

SIMON PERREAULT

**CONCEPTION MÉCANIQUE D'UNE PLATE-FORME DE
MARCHE ENTRAÎNÉE PAR CÂBLES**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en génie mécanique
pour l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2007

Résumé

Le Laboratoire de robotique de l'Université Laval s'est fixé comme objectif de créer un nouveau type d'interface de locomotion. Ce dernier doit permettre de recréer, de manière exacte, les principaux mouvements exécutés lors de la démarche humaine. D'ailleurs, ce mécanisme est nécessaire à la conception d'un système de réalité virtuelle pouvant reproduire différents types de surfaces à l'utilisateur tout en conservant une inconscience totale de la présence du système de la part de l'utilisateur. Par conséquent, dans le but d'atteindre de tels objectifs, il est requis d'effectuer une étude permettant de déterminer la géométrie adéquate d'un mécanisme respectant des critères de performance aussi exigeants. Ainsi, ce document présente les diverses étapes parcourues lors de l'analyse et de l'obtention de l'architecture d'un mécanisme parallèle à six degrés de liberté entraîné à l'aide de huit câbles. En résumé, l'optimisation de la géométrie, la détection des interférences et la distribution des tensions dans les câbles sont les principaux thèmes qui s'enchaînent dans ce mémoire.

Avant-propos

À mon avis, ce mémoire serait incomplet s'il ne présentait pas le sentiment de gratitude éprouvé envers les différentes personnes qui m'ont entourées tout au long du cheminement de cette première phase de mes études supérieures.

En premier lieu, je tiens à remercier spécialement ceux et celles qui m'ont appuyé, soutenu, aidé, conseillé, diverti ou même assisté lors des événements qui ont rempli ces deux dernières années. Des parents, des amis, des collègues et des connaissances de votre qualité me procurent l'énergie nécessaire pour me dépasser jour après jour. Tous ceux qui se reconnaissent dans ces groupes m'ont permis d'avancer professionnellement ainsi que moralement.

Évidemment, dans l'accomplissement d'une étude de la sorte, il est impératif pour un étudiant d'être entouré des personnes appropriées. C'est-à-dire que son entourage professionnel doit lui conférer les compétences et le support nécessaires au bon déroulement de ses travaux. Ce cheminement doit se faire dans une atmosphère des plus respectueuse pour assurer, d'une part, une croissance de la confiance en soi envers ses tâches et, d'autre part, un apprentissage à la hauteur de ses attentes.

À la lumière de ces propos, je me dois de remercier plus particulièrement les membres du Laboratoire de robotique de l'Université Laval, car j'y ai retrouvé toutes ces conditions favorables et même plus encore. L'atmosphère régnant dans ses locaux est des plus propices au travail et les ressources mises à notre disposition sont adéquates pour répondre aux objectifs de ce type d'étude. En ce sens, les professionnels de recherche sont toujours prêts à nous aider et à nous éclairer au moment opportun. Une chose est certaine, ce groupe de travail est passionné et cette passion découle directement de la

confiance et du respect que chaque membre perçoit envers le directeur de ce laboratoire, c'est-à-dire le Professeur Clément M. Gosselin. Il est incontournable pour moi de remercier personnellement M. Gosselin pour m'avoir permis d'effectuer un projet spécialisé au cours de l'été 2004 et ainsi de m'initier graduellement à la recherche en robotique. De plus, je suis reconnaissant envers M. Gosselin d'avoir cru en moi, de m'avoir financé, de m'avoir donné l'opportunité de faire partie de son laboratoire et ainsi les moyens de mener à bien ce projet de maîtrise.

Je tiens aussi à remercier spécialement Marc Gouttefarde pour ses judicieux conseils concernant le monde des mécanismes à câbles. Son aide et son appui en tant que collègue de travail ont été appréciés et ils ont été, sans aucun doute, d'une grande utilité.

Dans un même ordre d'idées, je souhaite remercier Martin Otis pour m'avoir permis d'améliorer mes travaux grâce entre autres à son utilisation directe de ceux-ci et aux nombreuses discussions que nous avons eues sur la démarche à suivre pour concevoir un tel système. Un mécanisme de la sorte comporte de nombreuses spécifications et il est souvent ardu de toutes les intégrer.

