = 2s$ et $t = 3.5s$ respectivement) vient déstabiliser momentanément les valeurs de θ_2 et θ_3. Le correcteur agit assez rapidement pour remettre le système dans son régime permanent.

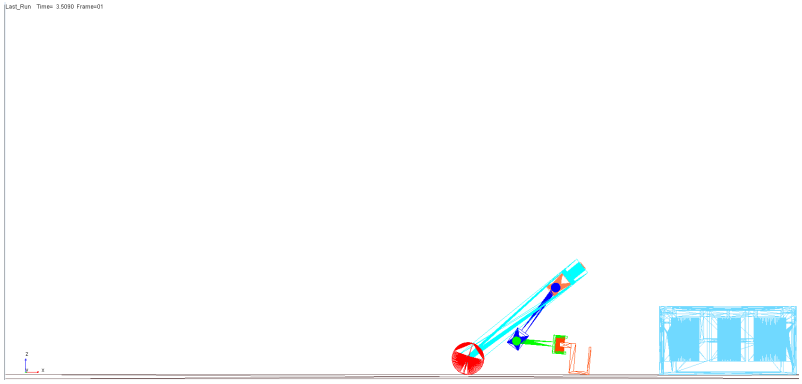
Finalement, nous pouvons conclure que la commande en position présentée à la section 4.3.1 est adaptée à la commande du m-bot dans cette phase à condition d'ajouter une boucle de stabilisation dynamique.



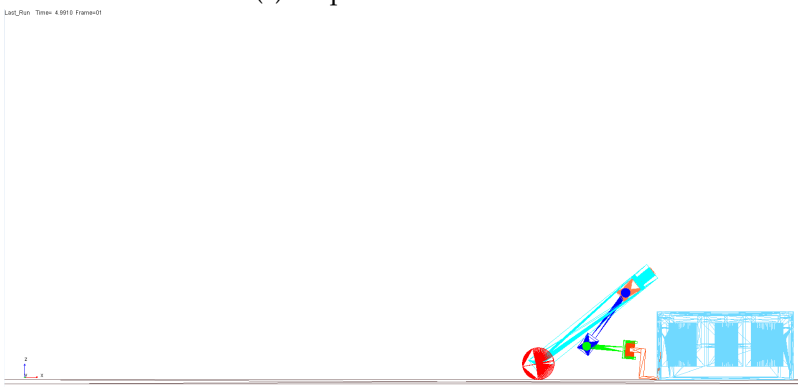
(a) Étape de stabilisation



(b) Étape d'accélération

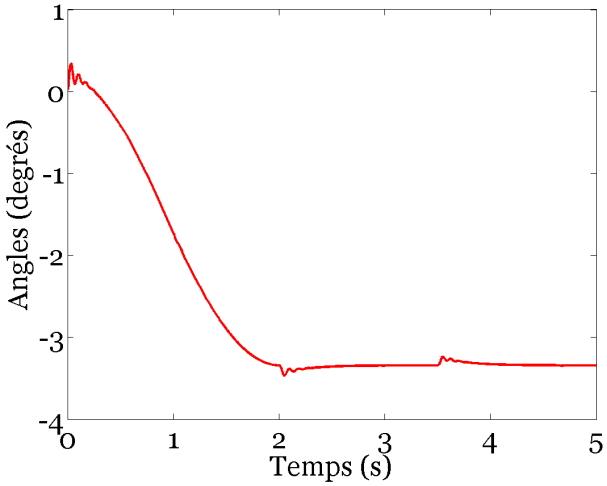


(c) Étape de décélération

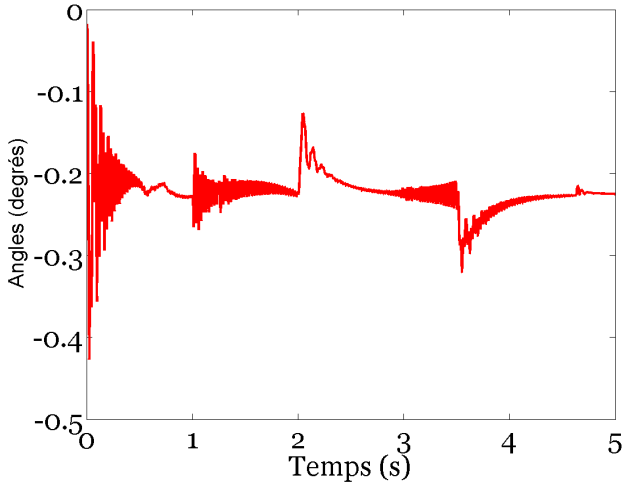


(d) Étape finale de la phase

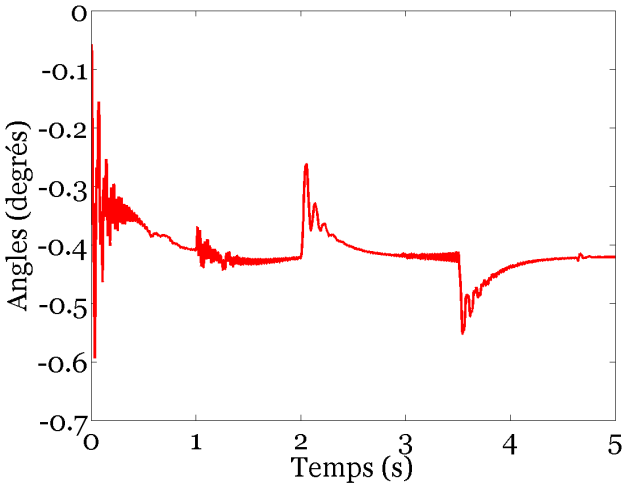
FIGURE 4.21 – Validation par des simulations de la phase d'approche en m-bot



(a) Erreur de la coordonné articulaire θ_0



(b) Erreur de la coordonné articulaire θ_2

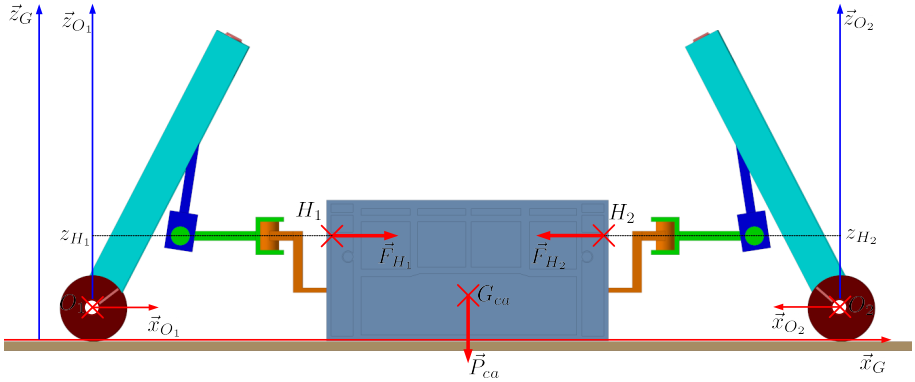


(c) Erreur de la coordonné articulaire θ_3

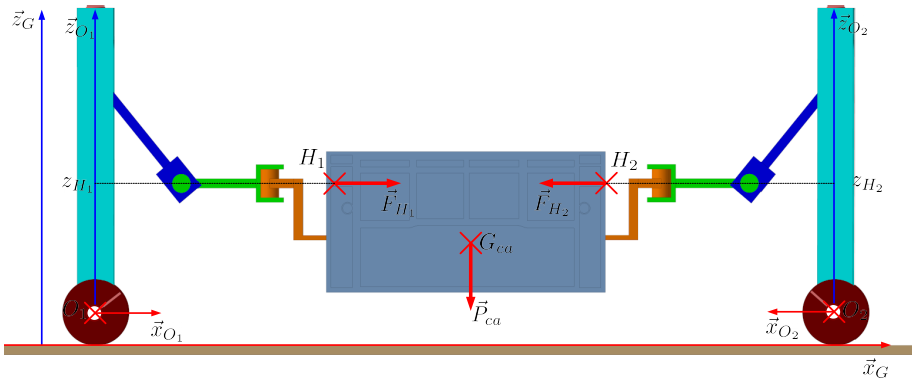
FIGURE 4.22 – Erreurs des coordoonnées articulaires pour la réalisation de la phase d'approche en m-bot

4.4.3 Simulation de la phase de levage en mode p-bot

La deuxième loi de commande présentée à la section 4.3.2 est utilisée pour la phase de levage en mode p-bot. Les conditions initiales et finales sont présentées à la figure 4.23.



(a) Position initiale lors de la phase de levage en p-bot



(b) Position finale lors de la phase de levage en p-bot

FIGURE 4.23 – Conditions initiales et finales lors de la phase de levage en p-bot

Afin de réaliser cette phase, chaque m-bot doit appliquer une force suivant son vecteur $\vec{x}_O$. Ainsi, les matrices de sélection pour la réalisation de la commande présentée à la figure 4.17 sont notées :

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, S' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.49}$$

Dans ce cas, la matrice S est utilisée pour la commande en position des points H_1 et H_2 dans les plans (x_{O_1}, z_{O_1}) et (x_{O_2}, z_{O_2}) respectivement. D'autre part, la matrice S' est utilisée pour la commande en effort selon les vecteurs $\vec{x}_{O_1}$ et $\vec{x}_{O_2}$ respectivement.

4.4.3.1 Conditions initiales

Au départ de la phase (figure 4.23a), chaque m-bot est accroché à la caisse à l'aide de son effecteur sans exercer une force. Sachant que cette phase se fait dans les plans (x_{O_1}, z_{O_1}) et (x_{O_2}, z_{O_2}), les conditions initiales de cette phase sont présentées par les

positions des points $X_{H_{1_{Init}}}$ et $X_{H_{2_{Init}}}$ dans les repères R_{O_1} et R_{O_2} respectivement :

$$\begin{cases} X_{H_{1_{Init}}} & = & [x_{H_{1_{Init}}}, 0, z_{H_{1_{Init}}}]^T \\ X_{H_{2_{Init}}} & = & [x_{H_{2_{Init}}}, 0, z_{H_{2_{Init}}}]^T \end{cases} \tag{4.50}$$

Les forces de contact sont nulles pour chaque effecteur, ainsi :

$$\begin{cases} F_{H_{1_{Init}}} & = & [0, 0, 0]^T \\ F_{H_{2_{Init}}} & = & [0, 0, 0]^T \end{cases} \tag{4.51}$$

4.4.3.2 Conditions finales

Le but de cette phase est le levage de la caisse comme présentée à la figure 4.23b. Le positionnement final des points H_1 et H_2 est donné par :

$$\begin{cases} X_{H_{1_{Fin}}} & = & [x_{H_{1_{Fin}}}, 0, z_{H_{1_{Fin}}}]^T \\ X_{H_{2_{Fin}}} & = & [x_{H_{2_{Fin}}}, 0, z_{H_{2_{Fin}}}]^T \end{cases} \tag{4.52}$$

avec :

$$\begin{cases} x_{H_{1_{Fin}}} & = & x_{H_{1_{Init}}} \\ x_{H_{2_{Fin}}} & = & x_{H_{2_{Init}}} \end{cases} \tag{4.53}$$

Pour la commande en effort, les valeurs des forces $\vec{F}_{H_1}$ et $\vec{F}_{H_2}$ doivent permettre le levage de la caisse. Afin de garantir la symétrie du levage, nous imposons :

$$||\vec{F}_{H_1}|| = ||\vec{F}_{H_2}|| = F_H \tag{4.54}$$

Le calcul de ces forces dépend du poids de la caisse et du coefficient de frottement statique μ entre celle-ci et l'effecteur. Dans notre cas, nous prenons pour hypothèse un coefficient de frottement statique $\mu = 0.5$. Par conséquent :

$$F_H \geq P_{ca} \tag{4.55}$$

Nous posons $F_H = P_{ca}$. Finalement, les forces à appliquer au bout des effecteurs sont :

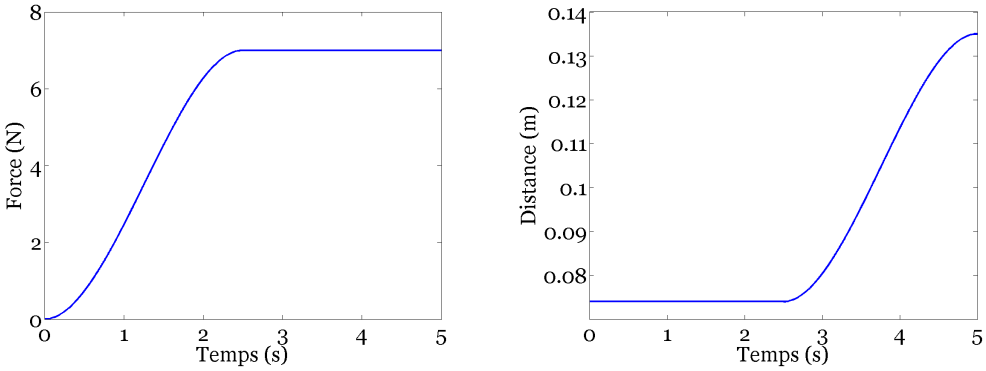
$$\begin{cases} F_{H_{1_{Fin}}} & = & [P_{ca}, 0, 0]^T \\ F_{H_{2_{Fin}}} & = & [P_{ca}, 0, 0]^T \end{cases} \tag{4.56}$$

4.4.3.3 Génération des trajectoires

Nous proposons le même type de trajectoires que pour le cas précédent avec un temps de simulation global de $t = 5s$ (figure 4.24). Sachant que les valeurs de x_H et de y_H sont fixes, les deux trajectoires qui nous intéressent sont celles de F_H (figure 4.24a) et de z_H (figure 4.24b). La première étape (entre $t = 0s$ et $t = 2.5s$) consiste à appliquer les efforts F_H pour la prise de la caisse. Ensuite, de $t = 2.5s$ à $t = 5s$, le levage de la caisse est effectué.