De plus, il m'est nécessaire de noter l'implication de deux membres du Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale (CIRRS) soit Dr Bradford J. McFadyen et M. Guy St-Vincent pour le temps qu'ils ont consacré à me fournir les données expérimentales relatives à une marche typique d'un patient sain et à répondre rigoureusement à mes nombreuses questions. Ces données ont été bénéfiques tout au long de mes travaux et elles ont permis d'effectuer maintes simulations.

D'un autre côté, j'aimerais plus personnellement saluer mes parents, ma conjointe et mes amis pour m'avoir accompagné et encouragé tout au long de ces travaux. Peu d'entre eux connaissent précisément le sujet de ma recherche, mais j'en suis sûr, peu importe le sujet, ils ont été et ils seront toujours à mes côtés et je les en remercie de tout coeur. En terminant, je tiens à glisser un mot pour mon père et ma mère, qui ont su me conférer les bonnes valeurs, celles qui me permettent d'avancer dans la vie et d'en être fier. Bien entendu, en tant que bons parents, ils se sont toujours montrés intéressés et fiers de ce que j'accomplissais. Pour tout ceci, Merci!

Finalement, je tiens à ajouter que c'est seulement à la fin d'un tel parcours que l'on se rend compte à quel point le temps file, lorsque que l'on fait quelque chose qui nous passionne, et qu'ainsi une autre étape de son cheminement académique se termine déjà.

Bonne lecture à tous !

Table des matières

Résumé	i
Avant-propos	ii
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Introduction	1
1 Généralités	7
1.1 Notation	8
1.2 Problématique du projet	8
1.3 Cahier des charges	9
1.4 Choix du mécanisme initial	12
1.4.1 Particularités des mécanismes à câbles	12
1.4.2 Détermination de la solution initiale	16
1.5 Conclusion	19
2 Outils et techniques d’optimisation géométrique	21
2.1 Problème géométrique inverse des mécanismes entraînés par câbles . . .	22
2.2 Techniques d’optimisation	26
2.2.1 Sélection des critères de performance	26
2.2.1.1 Espace des poses polyvalentes	27
2.2.1.2 Espace des poses de compensation gravitationnelle . .	29

2.2.2	Détection des interférences	32
2.2.2.1	Méthode de détection	33
2.2.2.2	Définition des trajectoires	41
2.2.3	Optimisation à l'aide d'un algorithme séquentiel	57
2.2.4	Optimisation à l'aide d'un algorithme génétique	61
2.2.5	Optimisation à l'aide d'un algorithme mixte	64
2.3	Conclusion	65
3	Obtention et description de la géométrie finale	67
3.1	Élaboration d'un outil supplémentaire	68
3.2	Évolution chronologique et comparaison des différents mécanismes . . .	71
3.3	Présentation du mécanisme sélectionné	86
3.3.1	Description approfondie du mécanisme	87
3.3.2	Analyse exhaustive des résultats liés au mécanisme	89
3.4	Conclusion	100
4	Vérification des forces articulaires lors d'une simulation numérique	102
4.1	Équations cinématiques d'un mécanisme parallèle à câbles	103
4.2	Équations dynamiques d'un mécanisme parallèle à câbles	107
4.3	Détermination des tensions dans les câbles	111
4.4	Conclusion	119
5	Proposition de travaux futurs	121
5.1	Travaux de conception à venir	122
5.2	Fonctionnement général et applications possibles du système	127
5.3	Conclusion	129
	Conclusion	131
	Bibliographie	135
A	Géométrie des différents mécanismes analysés	141
A.1	Solution des figures 1.5 et 1.7	142
A.2	Solution des figures 3.2 et 3.3	143
A.3	Solution des figures 3.4, 3.5 et 3.6	144
A.4	Solution des figures 3.7, 3.8 et 3.9	145
A.5	Solution des figures 3.10, 3.11 et 3.12	146
A.6	Solution des figures 3.13, 3.14 et 3.15	147
B	Données expérimentales d'une démarche typiquement humaine	148

C	Graphiques liés aux interférences du mécanisme final	157
C.1	Interférences liées à la trajectoire de marche	158
C.2	Interférences liées à la trajectoire <i>exigeante</i>	159
D	Résultats complémentaires	166