4.4.3.4 Résultats de simulations

Pour les simulations, nous prenons un poids de la caisse $m_{ca} = 0.7kg$, par conséquent, $F_H = 7N$. Les valeurs des gains sont présentées en table 4.6. La figure 4.25 présente l'erreur de position sur l'axe $\vec{z}_G$ (figure 4.25a) et l'erreur en effort suivant l'axe $\vec{x}_G$ (figure 4.25b). La figure 4.26 présente la validation des différentes étapes de la réalisation de la phase de levage en p-bot.

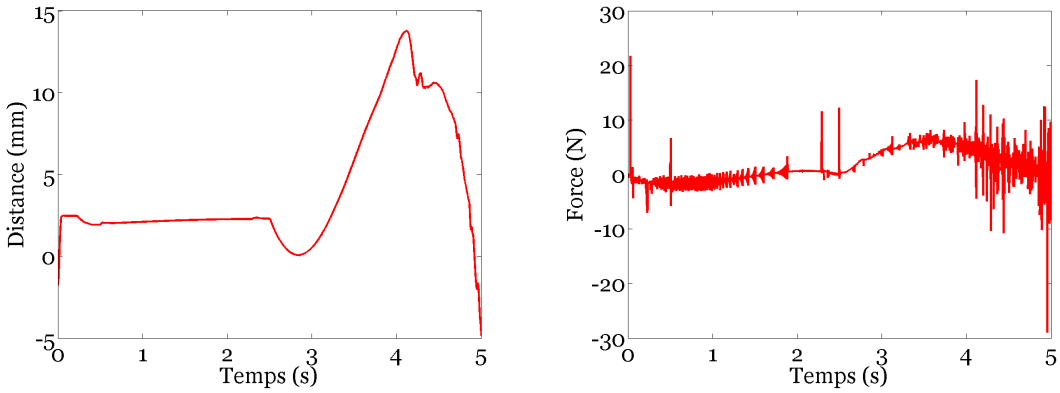


(a) Trajectoire désirée pour F_H (b) Trajectoire désirée pour z_H

FIGURE 4.24 – Trajectoires pour la réalisation de la phase de levage en p-bot

	z_H	F_H
K_p	5	/
K_d	0.01	/
K_i	0.001	0.0035

TABLE 4.6 – Valeurs des gains du régulateur PID



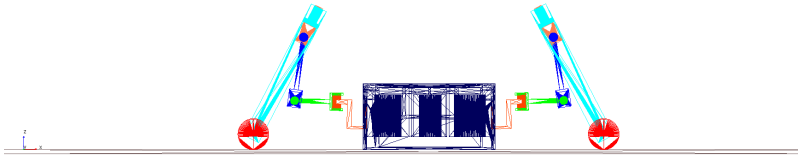
(a) Erreur de position suivant $\vec{z}_G$ (b) Erreur en effort suivant $\vec{x}_G$

FIGURE 4.25 – Erreurs de la réalisation de la phase de levage en p-bot

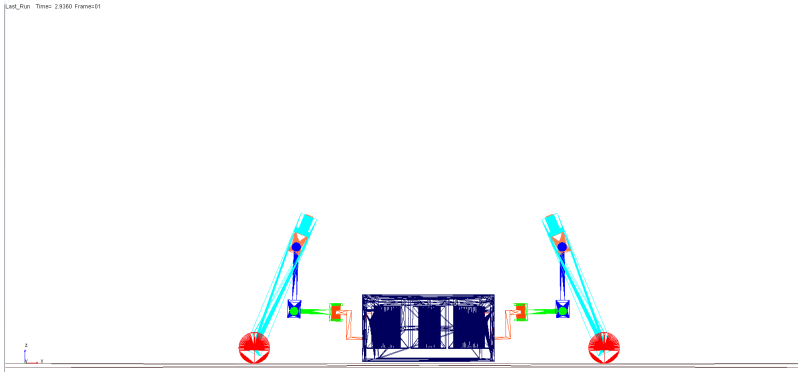
4.4.3.5 Discussion des résultats de simulation en p-bot

Cette phase a été réalisée en deux étapes :

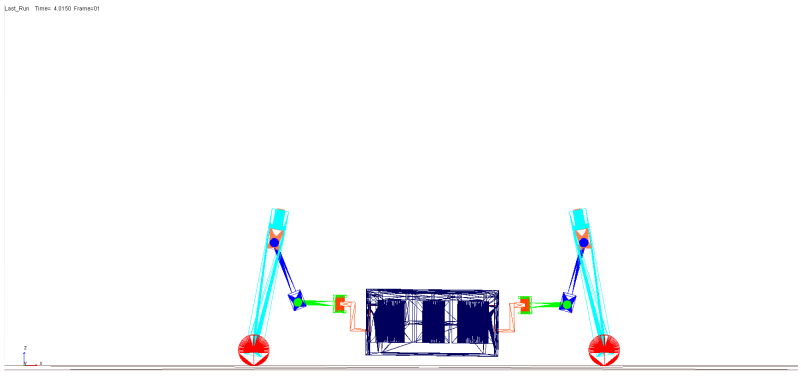
- *Stabilisation de la caisse :* Durant cette phase, la loi de commande en effort a assuré une application progressive des efforts latéraux pour la prise de la caisse. Cela est visible sur le résultat de l'erreur en effort présenté à la figure 4.25b.
- *Levage de la caisse :* Le déclenchement de la commande en position de la loi de commande a déstabilisé le système (cf. figure 4.25b à $t = 2.5s$). Néanmoins, cet amorçage de la commande a été contrôlé avec succès avec la commande hybride force-position.



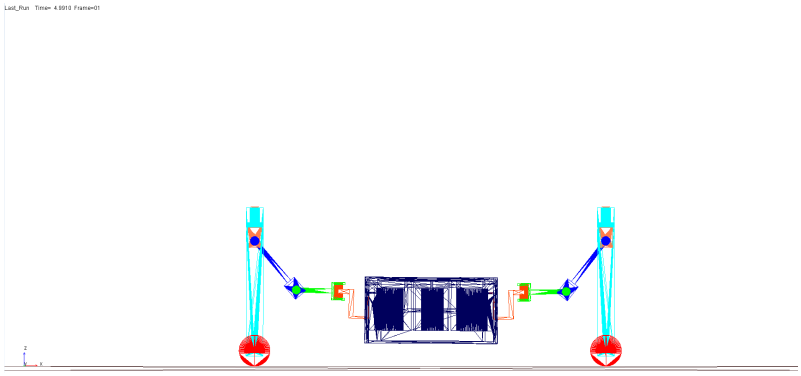
(a) Étape initiale de la phase



(b) Préparation au levage



(c) Levage de la caisse



(d) Étape finale de la phase

FIGURE 4.26 – Validation en simulation de la phase de levage en p-bot

Les résultats de simulation de cette phase montrent que la loi de commande est pertinente pour ce type d'applications. Il reste à valider les autres phases de réalisation de la tâche.

Conclusion

Ce chapitre présente les différentes étapes de modélisation et de commande associées à notre manipulateur mobile. La première partie concerne la modélisation des deux parties constituantes du m-bot, à savoir les chaînes cinématiques de locomotion et de manipulation. Cependant, l'architecture issue de la synthèse structurale ne tient pas compte de la redondance opérationnelle par rapport à la tâche. Nous présentons donc les liaisons que nous considérons comme bloquées suivant les différentes phases de réalisation de la tâche afin de simplifier la commande. Nous présentons ensuite les contraintes de fonctionnement en m-bot en considérant les deux modes de fonctionnement : trois points de contact au sol et stabilisation dynamique, puis en configuration p-bot. Ceci permet tout d'abord de dimensionner les différents éléments constitutifs du m-bot. Nous présentons ensuite les modèles de commande retenus et les simulations réalisées en mode m-bot et p-bot. Les résultats des différentes simulations montrent les capacités du manipulateur mobile à assurer la tâche, en mode m-bot et en mode p-bot.

Conclusion générale et perspectives

Les travaux présentés dans cette thèse portent sur la conception de nouvelles architectures de manipulateurs mobiles modulaires pouvant coopérer entre eux pour la réalisation de tâches dans des contextes industriels ou de service. Le système robotique coopératif considéré, appelé p-bot (ou poly-robot), est composé de plusieurs entités simples, appelées m-bots (ou mono-robots). Les m-bots, tout comme le p-bot résultant de leur coopération, sont tous des Manipulateurs Mobiles (MMs). La cohérence du p-bot est assurée par la co-manipulation de la même charge par plusieurs m-bots, ou par leur interconnexion grâce à des chaînes cinématiques dédiées.

Le premier chapitre présente un état de l'art des robots manipulateurs mobiles coopératifs, actuellement totalement absents du marché de la robotique et seulement traités par quelques rares études en laboratoire. Cette étude montre que la conception de manipulateurs mobiles (MMs) modulaires pour la réalisation de tâches spécifiques est encore peu traitée. En effet, il ressort que la plupart des manipulateurs mobiles ont une architecture classique composée d'un bras manipulateur à 6 ddls associé à une base mobile à roues. D'autre part, les tâches industrielles prépondérantes concernent la manipulation et le transport de charges rigides ou flexibles. Or, l'adaptabilité de ces MMs à ces tâches ne nécessite souvent pas autant de mobilités et de capacité de charge. Ceci conduit donc à un surdimensionnement du MM par rapport à la tâche considérée. D'autre part, l'utilisation coopérative de MMs (p-bot), basés sur des architectures plus simples (m-bot), permet d'envisager également la réalisation d'une grande variété de tâches dans différents environnements. Ces MMs étant modulaires, ceci permet de s'adapter non seulement à la nature de la tâche mais également aux cadences variables. Il s'agit d'avantages précieux pour s'intégrer dans le contexte de l'industrie 4.0 placée sous le signe de l'adaptabilité, de la reconfigurabilité et de flux tendus. L'état de l'art fait apparaitre deux cas d'utilisation : le premier concerne la coopération entre les MMs et le deuxième concerne la collaboration entre ces MMs et des opérateurs humains. Plusieurs travaux sur ces deux sujets ont été analysés. Ceci nous a permis d'identifier les défis auxquels doivent faire face les MMs de demain :

- Le premier concerne l'élargissement des domaines d'utilisation de ces MMs en intégrant les deux aspects de modularité et de reconfigurabilité. L'état de l'art présente quelques projets utilisant des MMs coopératifs pour d'autres tâches que la simple manipulation.
- Le deuxième concerne la conception de cinématiques originales et plus pertinentes pour les MMs. En effet, les MMs existants sont souvent redondants, avec huit ddls ou plus. L'enjeu est ici de concevoir un MM doté strictement de six ddls qui sera ainsi plus simple, plus rigide et plus léger qu'auparavant. Un partage judicieux des mobilités entre les fonctions de locomotion et de manipulation devra également

être défini.

- Le troisième concerne la modélisation et la commande de MMs coopératifs vis-à-vis des nouvelles architectures et applications envisagées. La modélisation doit faire face à une plus grande complexité de la cinématique, qui comporte de nombreuses boucles et liaisons de type contact unilatéral. La commande se complexifie également du fait de transitions entre plusieurs modèles (m-bot seul ou p-bot), différentes phases de réalisation de la tâche, nombre de contacts variable avec l'environnement, communication inter-robots, etc.

Ces trois défis nous ont amené à définir les trois principaux objectifs de cette thèse :

- Identifier des scénarios du monde de la robotique industrielle et de service pouvant bénéficier d'une architecture modulaire et reconfigurable utilisant des MMs.
- Proposer une démarche générique de synthèse structurale de l'architecture du m-bot basée sur la prise en compte des contraintes des différentes tâches, à la fois pour le m-bot et pour le p-bot. Cette démarche, basée sur les paramètres structuraux à savoir la connectivité, la mobilité, la redondance et le degré d'hyperstatisme, fournit une liste exhaustive d'architectures cinématiques répondant au mieux au cahier des charges.
- Modéliser et contrôler les architectures cinématiques de MMs obtenues.

Le deuxième chapitre présente tout d'abord quelques exemples d'intégration possible des MMs dans les secteurs de l'industrie et des services. Ceux-ci mettent en lumière les apports en reconfigurabilité et adaptabilité des MMs, interconnectés par des chaînes cinématiques de connexion ou par le biais de la charge utile (charge à manipuler ou outil à utiliser). Chaque MM ainsi proposé est composé d'une partie locomotion et d'une partie manipulation. La partie locomotion contient des chaînes cinématiques de locomotion qui se terminent par un organe de locomotion générant un contact avec le sol. La partie manipulation contient des chaînes cinématiques de manipulation ou de connexion, dépendant de l'organe terminal attaché à la chaîne cinématique. Les deux parties manipulation et locomotion du MM proposé sont connectées par un châssis.