Liste des tableaux

1.1	Débattements prescrits en position et en rotation.	10
2.1	Terminologies de l'algorithme génétique versus celles liées à l'application.	62
3.1	Parcours chronologique des optimisations de cette étude.	71
3.2	Comparaison des résultats pour les mécanismes obtenus.	84
3.3	Contacts décelés pour la plate-forme gauche lors de la trajectoire T1.	94
3.4	Contacts décelés pour la plate-forme droite lors de la trajectoire T4.	96
3.5	Contacts décelés pour la plate-forme gauche lors de la trajectoire T4.	97
A.1	Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 1.5 et 1.7.	142
A.2	Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.2 et 3.3.	143
A.3	Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.4 à 3.6.	144
A.4	Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.7 à 3.9.	145
A.5	Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.10 à 3.12.	146
A.6	Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.13 à 3.15.	147

Liste des figures

1.1	Espace de travail préalablement déterminé.	10
1.2	Exemple d'un robot sériel plan à trois ddl.	13
1.3	Exemple d'un robot parallèle plan à trois ddl conventionnel.	14
1.4	Exemple d'un robot parallèle plan à trois ddl entraîné par câbles.	15
1.5	Solution initiale : vue tridimensionnelle du manipulateur parallèle à six ddl entraîné par huit câbles.	18
1.6	Représentation schématique du concept de base.	18
1.7	Solution initiale : vue de dessus du système global.	19
2.1	Modèle cinématique d'un mécanisme parallèle entraîné par câbles.	22
2.2	Liaison typique d'un mécanisme parallèle entraîné par câbles.	23
2.3	Série de rotations reliée à la convention d'angles d'Euler ZYX.	24
2.4	Représentation des trois axes de rotation à l'aide d'une modélisation tridimensionnelle d'un pied humain.	24
2.5	Torseurs arbitraires pouvant être équilibrés à l'effecteur d'un mécanisme plan entraîné par câbles.	28
2.6	Torseur engendré par le poids de l'effecteur d'un mécanisme plan entraîné par câbles.	29
2.7	Résultat découlant de l'évaluation de l'EPP du mécanisme de la figure 1.5.	31
2.8	Représentation vectorielle de la détection des interférences mécaniques.	34
2.9	Exemple ne présentant aucun contact physique entre deux entités lors d'une simulation arbitraire.	38

2.10	Exemple présentant un croisement virtuel entre deux entités lors d'une simulation arbitraire.	39
2.11	Exemple présentant un croisement réel <i>léger</i> entre deux entités lors d'une simulation arbitraire.	39
2.12	Exemple présentant un croisement réel <i>sévère</i> entre deux entités lors d'une simulation arbitraire.	40
2.13	Schéma des différents repères inclus dans un système complet.	42
2.14	Schéma représentant la disposition de l'espace de travail lié à chacun des pieds de l'utilisateur.	43
2.15	Évolution de la position du pied droit lors d'une démarche humaine typique.	44
2.16	Évolution de l'orientation du pied droit lors d'une démarche humaine typique.	45
2.17	Évolution de la position du pied gauche lors d'une démarche humaine typique.	46
2.18	Évolution de l'orientation du pied gauche lors d'une démarche humaine typique.	47
2.19	Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la marche humaine.	48
2.20	Évolution de l'orientation du pied droit lors d'une démarche humaine typique avec orientation inversée.	49
2.21	Évolution de l'orientation du pied gauche lors d'une démarche humaine typique avec orientation inversée.	49
2.22	Évolution de la position du pied droit lors de la trajectoire ellipsoïdale.	50
2.23	Évolution de la position du pied gauche lors de la trajectoire ellipsoïdale.	51
2.24	Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la trajectoire ellipsoïdale.	52
2.25	Évolution des trois coordonnées de position du pied droit lors de la trajectoire <i>exigeante</i>	52
2.26	Évolution des trois coordonnées du pied gauche lors de la trajectoire <i>exigeante</i>	54
2.27	Évolution des angles d'Euler des pieds droit et gauche lors de la trajectoire <i>exigeante</i>	54
2.28	Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la trajectoire <i>exigeante</i>	56
2.29	Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la trajectoire <i>exigeante</i> à l'aide d'une vue XZ	56

2.30	Exemple d'un résultat obtenu lors d'une optimisation utilisant l'algorithme séquentiel.	60
2.31	Exemple d'un résultat obtenu lors d'une optimisation utilisant l'algorithme génétique.	63
3.1	Graphique du résultat obtenu suite à l'utilisation de l'outil supplémentaire.	70
3.2	Solution 2 : vue tridimensionnelle du mécanisme.	73
3.3	Solution 2 : vue de dessus du système global.	73
3.4	Solution 3 : vue tridimensionnelle du mécanisme.	75
3.5	Solution 3 : vue de dessus du système global.	76
3.6	Solution 3 : vue de derrière du système global.	76
3.7	Solution 4 : vue tridimensionnelle du mécanisme.	77
3.8	Solution 4 : vue de dessus du système global.	78
3.9	Solution 4 : vue de derrière du système global.	78
3.10	Solution 5 : vue tridimensionnelle du mécanisme.	80
3.11	Solution 5 : vue de dessus du système global.	80
3.12	Solution 5 : vue de derrière du système global.	81
3.13	Solution 6 : vue tridimensionnelle du mécanisme.	82
3.14	Solution 6 : vue de dessus du système global.	83
3.15	Solution 6 : vue de derrière du système global.	83
3.16	Vue tridimensionnelle des deux plates-formes de marche.	87
3.17	Schéma du système incluant un utilisateur à l'aide d'une vue YZ.	88
3.18	Identification des câbles : vue de dessus des deux plates-formes de marche.	89
3.19	Illustration des résultats du mécanisme solution envers l'EPP.	91
3.20	Illustration des résultats du mécanisme solution envers l'EPCG.	91
3.21	Évolution des résultats de l'EPP en fonction de la plage de rotation choisie pour l'angle ϕ versus différentes plages à l'angle ψ ($\theta = \pm 45^\circ$).	93
3.22	Évolution des résultats de l'EPCG en fonction de la plage de rotation choisie pour l'angle ϕ versus différentes plages à l'angle ψ ($\theta = \pm 45^\circ$).	93
3.23	Combinaisons de plages de rotation permettant d'éviter tous les contacts lors de la trajectoire <i>exigeante</i>	99
4.1	Modèle CAO préliminaire d'une plate-forme de marche.	113
4.2	Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme droite.	114
4.3	Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme gauche.	114
4.4	Évolution des forces articulaires de la plate-forme droite.	117
4.5	Évolution des forces articulaires de la plate-forme gauche.	118

5.1	Représentation de l'artifice mécanique.	124
5.2	Modèle CAO simplifié du système complet.	126
5.3	Vue de côté du modèle CAO simplifié du système complet.	126
B.1	Évolution des vitesses et accélérations de la plate-forme droite.	151
B.2	Évolution des vitesses et accélérations de la plate-forme gauche.	151
B.3	Évolution des vitesses et accélérations angulaires de la plate-forme droite.	152
B.4	Évolution des vitesses et accélérations angulaires de la plate-forme gauche.	152
B.5	Évolution modifiée des vitesses et des accélérations angulaires de la plate- forme droite.	154
B.6	Évolution modifiée des vitesses et des accélérations angulaires de la plate- forme gauche.	154
B.7	Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme droite par l'utilisateur.	155
B.8	Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme gauche par l'utilisateur.	155
C.1	Interférences de la paire d'entités 4-20 de la plate-forme gauche.	158
C.2	Interférences de la paire d'entités 2-6 de la plate-forme droite.	159
C.3	Interférence de la paire d'entités 4-20 de la plate-forme droite.	161
C.4	Interférence de la paire d'entités 6-7 de la plate-forme droite.	161
C.5	Interférence de la paire d'entités 1-10 de la plate-forme droite.	162
C.6	Interférences de la paire d'entités 2-6 de la plate-forme gauche.	163
C.7	Interférences de la paire d'entités 1-4 de la plate-forme gauche.	164
C.8	Interférences de la paire d'entités 1-10 de la plate-forme gauche.	165
C.9	Interférence de la paire d'entités 6-7 de la plate-forme gauche.	165
D.1	Évolution des coordonnées articulaires de la plate-forme droite.	167
D.2	Évolution des coordonnées articulaires de la plate-forme gauche.	168
D.3	Évolution des vitesses articulaires de la plate-forme droite.	169
D.4	Évolution des vitesses articulaires de la plate-forme gauche.	169
D.5	Évolution des accélérations articulaires de la plate-forme droite.	170
D.6	Évolution des accélérations articulaires de la plate-forme gauche.	170