Nous présentons ensuite trois types de tâches applicatives de manipulation (*Pick & Place*, *Kitting* et manipulation en bord de ligne), de fabrication industrielle (assemblage, rivetage, usinage, etc.) et de service. Deux exemples de tâches ont été présentés : une tâche à poste fixe, où les MMs manipulent une charge devant un outil fixe, et une tâche à poste mobile, où l'outil est manipulé par un ou plusieurs MMs. Ce type de fonctionnement permet entre autre de diminuer le temps d'indisponibilité des moyens de fabrication car les MMs sont modulaires avec des fonctions interchangeables. Le dernier type de tâches présenté concerne des tâches de service (génie civil et logistique) susceptibles d'accueillir un système robotique coopératif.

Afin de proposer une démarche de synthèse structurale, nous précisons la tâche retenue issue des défis présentés dans le cadre du PSA Booster Day concernant la manipulation et le transport de caisses vides ou pleines et les contraintes qui ont conduit à la définition d'un cahier des charges relatif à la tâche et à l'environnement impactant la structure des m-bots et des p-bots. Cette définition de la tâche permet une première restriction du domaine de conception possible des MMs. L'analyse des paramètres structuraux des mécanismes (connectivité, mobilité, redondance, degré d'hyperstatisme) est ensuite présentée. Nous précisons les notations et les calculs de ces différents paramètres en mode m-bot, puis p-bot. Dans ce second mode, nous distinguons deux configura-

tions : co-manipulation de la même charge par deux m-bots ou connexion entre deux m-bots, seul le deuxième manipulant la charge.

Le troisième chapitre présente une démarche de synthèse structurale basée sur l'expression de contraintes fonctionnelles, reformulées sous forme de règles de conception portant sur les paramètres structuraux des mécanismes.

La démarche permet de préciser la structure cinématique des m-bots en définissant la chaîne cinématique de la partie manipulation, qui peut avoir deux, trois ou quatre liaisons simples. Cela est réalisé grâce à l'étude des espaces vectoriels des vitesses du m-bot, comparé à celui souhaité par la définition des contraintes sur les paramètres structuraux.

À l'issu de la première étape, des architectures de MMs sont présentées. Sur l'ensemble de ces architectures, des règles de sélection sont appliquées. Ces règles sont issues des contraintes fonctionnelles sur la tâche et l'environnement : pour le m-bot, préserver l'horizontalité de la charge durant son levage ainsi que la capacité de se stabiliser en tangage durant le levage ; pour le p-bot, permettre un braquage sans ripage. L'application de ces règles aboutit à trois solutions cinématiques innovantes de MMs.

Nous proposons ensuite les différentes formations de p-bot permises par chaque architecture de m-bot, en deux modes de coopération : co-manipulation et connexion. Ces structures de p-bots sont vérifiées grâce aux outils d'analyse structurale présentés au chapitre 2. Parmi les trois MMs proposés, nous retenons la solution donnant un degré d'hyperstatisme nul désigné comme la plus performante.

L'originalité de la démarche réside dans le fait qu'elle synthétise des solutions respectant le cahier des charges. Concrètement, toute architecture de robot issue de cette démarche a la capacité cinématique de réaliser la tâche considérée dans l'environnement défini, à la fois seul en tant que m-bot ou de façon coopérative au sein d'un p-bot. Elle présente également l'avantage d'être plus concise qu'une démarche d'énumération combinatoire.

Le quatrième chapitre concerne la modélisation et la commande de MMs pour la réalisation de la tâche de transport et manipulation de caisses. Concernant la modélisation, celle-ci est scindée en deux. La première concerne la partie modélisation cinématique de la locomotion avec la prise en considération de la condition du Roulement Sans Glissements (RSG). La deuxième concerne la partie manipulation basée sur un paramétrage de *Denavit-Hartenberg*. Ensuite, en analysant les phases de fonctionnement des MMs dans les deux modes m-bot et p-bot, les modèles sont simplifiés en bloquant des liaisons, ce qui permet une implémentation plus simple de la commande.

Avant de définir la commande des MMs, une synthèse dimensionnelle est proposée afin de garantir la possibilité de la réalisation de la tâche. Ainsi, des contraintes liées à l'espace de travail et aux différentes phases de réalisation de la tâche sont exprimées. À ces contraintes s'ajoutent celles relatives aux fonctionnements en mode m-bot et p-bot. Cette démarche de synthèse dimensionnelle a permis la présentation d'un modèle CAO de MM assurant la réalisation de la tâche en mode m-bot et p-bot en co-manipulation.

Deux méthodes de commande (PID et hybride force-position) sont présentées pour le pilotage des MMs. Ces lois de commande sont validées sur deux phases. La commande PID est validée par simulation lors de la phase d'approche en mode m-bot. La commande hybride force-position est validée par simulation lors de la phase de levage en mode p-bot.

Les contributions principales de la thèse sont synthétisées par :

- L'étude de l'état de l'art des manipulateurs mobiles coopératifs.
- La description et spécification de scénarios de production industrielle, issus de l'industrie automobile, du génie civil ou de la logistique, réalisables par manipulateurs mobiles modulaires coopératifs.
- La réalisation de ces scénarios à l'aide de manipulateurs mobiles modulaires coopératifs.
- L'analyse structurale des manipulateurs mobiles en tant que m-bot ou p-bot, en intégrant la liaison particulière de contact roue-sol et en calculant leurs paramètres structuraux (connectivité, mobilité, redondance et degré d'hyperstatisme).
- La proposition d'une démarche de synthèse structurale prenant en compte des contraintes sur les paramètres structuraux, exprimées à la fois pour un m-bot et pour un p-bot et issues de l'étude de la tâche et de l'environnement.
- La synthèse de trois cinématiques innovantes de m-bots compatible avec les scénarios, à la fois pour le travail d'un m-bot seul ou de plusieurs m-bots interconnectés en un p-bot
- La synthèse dimensionnelle et la modélisation de manipulateurs mobiles et de leur commande pour la réalisation de tâches en tant que m-bot et p-bot.

Ces travaux proposent des solutions originales pour le développement de systèmes de fabrication et de transport intelligents et agiles. Ces travaux ont fait l'objet de trois conférences internationales et d'un dépôt de brevet. Une publication dans une revue internationale est en cours.

Perspectives

Ces premiers travaux ont montré les capacités de la démarche de synthèse structurale pour synthétiser de nouvelles architectures de MMs mieux adaptées à la réalisation de tâches industrielles en environnements contraints.

Une première perspective suite à ces travaux va consister à appliquer cette méthode de synthèse structurale à d'autres tâches, tant pour la robotique industrielle que de services. Le cadre du PSA Booster Day offre à lui seul un large champ de nouvelles applications autour des opérations de bord de ligne ou de *Kitting*. Ceci va nécessiter l'expression de nouvelles contraintes et un approfondissement des hypothèses de contact roue/sol en tenant compte des différents types de roues et de sols. Il s'agit également d'affiner les règles de sélection des architectures pour s'approcher d'un fonctionnement idéal lors de la réalisation de la tâche. Cette démarche est transposable à d'autres tâches et d'autres espaces de travail, en exprimant ces conditions sous formes de contraintes sur les paramètres structuraux et des règles de sélection spécifiques.

Une deuxième perspective pour nos travaux consiste à compléter la maquette numérique des m-bots en incorporant les modèles CAO des moteurs et en optimisant la structure des différentes pièces. Ceci va permettre de simuler les différents modes de commande (commande adaptative, commande en couples calculés, etc.) durant les différentes phases de réalisation des tâches industrielles.

Une troisième perspective concerne la réalisation d'un démonstrateur à échelle réduite. Celui-ci permettra d'implémenter les différentes lois de commande et de tester le

comportement réel du MM durant les différentes phases de réalisation des tâches, en mode m-bot et p-bot, mettant en avant les problèmes de stabilisation dynamique, de synchronisation des tâches entre m-bots et de communication, etc. Cela permettra ainsi d'amorcer la réalisation d'un démonstrateur opérationnel à l'échelle 1 :1 avec un partenaire industriel et de tester la pertinence des concepts proposées pour la réalisation de véritables tâches industrielles.

Remerciements

Ces travaux ont été menés dans le cadre de l'action *RobDyn* du défi 1 du LabEx *IMobS*^{3}, en collaborations au sein de l'Institut Pascal entre le thème *Machines, Robots et Systèmes Industriels* (MRSI) de l'axe *M3G* (Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Génie Industriel) et le thème *Modélisation, Autonomie et Contrôle dans les Systèmes Complexes* (MACCS) de l'axe *ISPR* (Image, Systèmes de Perception, Robotique).

Ces travaux ont été financés par le programme " investissements 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 *IMobS*^{3} (ANR-10-LABX-16-01).

Bibliographie

ABB : IRB 14000 YuMi - List Of Industrial Robots From ABB Robotics. URL http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/yumi. Consulté le 24/10/2018.

Abeygunawardhana, P. et Murakami, T. : Vibration suppression of two-wheel mobile manipulator using resonance-ratio-control-based null-space control. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, 57(12):4137–4146, 2010.

Abou-Samah, M. , Tang, C. P. , Bhatt, R. M. et Krovi, V. : A kinematically compatible framework for cooperative payload transport by nonholonomic mobile manipulators. *Autonomous Robots*, 21(3):227–242, 2006.

Acaccia, G. , Michelini, R. , Molfino, R. et Razzoli, R. : Mobile robots in greenhouse cultivation : inspection and treatment of plants. *In 1st international workshop on advances in service robotics*, p. 13–15, 2003.

Ackerman, E. : Boston dynamics' spotmini is all electric, agile, and has a capable face-arm, June 2016. URL http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/home-robots/boston-dynamics-spotmini. Consulté le 24/10/2018.

Adams, J. , Bajcsy, R. , Košecká, J. , Kumar, V. , Mintz, M. , Mandelbaum, R. , Wang, C.-C. , Yamamoto, Y. et Yun, X. : Cooperative material handling by human and robotic agents : Module development and system synthesis. *Expert Systems with Applications*, 11(2):89–97, décembre 1994.

Adouane, L. et Le Fort-Piat, N. : Hybrid behavioral control architecture for the cooperation of minimalist mobile robots. *In Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004 IEEE International Conference on*, vol. 4, p. 3735–3740. IEEE, 2004.

Andaluz, V. , Roberti, F. , Toibero, M. , Leica, P. et Carelli, R. : *Adaptive Coordinated Cooperative Control of Multi-Mobile Manipulators*. INTECH Open Access Publisher, 2012.

Ang, M. et Tourassis, V. : Flexible manufacturing using modular robotic wrists. *In CAD/CAM Robotics and Factories of the Future*, p. 166–170. Springer, 1989.

Angeles, J. : The qualitative synthesis of parallel manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 126(4):617–624, 2004.

Angeles, J. et Park, F. : Performance evaluation and design criteria. *In Springer Handbook of Robotics*, p. 229–244. Springer, 2008.

Arai, M. et Haruo, H. : Robot system for removing asbestos sprayed on beams. *In Automation and Robotics in Construction, the 28th International Symposium on*, p. 1409–1414. IAARC, 2011.

Axel : Robots : en complémentarité avec l'homme dans le monde professionnel, April 2016. URL https://www.innovant.fr/2017/04/26/robots-en-complementarite-avec-lhomme-dans-le-monde-professionnel/. Consulté le 24/10/2018.

Axess Industries : Bac norme VDA | Bacs Norme Automobile | Axess Industries, 2017. URL https://www.axess-industries.com/stockage/bacs-plastique-de-stockage/norme-automobile/bac-norme-vda-p-124541. Consulté le 24/10/2018.

Bay, J. : Design of the "army-ant" cooperative lifting robot. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 2(1):36–43, 1995.

Bayle, B. , Fourquet, J.-Y. et Renaud, M. : Kinematic modelling of wheeled mobile manipulators. *In Robotics and Automation (ICRA), International Conference on*, vol. 1, p. 69–74 vol.1, Sept 2003.

Bernier, C. : "Mr. Roam : Mobile Platform for Industrial Robotic Applications", 2013. URL http://blog.robotiq.com/bid/65087/Mr-Roam-Mobile-Platform-for-Industrial-Robotic-Applications. Consulté le 24/10/2018.

Besse, M. : Kuka des robots mobiles et adaptables dans l'usine 4.0, 2016. URL http://lejournaldeleco.fr/kuka-des-robots-mobiles-et-adaptables-dans-lusine-4-0/. Consulté le 24/10/2018.

Bewley, T. , Schmidt-Wetekam, C. , Moore, J. , Dimatteo, J. , Ramirez, M. , Zhang, D. et Summers, S. : Multimodal agile robots, sept. 25 2008. URL https://www.google.com/patents/US20080230285. US Patent App. 12/001,059. Consulté le 24/10/2018.

Bischoff, R. , Huggenberger, U. et Prassler, E. : KUKA youBot-a mobile manipulator for research and education. *In Robotics and Automation (ICRA), International Conference on*, p. 1–4. IEEE, 2011.

Bischoff, R. , Kurth, J. , Schreiber, G. , Koeppe, R. , Albu-Schäffer, A. , Beyer, A. , Eiberger, O. , Haddadin, S. , Stemmer, A. , Grunwald, G. *et al.* : The KUKA-DLR lightweight robot arm - a new reference platform for robotics research and manufacturing. *In Robotics (ISR), 41st international symposium on and 6th German conference on robotics (ROBOTIK)*, p. 1–8. VDE, 2010.