Introduction

Mise en situation

Il ne date pas d'hier le moment où l'homme a, pour la première fois, utilisé un objet dans le but précis de faciliter la tâche qu'il devait accomplir. Il venait alors d'amorcer, dans une inconscience absolue, une ère nouvelle soit celle de l'application du raisonnement pour améliorer son mode de vie. Cette étape importante marqua à jamais le cours de l'existence humaine sur cette planète, c'est-à-dire le commencement d'une période où les évolutions ne seraient plus seulement engendrées par la nature mais bien par une manifestation en parallèle des évolutions technologiques de l'être humain. Cette nouvelle vocation permit à l'*Homo sapiens* de se différencier graduellement des autres êtres vivants de par sa capacité à raisonner, à créer et surtout à lier ses actions à des conséquences précises. Au fil du temps, les hommes dédièrent le développement de leurs nouvelles technologies à des applications vouées à augmenter l'efficacité de leurs activités quotidiennes. De la création de la roue, des systèmes à levier, passant par celle des premiers calculateurs, jusqu'à celle des voitures hybrides, l'humain n'a cessé d'accroître la complexité de ses oeuvres dans le but premier de faciliter son évolution dans un monde regorgeant de défis à relever.

De nos jours, la technologie évolue à un rythme tel que ce n'est plus les limites de puissance des outils utilisés pour la créer que les capacités financières des organismes

privés ou gouvernementaux qui freinent la course de l'avancement technologique. Les domaines de fine pointe tel que celui de la robotique ne font pas exception à la règle. D'ailleurs, ce dernier est en pleine expansion depuis plusieurs années grâce entre autres au soutien financier constant de différentes organisations. De nouvelles idées émergent, différents concepts sont approchés et maints prototypes sont construits pour vérifier la validité des travaux jusqu'à présent strictement théoriques. Les technologies imbriquées dans ces chefs-d'oeuvre sont de plus en plus révolutionnaires et ces produits permettent d'effectuer des tâches d'une complexité sans précédent.

Entre autres, l'un des défis les plus complexes à ce jour est de réussir à créer une reproduction fidèle de l'être humain. C'est-à-dire de concevoir un système robotisé qui permet la mobilité, l'interaction et une partie du jugement humain. Jusqu'à maintenant, la compagnie japonaise Honda mène le bal en présentant son robot humanoïde nommé ASIMO [1]. Ce dernier peut reconnaître des visages, le son de la voix, monter des escaliers et bien sûr reproduire une démarche semblable à celle de l'humain. D'autres mécanismes sont créés particulièrement pour assister les mouvements de l'homme ou encore pour dépasser ses capacités en repoussant ses limites physiques. Ces appareils sont communément appelés des mécanismes exosquelettes ou des supports exosquelettes. L'Université de Tsukuba au Japon présente un système nommé HAL-5 (Hybrid Assistive Limb) qui permet à l'utilisateur de soulever des charges plus lourdes ou d'assister les personnes âgées rencontrant certaines difficultés lors de leurs déplacements quotidiens [2]. Ces appareils sont bien entendus beaucoup moins limitatifs par rapport à la diversité de mouvements possibles que les fauteuils roulants conventionnels ou même motorisés.

Il va de soi que l'assistance ou la reproduction complète de la mobilité humaine est un volet très intéressant de la robotique moderne. Que ce soit pour ses applications liées à la réhabilitation ou pour des actions militaires, cette voie vaut la peine d'être explorée. Par contre, plusieurs laboratoires dans le monde s'intéressent à reproduire non pas le corps humain en entier mais bien seulement quelques-uns de ses mouvements en particulier dans le but de créer des environnements virtuels de plus en plus réalistes et trompeurs pour les sens humains. Dans le cas où la marche est le mouvement reproduit, ces systèmes sont nommés des simulateurs de marche (ou encore des interfaces de locomotion) et ils permettent en majorité des applications liées à la réhabilitation, à l'entraînement militaire et au divertissement de haut niveau.