Bøgh, S. , Hvilshøj, M. , Kristiansen, M. et Madsen, O. : Identifying and evaluating suitable tasks for autonomous industrial mobile manipulators (aimm). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 61(5):713–726, 2012.

Bolandi, H. et Ehyaei, A. F. : A novel method for trajectory planning of cooperative mobile manipulators. *Journal of medical signals and sensors*, 1(1):24, 2011.

Bonev, I. : User's manual for the dextar five-bar parallel robot, 01 2015.

Boston Dynamics : Handle | Boston Dynamics, 2017. URL https://www.bostondynamics.com/handle. Consulté le 24/10/2018.

Bournigal, J.-M. : Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements. *Rapport de la mission agroéquipements, Irstea*, 2014.

Bouzgarrou, B. C. , Chapelle, F. et Fauroux, J.-C. : Preliminary design and analysis of the mobile robot openwheel i3r. *In Proc. 3rd Third International Congress on Design and Modelling of Mechanical Systems, CMSM*, vol. 9, p. 16–18, 2009.

Brogårdh, T. : Present and future robot control development—an industrial perspective. *Annual Reviews in Control*, 31(1):69–79, 2007.

Campion, G. , Bastin, G. et Dandrea-Novel, B. : Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*, 12(1):47–62, 1996.

Campion, G. et Chung, W. : Wheeled robots. *In Springer Handbook of Robotics*, p. 391–410. Springer, 2008.

Carbone, G. et Ceccarelli, M. : A stiffness analysis for a hybrid parallel-serial manipulator. *Robotica*, 22(5):567–576, 2004.

Chan, R. P. M. , Stol, K. A. et Halkyard, C. R. : Review of modelling and control of two-wheeled robots. *Annual Reviews in Control*, 37(1):89–103, 2013.

Chen, X. et Li, Y. : Cooperative transportation by multiple mobile manipulators using adaptive nn control. *In Neural Networks (IJCNN), International Joint Conference on*, p. 4193–4200. IEEE, 2006.

Cherubini, A. , Crosnier, A. , Fraisse, P. , Navarro, B. , Passama, R. et Sorour, M. : Research on cobotics at the lirmm idh group. 2017.

Cherubini, A. , Passama, R. , Meline, A. , Crosnier, A. et Fraisse, P. : Multimodal control for human-robot cooperation. *In Intelligent Robots and Systems (IROS), International Conference on*, p. 2202–2207. IEEE/RSJ, 2013.

Chiaverini, S. , Oriolo, G. et Walker, I. : Kinematically redundant manipulators. *In Springer handbook of robotics*, p. 245–268. Springer, 2008.

Chinelato, C. I. G. et de Siqueira, M.-F. L. : Control of cooperative mobile manipulators transporting a payload. *In Mechanical Engineering (COBEM), International Congress of*, p. 9943–9954. ABCM, 2013.

Clearpath Robotics : Husky UGV - Outdoor Field Research Robot by Clearpath, 2017. URL https://www.clearpathrobotics.com/husky-unmanned-ground-vehicle-robot/. Consulté le 24/10/2018.

Clouvel, P. , Bournigal, J.-M. , Houllier, F. , Lecouvey, P. et Pringuet, P. : Agriculture & innovations 2025 : 30 projets pour une agriculture compétitive & respectueuse de l'environnement. *Agronomie, Environnement et Sociétés*, 2015. Rapport aux Ministres en charge de l'agriculture et en charge de la recherche.

CobotsGuide : "CobotsGuide | The Cobots", 2016. URL http://cobotsguide.com/cobots. Consulté le 24/10/2018.

Colgate, E. , Peshkin, M. et Wannasuphoprasit, W. : Cobots : Robots for collaboration with human operators. 1996.

CoRoT : Projet Corot (CoRoT – Improving the design of flexible and responsive manufacturing systems involving autonomous and Collaborative RoboTs) - CESI recherche, 2017. URL https://recherche.cesi.fr/projets/projet-corot-corot-improving-the-design-of-flexible-and-responsive-manufacturing-systems-involving-autonomous-and-collaborative-robots. Consulté le 24/10/2018.

Crops : Crops homepage, 2017. URL http://www.crops-robots.eu/. Consulté le 24/10/2018.

De Gea, J. , Lemburg, J. , Roehr, T. M. , Wirkus, M. , Gurov, I. et Kirchner, F. : Design and control of an intelligent dual-arm manipulator for fault-recovery in a production scenario. *In Emerging Technologies & Factory Automation, 2009. ETFA 2009. IEEE Conference on*, p. 1–5. IEEE, 2009.

Detert, T. , Charaf Eddine, S. , Fauroux, J.-C. , Haschke, T. , Becchi, F. , Corves, B. , Guzman, R. , Herb, F. , Linéatte, B. et Martin, D. : Bots2rec : introducing mobile robotic units on construction sites for asbestos rehabilitation. *Construction Robotics*, p. 1–9, 2017.

Devol, G. : Programmed article transfer, juin 13 1961. URL http://www.google.com/patents/US2988237. US Patent 2,988,237. Consulté le 24/10/2018.

Dombre, E. et Khalil, W. : *Modélisation et Commande des Robots*. Hermes, 1988.

Dorigo, M. , Floreano, D. , Gambardella, L. M. , Mondada, F. , Nolfi, S. , Baaboura, T. , Birattari, M. , Bonani, M. , Brambilla, M. et Brutschy, A. : Swarmanoid : a novel concept for the study of heterogeneous robotic swarms. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 20(4):60–71, 2013.

Durville, L. : *PSA RA kitting Solution*. Groupe PSA, 2016. Rapport technique interne.

EFFRA : Factories of the Future 2020, 03 2013. URL https://www.effra.eu/sites/default/files/factories_of_the_future_2020_roadmap.pdf. Consulté le 24/10/2018.

Endeavor ROBOTICS : Endeavor robotics products, 2017. URL http://endeavorrobotics.com/products. Consulté le 24/10/2018.

Fanuc : Collaborative, safe and highly reliable, 2017. URL http://www.fanuc.eu/at/en/who-we-are/news/small-collaborative-robots. Consulté le 24/10/2018.

Fauroux, J.-C. , Bouzgarrou, B.-C. et Krid, M. : Unité robotique de transport de charges longues, 2014. PCT patent. IFMA. 23p.

Fauroux, J.-C. , Forlorou, M. , Bouzgarrou, B. C. et Chapelle, F. : Design and modeling of a mobile robot with an optimal obstacle-climbing mode. *In Proc. 2nd World Congress in Design and Modelling of Mechanical Systems, CMSM*, p. 19–21, 2007.

Feldmann, K. et Koch, M. : A mobile robot system for assembly operations at interior finishing. *In Proc. 15th International Symposium Automation and Robotics in Construction (Poppy, W*, p. 93–102, 1998.

Festo : Bioniccobot : Sensitive helper for human-robot collaboration, 2017. URL https://www.festo.com/group/en/cms/12746.htm. Consulté le 24/10/2018.

Freddi, A. , Longhi, S. , Monteriù, A. et Ortenzi, D. : Redundancy analysis of cooperative dual-arm manipulators. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13 (5):1729881416657754, 2016.

Fujii, M. , Inamura, W. , Murakami, H. , Tanaka, K. et Kosuge, K. : Cooperative control of multiple mobile robots transporting a single object with loose handling. *In Robotics and Biomimetics (ROBIO), International Conference on*, p. 816–822. IEEE, 2007.

Garcia, E. , Estremera, J. et De Santos, P. G. : A comparative study of stability margins for walking machines. *Robotica*, 20(6):595–606, 2002.

Gerkey, B. et Mataric, M. : Sold ! : Auction methods for multirobot coordination. *IEEE transactions on robotics and automation*, 18(5):758–768, 2002.

Gifford, C. : Review of selected mobile robot and robotic manipulator technologies. *Center of Remote Sensing of Ice Sheets, Technical report*, 2006.

Gogu, G. : Mobility of mechanisms : a critical review. *Mechanism and Machine Theory*, 40 (9):1068–1097, 2005.

Gogu, G. : *Structural Synthesis of Parallel Robots. Part 1 - Methodology*. Springer, 2008.

Gosselin, C. et Angeles, J. : Singularity analysis of closed-loop kinematic chains. *IEEE transactions on robotics and automation*, 6(3):281–290, 1990.

Gradetsky, V. , Rachkov, M. , Ulyanov, S. et Nandi, G. : Robots for cleaning and decontamination of building constructions. *In Proc. Eighth Int. Symp. Automat, and Robotics in Construction (ISARC). Fraunhofer Inst. Manuf. Eng. Autom*, vol. 1, 1991.

Grasser, F. , D'arrigo, A. , Colombi, S. et Rufer, A. : Joe : a mobile, inverted pendulum. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 49(1):107–114, 2002.

Grenzebach : Intralogistics - grenzebach maschinenbau gmbh, 2014. URL https://www.grenzebach.com/products-markets/intralogistics/. Consulté le 24/10/2018.

Groupe PSA : *PSA FActory of the future : Booster DAY, 2016*. Groupe PSA, 2016. Liste des défis.

Guizzo, E. : Three engineers, hundreds of robots, one warehouse. *Spectrum, IEEE*, 45 (7):26–34, 2008.

Hacikadiroglu, N. et Canidemir, E. : Transport device, nov. 6 2014. URL https://www.google.com/patents/US20140326521. US Patent App. 14/361,010. Consulté le 24/10/2018.

Haehnsen, E. : L'industrie 4.0 replace l'homme au centre des préoccupations, 2016. URL http://www.infoprotection.fr/SANTE-ET-SECURITE-AU-TRAVAIL/Article.htm?Zoom=421f2d9fa4e57919820007ddfbf56fdb. Consulté le 24/10/2018.

Halme, A. , Leppänen, I. , Salmi, S. et Ylönen, S. : Hybrid locomotion of a wheel-legged machine. *In 3rd Int. Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR'00)*, 2000.

Hartenberg, R. S. et Denavit, J. : *Kinematic synthesis of linkages*. McGraw-Hill, 1964.

Hekmatfar, T. , Masehian, E. et Mousavi, S. J. : Cooperative object transportation by multiple mobile manipulators through a hierarchical planning architecture. *In Robotics and Mechatronics (ICRoM), Second RSI/ISM International Conference on*, p. 503–508. IEEE, 2014.

Hichri, B. , Fauroux, J.-C. , Adouane, L. , Doroftei, I. et Mezouar, Y. : Lifting mechanism for payload transport by collaborative mobile robots. *In New Trends in Mechanism and Machine Science*, p. 157–165. Springer, 2015.

Hichri, B. , Fauroux, J.-C. , Adouane, L. , Mezouar, Y. et Doroftei, I. : Design of Collaborative, Cross and Carry mobile roBots C^3Bots. *Advanced Material Research*, 837:588–593, 2014.

Hirata, Y. , Kosuge, K. , Asama, H. , Kaetsu, H. et Kawabata, K. : Decentralized control of mobile robots in coordination. *In Control Applications, 1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on*, vol. 2, p. 1129–1134. IEEE, 1999.

Hirata, Y. , Kume, Y. , Wang, Z.-D. et Kosuge, K. : Handling of a single object by multiple mobile manipulators in cooperation with human based on virtual 3-D caster dynamics. *JSME International Journal Series C*, 48(4):613–619, 2005.

Hirata, Y. , Wang, Z. , Fukaya, K. et Kosuge, K. : Transporting an object by a passive mobile robot with servo brakes in cooperation with a human. *Advanced Robotics*, 23 (4):387–404, 2009.

Hirose, S. et Morishima, A. : Design and control of a mobile robot with an articulated body. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2):99–114, 1990.

HORSE : Home | HORSE, 2015. URL http://www.horse-project.eu/. Consulté le 24/10/2018.

Hu, B. , Yu, J. , Lu, Y. , Sui, C. et Han, J. : Statics and stiffness model of serial-parallel manipulator formed by k parallel manipulators connected in series. *Journal of Mechanisms and Robotics*, 4(2):021012, 2012.

Huang, L. , Lim, Y.-S. , Lee, D. et Teoh, C. : Design and analysis of a four-wheel omnidirectional mobile robot. *In 2nd International Conference of Autonomous Robots and Agents*, p. 425–428, 2004.

IFR : "International Federation of Robotics, Statistical Department, Executive Summary 2017", 2018. URL https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf. Consulté le 24/10/2018.

IFToMM : "IFToMM online dictionary", 2015. URL http://www.iftomm-terminology.antonkb.nl/1036/frames.html. Consulté le 24/10/2018.

Inglett, E. et Rodríguez-Seda, E. : Object transportation by cooperative robots. *In SoutheastCon, 2017*, p. 1–6. IEEE, 2017.

Institut Montaigne : Industrie du futur, prêts, partez !, 2018. URL https://www.institutmontaigne.org/ressources/pdfs/publications/industrie-du-futur-prets-partez-rapport_1.pdf. Rapport technique. Consulté le 24/10/2018.

IRSTEA : Présentation du projet Adap2e, 2017. URL https://adap2e.irstea.fr/presentation-du-projet/. Consulté le 24/10/2018.

J'automatise News : Normalisation : Des normes vont encadrer la robotique collaborative, 2017. URL http://www.jautomatise.com/article-pdf?fichier=j109_12-13. Consulté le 24/10/2018.

Jones, D. R. et Stol, K. A. : Modelling and stability control of two-wheeled robots in low-traction environments. *In Australasian Conference on Robotics and Automation, Brisbane, Australia*. Citeseer, 2010.

Jones, J. : Robots at the tipping point : the road to iRobot Roomba. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 13(1):76–78, 2006.

Khatib, O. : Mobile manipulation : The robotic assistant. *Robotics and Autonomous Systems*, 26(2):175–183, 1999.

Kim, W. , Lee, S.-E. et Yi, B.-J. : Mobility analysis of planar mobile robots. *In Robotics and Automation, ICRA'02. IEEE International Conference on*, vol. 3, p. 2861–2867. IEEE, 2002.

Kim, Y. , Kim, S. H. et Kwak, Y. K. : Dynamic analysis of a nonholonomic two-wheeled inverted pendulum robot. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 44(1):25–46, 2005.

Kostavelis, I. et Gasteratos, A. : Robots in crisis management : A survey. *In International Conference on Information Systems for Crisis Response and Management in Mediterranean Countries*, p. 43–56. Springer, 2017.

Kosuge, K. et Oosumi, T. : Decentralized control of multiple robots handling an object. *In Intelligent Robots and Systems' 96, IROS 96, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 1, p. 318–323. IEEE, 1996.

Krid, M. , Fauroux, J.-C. et Bouzgarrou, B.-C. : Modular cooperative mobile robots for ventral long payload transport and obstacle crossing. *In New Trends in Mechanism and Machine Science*, p. 211–219. Springer, 2015.

Kuka : KMR QUANTEC - KUKA AG, 2017. URL https://www.kuka.com/en-de/products/mobility/mobile-robots/kmr-quantec. Consulté le 24/10/2018.

Kumar, V. : Introduction to robot geometry and kinematics. *Penn Engineering*, 2002.

Kume, Y. , Hirata, Y. , Wang, Z.-D. et Kosuge, K. : Decentralized control of multiple mobile manipulators handling a single object in coordination. *In Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, vol. 3, p. 2758–2763. IEEE, 2002.

Laneurit, J. , Chapuis, R. et Debain, C. : Trackbod, an accurate, robust and low cost system for mobile robot person following. october 2016.

Larousse : "définitions : robot - dictionnaire de français larousse", 2017. URL http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/robot/69647?q=robot. Consulté le 24/10/2018.

Lee, G. H. et Jung, S. : Line tracking control of a two-wheeled mobile robot using visual feedback. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 10(3):177, 2013.

Li, Z. , Ge, S. S. et Ming, A. : Adaptive robust motion/force control of holonomic-constrained nonholonomic mobile manipulators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 37(3):607–616, 2007.

Lim, S. et Teo, J. : Recent advances on locomotion mechanisms of hybrid mobile robots. *WSEAS Transactions on Systems*, p. 11–25, 2015.

Lopez, F. G. , Abbenseth, J. , Henkel, C. et Dörr, S. : A predictive online path planning and optimization approach for cooperative mobile service robot navigation in industrial applications. 2017.

Mannheim, T. , Riedel, M. , Hüsing, M. et Corves, B. : A new way of grasping : PARAGRIP - the fusion of gripper and robot. *Grasping in Robotics*, p. 433–464, 2013.

Manoochehri, S. et Seireg, A. : A computer-based methodology for the form synthesis and optimal design of robot manipulators. *Journal of Mechanical Design*, 112(4):501–508, 1990.

Marino, A. : Distributed adaptive control of networked cooperative mobile manipulators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2017.

Mashali, M. : Kinematic control of redundant mobile manipulators, 2015.

Morange, C. et Engelmann, H. : Forum recherche & developpement pour l'innovation, 2007. Dossier de presse.

Nenchev, D. : Redundancy resolution through local optimization : A review. *Journal of robotic systems*, 6(6):769–798, 1989.

NeoBotix : "Mobile Manipulator "MM-500"", 2015. URL http://www.neobotix-robots.com/mobile-manipulator-mm-500.html. Consulté le 24/10/2018.

NORCAN : Documentation technique, 2018. URL http://files.mynorcan.com/norcan/norcan_doctec_profiles-aluminium_fr.pdf. Consulté le 24/10/2018.

NORCAN Sherpa : Robot collaboratif d'assistance à la manutention et à la préparation de commandes, 2018. URL http://files.mynorcan.com/norcan/norcan_sherpa_fr.pdf. Consulté le 24/10/2018.

Omron-Adept : Quattro 650H/650HS/800H/800HS User's Guide, 2017. URL https://assets.omron.eu/downloads/manual/en/v1/i597_quattro_650h,_650hs,_800h,_800hs_users_manual_en.pdf. Consulté le 24/10/2018.

Omron-Adept Mobile Robots : "Research Robots Specifications - Summary Comparison", 2015. URL http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/ResearchMatrix.aspx. Consulté le 24/10/2018.

Ortigoza, R. S. , Marcelino-Aranda, M. , Ortigoza, G. S. , Guzman, V. M. H. , Molina-Vilchis, M. A. , Saldana-Gonzalez, G. , Herrera-Lozada, J. C. et Olguin-Carbajal, M. : Wheeled mobile robots : a review. *IEEE Latin America Transactions*, 10 (6):2209–2217, 2012.

Osumi, H. : Cooperative strategy for multiple mobile manipulators. *In Intelligent Robots and Systems (IROS), International Conference on*, vol. 2, p. 554–559. IEEE/RSJ, 1996.

Padois, V. , Fourquet, J.-Y. , Chiron, P. et Renaud, M. : On contact transition for nonholonomic mobile manipulators. *In Experimental Robotics IX*, p. 207–216. Springer, 2006.

Pagis, G. , Bouton, N. , Briot, S. et Martinet, P. : Enlarging parallel robot workspace through type-2 singularity crossing. *Control Engineering Practice*, 39:1–11, 2015.

PaintUP : PaintUP, 2017. URL http://www.paintup.fr/. Consulté le 24/10/2018.

Paul, R. : *Robot manipulators : mathematics, programming, and control : the computer control of robot manipulators*. Richard Paul, 1981.

Pott, A. , Mütherich, H. , Kraus, W. , Schmidt, V. , Miermeister, P. et Verl, A. : IPAnema : a family of cable-driven parallel robots for industrial applications. *In Cable-Driven Parallel Robots*, p. 119–134. Springer, 2013.

Pratt, G. et Manzo, J. : The darpa robotics challenge [competitions]. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 20(2):10–12, 2013.

Rethink Robotics : "Baxter Collaborative Robots for Industrial Automation | Rethink Robotics", 2014. URL http://www.rethinkrobotics.com/baxter/. Consulté le 24/10/2018.

Rethink Robotics : "Sawyer Collaborative Robots for Industrial Automation | Rethink Robotics", 2017. URL http://www.rethinkrobotics.com/sawyer/. Consulté le 24/10/2018.

Roston, G. et Endsley, E. : Transformable mobile robot, 2000. URL https://www.google.com/patents/US6068073. US Patent 6,068,073. Consulté le 24/10/2018.

Schenker, P. , Huntsberger, T. , Pirjanian, P. , Baumgartner, E. et Tunstel, E. : Planetary rover developments supporting mars exploration, sample return and future human-robotic colonization. *Autonomous Robots*, 14(2):103–126, 2003.

Smith, C. , Karayiannidis, Y. , Nalpantidis, L. , Gratal, X. , Qi, P. , Dimarogonas, D. et Kragic, D. : Dual arm manipulation—a survey. *Robotics and Autonomous Systems*, 60(10):1340–1353, 2012.

Spong, M. , Hutchinson, S. et Vidyasagar, M. : *Robot modeling and control*, vol. 3. Wiley New York, 2006.

Stroupe, A. , Okon, A. , Robinson, M. , Huntsberger, T. , Aghazarian, H. et Baumgartner, E. : Sustainable cooperative robotic technologies for human and robotic outpost infrastructure construction and maintenance. *Autonomous Robots*, 20(2):113–123, 2006.

Sugar, T. et Kumar, V. : Control and coordination of multiple mobile robots in manipulation and material handling tasks. *In Experimental Robotics VI*, p. 15–24. Springer, 2000.

Sugar, T. et Kumar, V. : Control of cooperating mobile manipulators. *IEEE Transactions on robotics and automation*, 18(1):94–103, 2002.

Sugawara, T. , Tomokuni, N. , Lee, J. H. , Tomizawa, T. , Ohara, K. , Kim, B. K. et Ohba, K. : Development of ubiquitous mobile manipulator system with RT-middleware. *In Control, Automation and Systems (ICCAS), International Conference on*, p. 2473–2476. IEEE, 2007.

Takubo, T. , Arai, H. , Hayashibara, Y. et Tanie, K. : Human-robot cooperative manipulation using a virtual nonholonomic constraint. *The International Journal of Robotics Research*, 21(5-6):541–553, 2002.

Tang, C. P. , Bhatt, R. et Krovi, V. : Decentralized kinematic control of payload by a system of mobile manipulators. *In Robotics and Automation (ICRA), International Conference on*, vol. 3, p. 2462–2467. IEEE, 2004.

Tanner, H. , Loizou, S. et Kyriakopoulos, K. : Nonholonomic navigation and control of cooperating mobile manipulators. *Robotics and Automation, Transactions on*, 19(1):53–64, 2003.

Tesch, M. , Lipkin, K. , Brown, I. , Hatton, R. , Peck, A. , Rembisz, J. et Choset, H. : Parameterized and scripted gaits for modular snake robots. *Advanced Robotics*, 23 (9):1131–1158, 2009.

Thuilot, B. : *Contribution à la modélisation et à la commande de robots mobiles à roues*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1995.

Tobe, F. : 42 companies empowering robots and humans to work side-by-side, Mars 2017. URL https://www.therobotreport.com/42-companies-empowering-robots-and-humans-to-work-side-by-side/. Consulté le 24/10/2018.

Tzafestas, S. : *Introduction to mobile robot control*. Elsevier, 2013.

Universal Robots : "Bras robotique industriel collaboratif UR10 - Charge allant jusqu'à 10kg", 2018. URL https://www.universal-robots.com/fr/produits/robot-ur10/. Consulté le 24/10/2018.

Vieira, F. , Medeiros, A. , Alsina, P. et Araújo Jr, A. : Position and orientation control of a two-wheeled differentially driven nonholonomic mobile robot. *In International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, p. 256–262, 2004.

Ward, G. : New mechanical and robotic harvesting technologies to increase fruit production efficiency, 2003. Rapport de projet.

Warren, S. et Artemiadis, P. : Bio-inspired robot control for human-robot bimanual manipulation. *In ASME 2013 Dynamic Systems and Control Conference*, p. V003T45A001–V003T45A001. American Society of Mechanical Engineers, 2013.

Whitney, D. : Resolved motion rate control of manipulators and human prostheses. *IEEE Transactions on man-machine systems*, 10(2):47–53, 1969.

Whitney, D. : The mathematics of coordinated control of prosthetic arms and manipulators. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 94(4):303–309, 1972.

Wong, J. Y. : *Theory of ground vehicles*. John Wiley & Sons, 2008. ISBN 0471354619.

Wright, C. , Buchan, A. , Brown, B. , Geist, J. , Schwerin, M. , Rollinson, D. , Tesch, M. et Choset, H. : Design and architecture of the unified modular snake robot. *In Robotics and Automation (ICRA), 2012 IEEE International Conference on*, p. 4347–4354. IEEE, 2012.

Yang, H. et Lee, D. : Cooperative grasping control of multiple mobile manipulators with obstacle avoidance. *In Robotics and Automation (ICRA), International Conference on*, p. 836–841. IEEE, 2013.

Annexe A

Calculs des connectivités des parties locomotions

Sommaire

A.1 Connectivité du m-bot en locomotion avec deux contacts au sol . . 144
A.1.1 Différentes possibilités d'écriture des bases (R_l^i) 144
A.1.2 Intersection des connectivités des jambes simples l_{11} et l_{12} 145

Cette annexe présente la méthode de calcul de connectivité des chaînes de locomotion des m-bots et des p-bots. En fait, et comme présenté dans la section 2.4.3.1, le calcul de la connectivité des bases mobile S_F nécessite l'écriture de toutes les bases possibles des espaces vectoriels des vitesses relatives de chaque jambe G_i (i étant le nombre de jambes dans le mécanisme parallèle représentant la chaîne de locomotion du m-bot ou du p-bot). Ainsi, pour chaque configuration considérée de m-bot ou de p-bot, le calcul de la connectivité de la chaîne cinématique de locomotion doit être réalisé.

A.1 Connectivité du m-bot en locomotion avec deux contacts au sol

La chaîne cinématique qui représente ce système de locomotion l_1 est présentée à la figure A.1. Sa connectivité est calculée à partir de l'équation 2.6. Afin de l'évaluer, il faut écrire toutes les bases possibles pour les jambes l_{11} et l_{12}. Ces bases ont été présentées dans la table 2.2 et leur méthode de calcul est présentée ci-après.

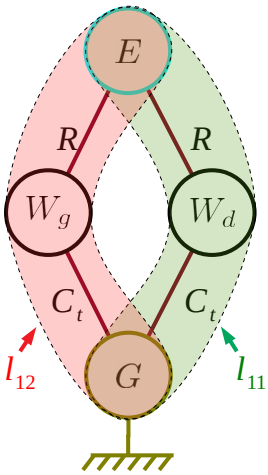


FIGURE A.1 – Chaîne cinématique de locomotion l_1 avec deux contacts au sol

A.1.1 Différentes possibilités d'écriture des bases (R_l^i)

L'espace vectoriel des déplacements des jambes identiques l_{11} ou l_{12} est noté $R_{l_{11}} = R_{l_{12}} = R_l$. Il est composé des espaces vectoriels des liaisons qui composent la jambe, c'est-à-dire la liaison C_t pour le contact roue-sol et la liaison pivot R_y. Ainsi, la base de l'espace vectoriel d'une jambe est :

$$(R_l^1) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z) \tag{A.1}$$

Elle est obtenue à partir des bases de l'espace vectoriel des déplacements de la liaison roue-sol, R_{C_t}, et des bases des déplacements possibles de la liaison pivot R_y. Pour la liaison roue-sol, la première base possible est $(R_{C_t}^1) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$. Les autres bases sont générées de façon à respecter l'équation 2.5, et en considérant qu'une vitesse angulaire peut générer une vitesse rectiligne. Par conséquent, les bases génératrices possibles pour R_{C_t} sont :

- $(R_{C_t}^1) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$
- $(R_{C_t}^2) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{v}_y)$ en remplaçant $\boldsymbol{\omega}_z$ par $\boldsymbol{v}_y$ dans $(R_{C_t}^1)$.
- $(R_{C_t}^3) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{v}_y)$ en remplaçant $\boldsymbol{\omega}_x$ par $\boldsymbol{v}_z$ dans $(R_{C_t}^2)$.
- $(R_{C_t}^4) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$ en remplaçant $\boldsymbol{\omega}_x$ par $\boldsymbol{v}_y$ dans $(R_{C_t}^1)$.
- $(R_{C_t}^5) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z)$ en remplaçant $\boldsymbol{\omega}_x$ par $\boldsymbol{v}_z$ dans $(R_{C_t}^1)$.

Ce sont les seules combinaisons qui respectent l'équation 2.5. De même pour l'espace vectoriel de la liaison pivot, où deux bases sont possibles : $(R_y^1) = (\boldsymbol{\omega}_y)$ et $(R_y^2) = (\boldsymbol{v}_z)$. Finalement, les combinaisons possibles des bases présentées dessus génèrent les bases possibles pour R_l qui sont présentées dans la table A.1.

(R_{R_y})	(R_{C_t})	(R_l^i)
$(\boldsymbol{\omega}_y)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_l^1) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(\boldsymbol{\omega}_y)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x)$	$(R_l^2) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_y)$
$(\boldsymbol{\omega}_y)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z)$	$(R_l^3) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y)$
$(\boldsymbol{\omega}_y)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_l^4) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(\boldsymbol{\omega}_y)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_l^5) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(\boldsymbol{v}_z)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_l^6) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x, \boldsymbol{\omega}_z)$
$(\boldsymbol{v}_z)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_x)$	$(R_l^7) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_x)$
$(\boldsymbol{v}_z)$	$(\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_l^8) = (\boldsymbol{v}_x, \boldsymbol{v}_y, \boldsymbol{v}_z, \boldsymbol{\omega}_z)$

TABLE A.1 – Résultat de calcul des différentes bases (R_l^i)

A.1.2 Intersection des connectivités des jambes simples l_{11} et l_{12}

Après l'obtention des (R_l^i), la suite du calcul impose de réaliser toutes les intersections possibles pour avoir le minimum de la connectivité S_{l_1}. Le résultat de ces intersections (R_{l_1}), ainsi que la connectivité S_{l_1} de la chaîne cinématique de locomotion l_1 sont présentés dans la table A.2.

En conséquence, la connectivité de chaîne cinématique de locomotion l_1 est :

$$S_{l_1} = 2 \tag{A.2}$$

Les combinaisons qui donnent cette connectivité sont les bases de la chaîne de locomotion l_1 sauf celles qui présentent la vitesse $\boldsymbol{\omega}_x$: elles représentent le contact maintenu de la roue avec le sol, condition nécessaire pour la locomotion des m-bots. Finalement, les bases possibles de la chaîne cinématique de locomotion l_1 sont présentées dans la table A.3.

	$(R_{l_{11}})$	$(R_{l_{12}})$	(R_{l_1})	(S_{l_1})
1	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	4
2	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	4
3	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	4
4	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	4
5	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	4
6	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	4
7	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	4
8	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	4
9	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	(v_y, v_y, v_z)	3
10	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	(v_z, v_y, v_z)	3
11	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$(\omega_x, v_y, \omega_x)$	3
12	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	(v_x, v_z, ω_x)	3
13	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	(v_x, v_y, v_z)	3
14	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	(v_x, v_y, ω_y)	3
15	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_y, ω_y)	3
16	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_z, ω_y)	3
17	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_y, ω_z)	3
18	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	(v_x, v_z, ω_z)	3
19	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_z, ω_z)	3
20	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_y, ω_y)	3
21	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y)$	3
22	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_y, \omega_z)$	3
23	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_y, \omega_z)$	3
24	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_z, ω_z)	3
25	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_z)$	3
26	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, \omega_y, \omega_z)$	3
27	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_y)	2
28	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, v_z)	2
29	$(v_x, v_y, v_z, \omega_x)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, ω_x)	2
30	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	(v_x, v_z)	2
31	$(v_x, v_y, v_z, \omega_y)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, ω_y)	2
32	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	(v_x, v_y)	2
33	$(v_x, v_y, v_z, \omega_z)$	$(v_x, \omega_x, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, ω_z)	2
34	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	(v_x, ω_x)	2
35	$(v_x, v_y, \omega_x, \omega_y)$	$(v_x, v_z, \omega_y, \omega_z)$	(v_x, ω_y)	2
36	$(v_x, v_y, \omega_y, \omega_z)$	$(v_x, v_z, \omega_x, \omega_z)$	(v_x, ω_z)	2

TABLE A.2 – Intersection des (R_G) de la locomotion $l1$ et la connectivité résultante

$(R_{l_1})_1 = (v_x, \boldsymbol{\omega}_y)$	$(R_{l_1})_3 = (v_x, v_z)$
$(R_{l_1})_2 = (v_x, \boldsymbol{\omega}_z)$	$(R_{l_1})_4 = (v_x, v_y)$

TABLE A.3 – Différentes possibilités d'écritures des bases (R_{l_1})

Remarques :

- Les mouvements de chaque jambe de la chaîne cinématique sont exprimés par les vitesses angulaires et rectilignes. Cette utilisation est due à la propriété distributive des vitesses, qui n'est pas le cas pour les déplacements finis.

- Les vitesses angulaires génèrent deux vitesses de translation dépendantes dans le plan perpendiculaire. Le contraire n'est pas vrai, c'est-à-dire qu'une vitesse linéaire ne génère par de combinaison de vitesses en rotation dans le plan perpendiculaire.

Annexe B

Énumération combinatoire des chaînes cinématiques de manipulation

Sommaire

B.1 Chaînes cinématiques de manipulation à deux liaisons 150
B.2 Chaînes cinématiques de manipulation à trois liaisons 151
B.3 Chaînes cinématiques de manipulation à quatre liaisons 154

Cette annexe présente les résultats de la méthode conventionnelle de synthèse structurale basée sur l'énumération combinatoire des solutions. La méthode consiste à énumérer toutes les solutions possibles pour la partie manipulation. Celle-ci est une chaîne cinématique ouverte avec deux à quatre liaisons simples. Chaque liaison peut être une liaison pivot R ou prismatique P d'axe du repère global $R_G(\vec{x_G}, \vec{y_G}, \vec{z_G})$. De ce fait, pour chaque nombre de liaisons (2, 3 ou 4), une énumération doit être réalisée.

B.1 Chaînes cinématiques de manipulation à deux liaisons

Les liaisons qui vont former la chaîne cinématique seront présentées sous forme de vecteur dans $[L^2_{manip}]_i = [L_1, L_2]$ avec $i = 1, ..., 36$. Le résultat de l'énumération combinatoire est présenté dans le tableau suivant :

L_1	L_2	$[L^2_{manip}]$
P_x	P_x	$[L^2_{manip}]_1 = [P_x, P_x]$
P_x	P_y	$[L^2_{manip}]_2 = [P_x, P_y]$
P_x	P_z	$[L^2_{manip}]_3 = [P_x, P_z]$
P_x	R_x	$[L^2_{manip}]_4 = [P_x, R_x]$
P_x	R_y	$[L^2_{manip}]_5 = [P_x, R_y]$
P_x	R_z	$[L^2_{manip}]_6 = [P_x, R_z]$
P_y	P_x	$[L^2_{manip}]_7 = [P_x, P_y]$
P_y	P_y	$[L^2_{manip}]_8 = [P_y, P_y]$
P_y	P_z	$[L^2_{manip}]_9 = [P_y, P_z]$
P_y	R_x	$[L^2_{manip}]_{10} = [P_y, R_x]$
P_y	R_y	$[L^2_{manip}]_{11} = [P_y, R_y]$
P_y	R_z	$[L^2_{manip}]_{12} = [P_y, R_z]$
P_z	P_x	$[L^2_{manip}]_{13} = [P_x, P_z]$
P_z	P_y	$[L^2_{manip}]_{14} = [P_y, P_z]$
P_z	P_z	$[L^2_{manip}]_{15} = [P_z, P_z]$
P_z	R_x	$[L^2_{manip}]_{16} = [P_z, R_x]$
P_z	R_y	$[L^2_{manip}]_{17} = [P_z, R_y]$
P_z	R_z	$[L^2_{manip}]_{18} = [P_z, R_z]$
R_x	P_x	$[L^2_{manip}]_{19} = [P_x, R_x]$
R_x	P_y	$[L^2_{manip}]_{20} = [P_y, R_x]$
R_x	P_z	$[L^2_{manip}]_{21} = [P_z, R_x]$
R_x	R_x	$[L^2_{manip}]_{22} = [R_x, R_x]$
R_x	R_y	$[L^2_{manip}]_{23} = [R_x, R_y]$
R_x	R_z	$[L^2_{manip}]_{24} = [R_x, R_z]$
R_y	P_x	$[L^2_{manip}]_{25} = [P_x, R_y]$
R_y	P_y	$[L^2_{manip}]_{26} = [P_y, R_y]$
R_y	P_z	$[L^2_{manip}]_{27} = [P_z, R_y,]$
R_y	R_x	$[L^2_{manip}]_{28} = [R_x, R_y]$
R_y	R_y	$[L^2_{manip}]_{29} = [R_y, R_y]$
R_y	R_z	$[L^2_{manip}]_{30} = [R_y, R_z]$
		Suite page suivante ...

Suite ...		
L_1	L_2	$[L^2_{manip}]$
R_z	P_x	$[L^2_{manip}]_{31} = [P_x, R_z]$
R_z	P_y	$[L^2_{manip}]_{32} = [P_y, R_z]$
R_z	P_z	$[L^2_{manip}]_{33} = [P_z, R_z]$
R_z	R_x	$[L^2_{manip}]_{34} = [R_x, R_z]$
R_z	R_y	$[L^2_{manip}]_{35} = [R_y, R_z]$
R_z	R_z	$[L^2_{manip}]_{36} = [R_z, R_z]$

TABLE B.1 – Chaînes cinématiques de manipulation à deux liaisons

B.2 Chaînes cinématiques de manipulation à trois liaisons

Comme pour le cas précédent, les liaisons qui vont construire la partie manipulation du m-bot $[L^3_{manip}]_j = [L_1, L_2, L_3]$, avec $j = 1, ..., 216$. La moitié du résultat de l'énumération combinatoire (108 solutions) est présentée dans le tableau suivant :

L_1	L_2	L_3	$[L^3_{manip}]$
P_x	P_x	P_x	$[L^3_{manip}]_1 = [P_x, P_x, P_x]$
P_x	P_x	P_y	$[L^3_{manip}]_2 = [P_x, P_x, P_y]$
P_x	P_x	P_z	$[L^3_{manip}]_3 = [P_x, P_x, P_z]$
P_x	P_x	R_x	$[L^3_{manip}]_4 = [P_x, P_x, R_x]$
P_x	P_x	R_y	$[L^3_{manip}]_5 = [P_x, P_x, R_y]$
P_x	P_x	R_z	$[L^3_{manip}]_6 = [P_x, P_x, R_z]$
P_x	P_y	P_x	$[L^3_{manip}]_7 = [P_x, P_y, P_x]$
P_x	P_y	P_y	$[L^3_{manip}]_8 = [P_x, P_y, P_y]$
P_x	P_y	P_z	$[L^3_{manip}]_9 = [P_x, P_y, P_z]$
P_x	P_y	R_x	$[L^3_{manip}]_{10} = [P_x, P_y, R_x]$
P_x	P_y	R_y	$[L^3_{manip}]_{11} = [P_x, P_y, R_y]$
P_x	P_y	R_z	$[L^3_{manip}]_{12} = [P_x, P_y, R_z]$
P_x	P_z	P_x	$[L^3_{manip}]_{13} = [P_x, P_z, P_x]$
P_x	P_z	P_y	$[L^3_{manip}]_{14} = [P_x, P_z, P_y]$
P_x	P_z	P_z	$[L^3_{manip}]_{15} = [P_x, P_z, P_z]$
P_x	P_z	R_x	$[L^3_{manip}]_{16} = [P_x, P_z, R_x]$
P_x	P_z	R_y	$[L^3_{manip}]_{17} = [P_x, P_z, R_y]$
P_x	P_z	R_z	$[L^3_{manip}]_{18} = [P_x, P_z, R_z]$
P_x	R_x	P_x	$[L^3_{manip}]_{19} = [P_x, R_x, P_x]$
			Suite page suivante ...

Suite ...

L_1	L_2	L_3	$[L^3_{manip}]$
P_x	R_x	P_y	$[L^3_{manip}]_{20} = [P_x, R_x, P_y]$
P_x	R_x	P_z	$[L^3_{manip}]_{21} = [P_x, R_x, P_z]$
P_x	R_x	R_x	$[L^3_{manip}]_{22} = [P_x, R_x, R_x]$
P_x	R_x	R_y	$[L^3_{manip}]_{23} = [P_x, R_x, R_y]$
P_x	R_x	R_z	$[L^3_{manip}]_{24} = [P_x, R_x, R_z]$
P_x	R_y	P_x	$[L^3_{manip}]_{25} = [P_x, R_y, P_x]$
P_x	R_y	P_y	$[L^3_{manip}]_{26} = [P_x, R_y, P_y]$
P_x	R_y	P_z	$[L^3_{manip}]_{27} = [P_x, R_y, P_z]$
P_x	R_y	R_x	$[L^3_{manip}]_{28} = [P_x, R_y, R_x]$
P_x	R_y	R_y	$[L^3_{manip}]_{29} = [P_x, R_y, R_y]$
P_x	R_y	R_z	$[L^3_{manip}]_{30} = [P_x, R_y, R_z]$
P_x	R_z	P_x	$[L^3_{manip}]_{31} = [P_x, R_z, P_x]$
P_x	R_z	P_y	$[L^3_{manip}]_{32} = [P_x, R_z, P_y]$
P_x	R_z	P_z	$[L^3_{manip}]_{33} = [P_x, R_z, P_z]$
P_x	R_z	R_x	$[L^3_{manip}]_{34} = [P_x, R_z, R_x]$
P_x	R_z	R_y	$[L^3_{manip}]_{35} = [P_x, R_z, R_y]$
P_x	R_z	R_z	$[L^3_{manip}]_{36} = [P_x, R_z, R_z]$
P_y	P_x	P_x	$[L^3_{manip}]_{37} = [P_y, P_x, P_x]$
P_y	P_x	P_y	$[L^3_{manip}]_{38} = [P_y, P_x, P_y]$
P_y	P_x	P_z	$[L^3_{manip}]_{39} = [P_y, P_x, P_z]$
P_y	P_x	R_x	$[L^3_{manip}]_{40} = [P_y, P_x, R_x]$
P_y	P_x	R_y	$[L^3_{manip}]_{41} = [P_y, P_x, R_y]$
P_y	P_x	R_z	$[L^3_{manip}]_{42} = [P_y, P_x, R_z]$
P_y	P_y	P_x	$[L^3_{manip}]_{43} = [P_y, P_y, P_x]$
P_y	P_y	P_y	$[L^3_{manip}]_{44} = [P_y, P_y, P_y]$
P_y	P_y	P_z	$[L^3_{manip}]_{45} = [P_y, P_y, P_z]$
P_y	P_y	R_x	$[L^3_{manip}]_{46} = [P_y, P_y, R_x]$
P_y	P_y	R_y	$[L^3_{manip}]_{47} = [P_y, P_y, R_y]$
P_y	P_y	R_z	$[L^3_{manip}]_{48} = [P_y, P_y, R_z]$
P_y	P_z	P_x	$[L^3_{manip}]_{49} = [P_y, P_z, P_x]$
P_y	P_z	P_y	$[L^3_{manip}]_{50} = [P_y, P_z, P_y]$
P_y	P_z	P_z	$[L^3_{manip}]_{51} = [P_y, P_z, P_z]$
P_y	P_z	R_x	$[L^3_{manip}]_{52} = [P_y, P_z, R_x]$
P_y	P_z	R_y	$[L^3_{manip}]_{53} = [P_y, P_z, R_y]$
P_y	P_z	R_z	$[L^3_{manip}]_{54} = [P_y, P_z, R_z]$
P_y	R_x	P_x	$[L^3_{manip}]_{55} = [P_y, R_x, P_x]$

Suite page suivante ...

Suite ...

L_1	L_2	L_3	$[L^3_{manip}]$
P_y	R_x	P_y	$[L^3_{manip}]_{56} = [P_y, R_x, P_y]$
P_y	R_x	P_z	$[L^3_{manip}]_{57} = [P_y, R_x, P_z]$
P_y	R_x	R_x	$[L^3_{manip}]_{58} = [P_y, R_x, R_x]$
P_y	R_x	R_y	$[L^3_{manip}]_{59} = [P_y, R_x, R_y]$
P_y	R_x	R_z	$[L^3_{manip}]_{60} = [P_y, R_x, R_z]$
P_y	R_y	P_x	$[L^3_{manip}]_{61} = [P_y, R_y, P_x]$
P_y	R_y	P_y	$[L^3_{manip}]_{62} = [P_y, R_y, P_y]$
P_y	R_y	P_z	$[L^3_{manip}]_{63} = [P_y, R_y, P_z]$
P_y	R_y	R_x	$[L^3_{manip}]_{64} = [P_y, R_y, R_x]$
P_y	R_y	R_y	$[L^3_{manip}]_{65} = [P_y, R_y, R_y]$
P_y	R_y	R_z	$[L^3_{manip}]_{66} = [P_y, R_y, R_z]$
P_y	R_z	P_x	$[L^3_{manip}]_{67} = [P_y, R_z, P_x]$
P_y	R_z	P_y	$[L^3_{manip}]_{68} = [P_y, R_z, P_y]$
P_y	R_z	P_z	$[L^3_{manip}]_{69} = [P_y, R_z, P_z]$
P_y	R_z	R_x	$[L^3_{manip}]_{70} = [P_y, R_z, R_x]$
P_y	R_z	R_y	$[L^3_{manip}]_{71} = [P_y, R_z, R_y]$
P_y	R_z	R_z	$[L^3_{manip}]_{72} = [P_y, R_z, R_z]$
P_z	P_x	P_x	$[L^3_{manip}]_{73} = [P_z, P_x, P_x]$
P_z	P_x	P_y	$[L^3_{manip}]_{74} = [P_z, P_x, P_y]$
P_z	P_x	P_z	$[L^3_{manip}]_{75} = [P_z, P_x, P_z]$
P_z	P_x	R_x	$[L^3_{manip}]_{76} = [P_z, P_x, R_x]$
P_z	P_x	R_y	$[L^3_{manip}]_{77} = [P_z, P_x, R_y]$
P_z	P_x	R_z	$[L^3_{manip}]_{78} = [P_z, P_x, R_z]$
P_z	P_y	P_x	$[L^3_{manip}]_{79} = [P_z, P_y, P_x]$
P_z	P_y	P_y	$[L^3_{manip}]_{80} = [P_z, P_y, P_y]$
P_z	P_y	P_z	$[L^3_{manip}]_{81} = [P_z, P_y, P_z]$
P_z	P_y	R_x	$[L^3_{manip}]_{82} = [P_z, P_y, R_x]$
P_z	P_y	R_y	$[L^3_{manip}]_{83} = [P_z, P_y, R_y]$
P_z	P_y	R_z	$[L^3_{manip}]_{84} = [P_z, P_y, R_z]$
P_z	P_z	P_x	$[L^3_{manip}]_{85} = [P_z, P_z, P_x]$
P_z	P_z	P_y	$[L^3_{manip}]_{86} = [P_z, P_z, P_y]$
P_z	P_z	P_z	$[L^3_{manip}]_{87} = [P_z, P_z, P_z]$
P_z	P_z	R_x	$[L^3_{manip}]_{88} = [P_z, P_z, R_x]$
P_z	P_z	R_y	$[L^3_{manip}]_{89} = [P_z, P_z, R_y]$
P_z	P_z	R_z	$[L^3_{manip}]_{90} = [P_z, P_z, R_z]$
P_z	R_x	P_x	$[L^3_{manip}]_{91} = [P_z, R_x, P_x]$

Suite page suivante ...

Suite ...			
L_1	L_2	L_3	$[L^3_{manip}]$
P_z	R_x	P_y	$[L^3_{manip}]_{92} = [P_z, R_x, P_y]$
P_z	R_x	P_z	$[L^3_{manip}]_{93} = [P_z, R_x, P_z]$
P_z	R_x	R_x	$[L^3_{manip}]_{94} = [P_z, R_x, R_x]$
P_z	R_x	R_y	$[L^3_{manip}]_{95} = [P_z, R_x, R_y]$
P_z	R_x	R_z	$[L^3_{manip}]_{96} = [P_z, R_x, R_z]$
P_z	R_y	P_x	$[L^3_{manip}]_{97} = [P_z, R_y, P_x]$
P_z	R_y	P_y	$[L^3_{manip}]_{98} = [P_z, R_y, P_y]$
P_z	R_y	P_z	$[L^3_{manip}]_{99} = [P_z, R_y, P_z]$
P_z	R_y	R_x	$[L^3_{manip}]_{100} = [P_z, R_y, R_x]$
P_z	R_y	R_y	$[L^3_{manip}]_{101} = [P_z, R_y, R_y]$
P_z	R_y	R_z	$[L^3_{manip}]_{102} = [P_z, R_y, R_z]$
P_z	R_z	P_x	$[L^3_{manip}]_{103} = [P_z, R_z, P_x]$
P_z	R_z	P_y	$[L^3_{manip}]_{104} = [P_z, R_z, P_y]$
P_z	R_z	P_z	$[L^3_{manip}]_{105} = [P_z, R_z, P_z]$
P_z	R_z	R_x	$[L^3_{manip}]_{106} = [P_z, R_z, R_x]$
P_z	R_z	R_y	$[L^3_{manip}]_{107} = [P_z, R_z, R_y]$
P_z	R_z	R_z	$[L^3_{manip}]_{108} = [P_z, R_z, R_z]$

TABLE B.2 – Chaînes cinématiques de manipulation à trois liaisons (moitié des solutions)

B.3 Chaînes cinématiques de manipulation à quatre liaisons

Comme dans les deux cas précédents, les chaînes cinématiques sont issues de la même démarche d'énumération combinatoire. Le nombre de solutions possibles s'élève à 1296 combinaisons.

En résumé, cette méthode de synthèse structurale de la partie manipulation donne :

- 36 cas possibles pour les chaînes cinématiques à deux liaisons simples.
- 216 cas possibles pour les chaînes cinématiques à trois liaisons simples.
- 1296 cas possibles pour les chaînes cinématiques à quatre liaisons simples.

Pour chacune de ces 1548 cas, il faut en premier déterminer la base de l'espace vectoriel des vitesses permises par la partie manipulation (R_{manip}), ensuite détecter les connectivités communes avec la partie locomotion S_{com}, pour finalement calculer les paramètres structuraux des m-bots résultants et les comparer aux contraintes exigées sur ces paramètres.

Annexe C

Modélisation des manipulateurs mobiles

Sommaire

C.1 Matrices de transformation de la partie manipulation 156
C.2 Modélisation géométrique d'un robot 3R plan 156
C.2.1 MGD 156
C.2.2 MGI 157
C.2.3 Matrice Jacobienne J 159

Cette annexe présente les différents calculs relatifs à la modélisation des m-bots et p-bots. Ainsi, la première partie sera consacrée à la présentation des différentes matrices homogènes de transformation. Nous présentons dans la deuxième section les calculs relatifs à la simplification des modèles en mode m-bot et en dernière section ceux relatifs à la simplification des modèles en mode p-bot.

C.1 Matrices de transformation de la partie manipulation

$$
{}^{O}T_A = \begin{bmatrix} \cos(\theta_0) & -\sin(\theta_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_0) & \cos(\theta_0) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
{}^{A}T_B = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & h \\ -\sin(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
{}^{B}T_C = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
{}^{C}T_D = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & l_2 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

$$
{}^{D}T_H = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & l_3 \\ 0 & 0 & 1 & l_4 \\ -\sin(\theta_4) & -\cos(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
$$

C.2 Modélisation géométrique d'un robot 3R plan

Afin de faciliter la modélisation géométrique directe et inverse, la figure C.1 présente un changement de variable qui réduit la partie manipulation du m-bot à un manipulateur 3R plan.

Ce paramétrage est possible grâce à des changements de variables. Ainsi, pour les angles :

$$
\begin{cases} q_1 = \frac{\pi}{2} + \theta_0 \\ q_2 = \pi + \theta_2 \\ q_3 = \theta_3 \end{cases} \tag{C.1}
$$

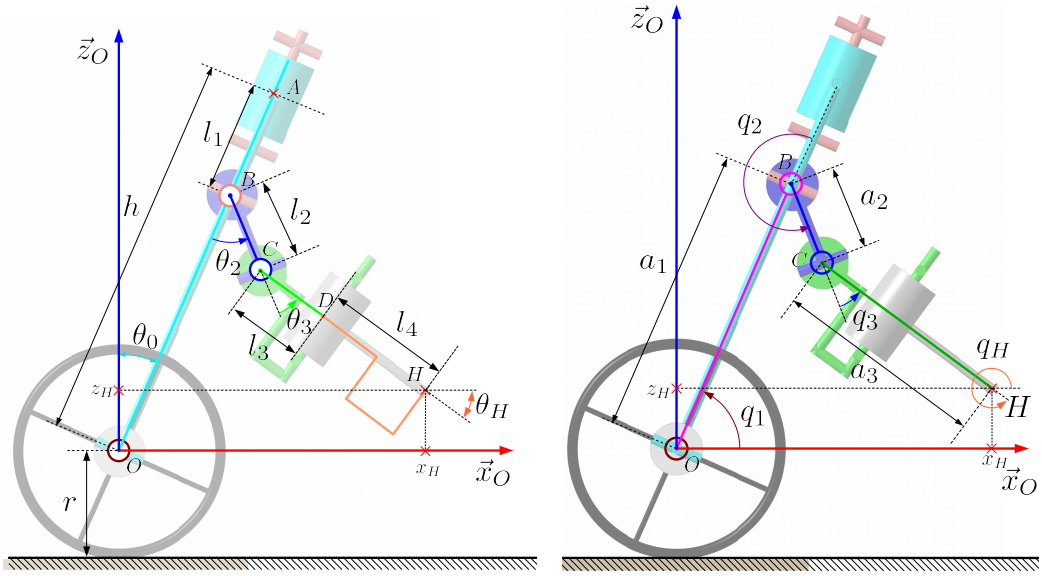
En ce qui concerne les longueurs :

$$
\begin{cases} a_1 = h - l_1 \\ a_2 = l_2 \\ a_3 = l_3 + l_4 \end{cases} \tag{C.2}
$$

C.2.1 MGD

Le modèle géométrique direct est défini par :

$$
\begin{cases} x_H = a_1 \cos q_1 + a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) \\ z_H = a_1 \sin q_1 + a_2 \sin(q_1 + q_2) + a_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) \\ q_H = q_1 + q_2 + q_3 \end{cases} \tag{C.3}
$$



(a) Paramétrage par défaut de la partie manipulation

(b) Paramétrage 3R plan de la partie manipulation

FIGURE C.1 – Paramétrage simplifié de la partie manipulation du m-bot

En revenant au paramétrage initial, le MGD est donc :

$$\begin{cases} x_H = (h - l_1)\cos(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) + l_2 \cos(\theta_0 + \frac{\pi}{2} + \pi + \theta_2) + (l_3 + l_4)\cos(\frac{\pi}{2} - \theta_0 + \pi + \theta_2 + \theta_3) \\ z_H = (h - l_1)\sin(\theta_0 + \frac{\pi}{2}) + l_2 \sin(\theta_0 + \frac{\pi}{2} + \pi + \theta_2) + (l_3 + l_4)\sin(\theta_0 + \frac{\pi}{2} + \pi + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta_H = \theta_0 + \frac{\pi}{2} + \pi + \theta_2 + \theta_3 \end{cases} \tag{C.4}$$

Avec les simplifications, le MGD devient finalement :

$$\begin{cases} x_H = -(h - l_1)\sin(\theta_0) - l_2 \sin(\theta_0 + \theta_2) - (l_3 + l_4)\sin(\theta_0 + \theta_2 + \theta_3) \\ z_H = (h - l_1)\cos(\theta_0) - l_2 \cos(\theta_0 + \theta_2) - (l_3 + l_4)\cos(\theta_0 + \theta_2 + \theta_3) \\ \theta_H = \theta_0 + \theta_2 + \theta_3 - \frac{\pi}{2} \end{cases} \tag{C.5}$$

C.2.2 MGI

Les données initiales du problème de modélisation inverse sont la situation du point H, $X_H = [x_H, z_H, \theta_H]$. Le but est de trouver les angles θ_0, θ_2 et θ_3 qui permettent l'obtention de la situation décrite dans X_H. Nous utilisons le paramétrage simplifié donné par l'équation C.3 et nous réalisons une résolution algébrique à ce problème. De l'équation C.3 nous obtenons :

$$\begin{cases} a_1 \cos q_1 + a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_3 \cos(q_1 + q_2 + q_3) - x_H = 0 \\ a_1 \sin q_1 + a_2 \sin(q_1 + q_2) + a_3 \sin(q_1 + q_2 + q_3) - z_H = 0 \\ q_1 + q_2 + q_3 = q_H \end{cases} \tag{C.6}$$

On remplace q_H dans les deux premières lignes de l'équation C.6 :

$$\begin{cases} a_1 \cos q_1 + a_2 \cos(q_1 + q_2) + a_3 \cos(q_H) - x_H = 0 \\ a_1 \sin q_1 + a_2 \sin(q_1 + q_2) + a_3 \sin(q_H) - z_H = 0 \end{cases} \tag{C.7}$$

Les termes $a_3 \cos(q_H) - x_H = -u_1$ et $a_3 \sin(q_H) - z_H = -u_2$ étant connus, on peut écrire que :

$$\begin{cases} a_1 \cos q_1 + a_2 \cos(q_1 + q_2) = u_1 \\ a_1 \sin q_1 + a_2 \sin(q_1 + q_2) = u_2 \end{cases} \tag{C.8}$$

Sachant que :

$$\cos^2(q_1+q_2)+\sin^2(q_1+q_2)=1 \tag{C.9}$$

Ainsi, on élève au carré les deux lignes de l'équation C.8 puis on fait la somme, on obtient :

$$(u_1-a_1\cos q_1)^2+(u_2-a_1\sin q_1)^2=a_2^2 \tag{C.10}$$

Ce qui implique :

$$u_1\cos(q_1)+u_2\sin(q_1)=\frac{u_1^2+u_2^2+a_1^2-a_2^2}{2a_1} \tag{C.11}$$

Ce type d'équations ($X\sin(\alpha)+Y\cos(\alpha)=Z$) a une solution connue (type 2, [Dombre et Khalil, 1988]), avec :

$$\begin{cases} \sin(\alpha)=\frac{XZ+\varepsilon Y\sqrt{X^2+Y^2-Z^2}}{X^2+Y^2} \\ \cos(\alpha)=\frac{YZ-\varepsilon X\sqrt{X^2+Y^2-Z^2}}{X^2+Y^2} \end{cases} \tag{C.12}$$

avec $\varepsilon=\pm 1$. Dans notre cas :

$$\begin{cases} X_1=u_2 \\ Y_1=u_1 \\ Z_1=\frac{u_1^2+u_2^2+a_1^2-a_2^2}{2a_1} \end{cases} \tag{C.13}$$

On déduit donc q_1 :

$$q_1=ATAN2\left(\frac{X_1Z_1+\varepsilon Y_1\sqrt{X_1^2+Y_1^2-Z_1^2}}{X_1^2+Y_1^2},\frac{Y_1Z_1-\varepsilon X_1\sqrt{X_1^2+Y_1^2-Z_1^2}}{X_1^2+Y_1^2}\right) \tag{C.14}$$

Une fois la valeur de q_1 connue, et en utilisant la formule trigonométrique :

$$\sin(\alpha+\beta)=\sin\alpha\cos\beta+\cos\alpha\sin\beta$$

La deuxième ligne de l'équation C.8 devient :

$$X_2\sin(q_2)+Y_2\cos(q_2)=Z_2 \tag{C.15}$$

avec :

$$\begin{cases} X_2=\cos(q_1) \\ Y_2=\sin(q_1) \\ Z_2=\frac{u_2-a_1\sin(q_1)}{a_2} \end{cases} \tag{C.16}$$

On déduit q_2 avec :

$$q_2=ATAN2\left(\frac{X_2Z_2+\varepsilon Y_2\sqrt{X_2^2+Y_2^2-Z_2^2}}{X_2^2+Y_2^2},\frac{Y_2Z_2-\varepsilon X_2\sqrt{X_2^2+Y_2^2-Z_2^2}}{X_2^2+Y_2^2}\right) \tag{C.17}$$

Finalement, pour q_3 :

$$q_3=q_H-q_1-q_2 \tag{C.18}$$

En conclusion, pour trouver les angles θ_0, θ_2 et θ_3, on procède au changement de variables présentées en équations C.1 et C.2.

C.2.3 Matrice Jacobienne J

La matrice jacobienne de la partie manipulation ${}^3J_H$ est :

$$ {}^3J_H = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \tag{C.19} $$

avec :
-$J_{11} = \frac{dx_H}{d\theta_0} = -h\cos\theta_0 - l_1\sin\theta_0 - l_2\sin(\theta_0+\theta_2) - l_4\cos(\theta_0+\theta_2+\theta_3) - l_3\sin(\theta_0+\theta_2+\theta_3)$.
-$J_{12} = \frac{dx_H}{d\theta_2} = -l_2\sin(\theta_0+\theta_2) - l_4\cos(\theta_0+\theta_2+\theta_3) - l_3\sin(\theta_0+\theta_2+\theta_3)$.
-$J_{13} = \frac{dx_H}{d\theta_3} = -l_4\cos(\theta_0+\theta_2+\theta_3) - l_3\sin(\theta_0+\theta_2+\theta_3)$.
-$J_{21} = \frac{dz_H}{d\theta_0} = l_1\cos\theta_0 - h\sin\theta_0 + l_2\cos(\theta_0+\theta_2) + l_3\cos(\theta_0+\theta_2+\theta_3) - l_4\sin(\theta_0+\theta_2+\theta_3)$.
-$J_{22} = \frac{dz_H}{d\theta_2} = l_2\cos(\theta_0+\theta_2) + l_3\cos(\theta_0+\theta_2+\theta_3) - l_4\sin(\theta_0+\theta_2+\theta_3)$.
-$J_{23} = \frac{dz_H}{d\theta_3} = l_3\cos(\theta_0+\theta_2+\theta_3) - l_4\sin(\theta_0+\theta_2+\theta_3)$.
-$J_{31} = \frac{dq_H}{d\theta_0} = 1$.
-$J_{32} = \frac{dq_H}{d\theta_2} = 1$.
-$J_{33} = \frac{dq_H}{d\theta_3} = 1$.

Résumé

Conception et Commande Collaborative de Manipulateurs Mobiles Modulaires (C3M3)

Dans un contexte d'Industrie 4.0, on perçoit de nouveaux usages possibles des manipulateurs mobiles (MMs), des robots généralement obtenus par l'association d'un bras manipulateur et d'une plate-forme mobile. Ce travail de thèse se focalise sur la synthèse et la commande de nouveaux MMs coopératifs en définissant trois défis à relever. Le premier défi concerne l'élargissement des domaines d'utilisation des robots par la possibilité de leur utilisation coopérative. Nous définissons ainsi un système robotique modulaire basé sur l'utilisation d'entités robotiques appelés mono-robots (m-bots). Ceux-ci sont des MMs qui peuvent se réarranger sous forme de poly-robot (p-bot) pour réaliser une tâche en collaboration. Le deuxième défi se focalise sur la définition de l'architecture cinématique élémentaire de ces robots. Ainsi, nous proposons une démarche générique de synthèse structurale qui permet l'obtention de plusieurs architectures de m-bots respectant les cahiers des charges relatifs à la tâche en tant que m-bot, mais aussi en tant que p-bot pour un environnement considéré. Cette démarche est basée sur l'analyse structurale des MMs à l'aide des paramètres structuraux des mécanismes (connectivité, mobilité, redondance et hyperstatisme). Le troisième défi proposé est d'arriver à modéliser et contrôler les architectures de MMs synthétisées pour la tâche. Deux lois de commande (PID et hybride force-position) sont proposées pour la réalisation de la tâche considérée. Leur validation a été réalisée grâce à des simulations avancées.

Mots clefs : Robotique industrielle et de service, Manipulateurs mobiles, Collaboration et coopération robotiques, Paramètres structuraux, Analyse structurale, Synthèse structurale, Modélisation des manipulateurs mobiles, Synthèse dimensionnelle, Commande des manipulateurs mobiles.

Abstract

Design and Collaborative Control of Modular Mobile Manipulators

In recent years, the concept of Industry 4.0 has led to new possibilities of use for mobile manipulators (MMs) that are generally made of a manipulator arm mounted on a mobile base. The current Ph.D. is focused on the synthesis and control of new cooperative MMs by defining three challenges. The first challenge concerns the widening of the fields of application of robots. Therefore, we define a modular robotic system based on the use of multiple MMs (mono robots or m-bots) that can be used as a global system (poly-robot or p-bot) for collaborative tasks. The second challenge concerns the definition of the kinematic structure of the MMs. We propose a new generic method of structural synthesis that allows to obtain multiple kinematic architectures for m-bots that respect the constraints imposed by the task and the workspace. This method is based on structural analysis of MMs by the evaluation of the structural parameters (connectivity, mobility, redundancy and overconstraint). The last challenge concerns the modelling and control of the new architectures for the new fields of application. Two control laws (PID control and hybrid force-position control) are proposed in order to realise the considered task. Their validation is done with advanced simulations.

Keywords : Industrial and service robotics, Mobile manipulators, Collaborative and cooperative robots, Structural parameters, Structural analysis, Structural synthesis, Modelling of mobile manipulators, Dimensional synthesis, Control of mobile manipulators.