La majorité des laboratoires oeuvrant dans ce champ de recherche proposent des concepts qui se lient à des applications ne requérant qu'une partie de la démarche humaine. Ainsi, il est logique de penser aux travaux effectués sur les interfaces de locomotion omnidirectionnels qui ne permettent qu'une démarche évoluant sur une surface plane [14, 25, 26]. Par contre, ces derniers systèmes ont l'avantage de donner la possibilité à l'utilisateur d'évoluer dans la direction de son choix sans aucune restriction. Les inconvénients majeurs de ces appareils sont pour la plupart la complexité du mécanisme de locomotion, son inertie importante et le niveau sonore élevé. Ces deux derniers désavantages mènent souvent à la perte de l'impression d'immersion complète de l'utilisateur dans le monde virtuel. Enfin, ces concepts originaux ne couvrent qu'une partie de la vaste gamme de mouvements exécutés lors des déplacements quotidiens de l'être humain de par leur restriction d'évoluer sur une surface plane. Alors, dans l'optique d'élargir la gamme de mouvements accessibles, une équipe allemande a conçu un prototype nommé HapticWalker [40]. Ce dernier permet de reproduire fidèlement la marche humaine sur surface plane de même que l'ascension d'escaliers. L'inconvénient de ce système est principalement la quantité d'énergie nécessaire pour une pleine utilisation vu son importante inertie. De plus, les mouvements réels de l'utilisateur sont confinés dans un plan vertical. Par conséquent, ce système est adéquat dans une application de réhabilitation mais il est très limitatif pour la récréation d'une démarche typique humaine omnidirectionnelle. Finalement, une équipe coréenne a créé un prototype de simulateur de marche nommé LHI (Locomotion Haptic Interface) qui permet à l'utilisateur de s'orienter tout en effectuant les mouvements de marche ou bien les ascensions d'escaliers et de pentes [50, 51, 52]. Ce dernier concept est très prometteur et ingénieux, cependant il deviendrait restrictif pour une trajectoire de marche rapide ou de course vu son espace de travail limité et son inertie non négligeable.

Donc, pour pallier aux inconvénients ci-haut mentionnés tout en conservant la majorité des avantages des différents travaux publiés, le laboratoire de robotique de l'Université Laval a entamé la conception d'un simulateur de marche permettant à l'utilisateur une vaste gamme de mouvements tels que de monter des escaliers, de marcher sur des surfaces planes, inclinées, cahoteuses, glissantes et même dans un environnement visqueux. Des mouvements cycliques et des changements de direction pourront aussi être exécutés naturellement. Ce système pourra accomplir toutes ces tâches grâce à une approche différente de ce qui est présenté dans la littérature relativement aux interfaces de locomotion. L'idée est de concevoir un simulateur qui a la particularité d'être entraîné à l'aide de câbles. Donc, plus spécifiquement, l'idée générale du mémoire ainsi

que le titre en soi est la conception mécanique d'une plate-forme de marche entraînée par câbles. Depuis quelques années, plusieurs laboratoires travaillent et utilisent cette technologie mais elle n'a jamais été appliquée, au meilleur de nos connaissances actuelles, à la conception d'un tel simulateur. Bien entendu, cette présente étude n'est en fait qu'une première portion du projet global, bien qu'elle soit vouée à être en même temps une partie servant de pilier à ce dit projet.

Évidemment, les mécanismes à câbles sont bien connus dans la littérature depuis quelques années. En effet, plusieurs prototypes et concepts ont nouvellement vu le jour et leurs applications sont très variées. À titre d'exemple, quelques laboratoires ont développé des systèmes réalisant des tâches liées à la réalité virtuelle telles que la simulation d'activités sportives, la fabrication d'interfaces haptiques et la simulation de véhicules de transport aérien [8, 27, 45, 48, 49]. D'autres ce sont concentrés aux applications industrielles soit l'utilisation d'outils spécialisés d'envergure, les tâches de soudure répétitives en endroits restreints et la manutention ultra-rapide d'objets [10, 11, 28, 31]. Certains groupes de recherche sont voués aux tâches reliées à la sécurité tels que le déminage de terrains et les systèmes de recherche et de secourisme après sinistres [9, 35, 44, 47]. Finalement, des laboratoires se sont penchés vers la recherche spatiale par le biais de la conception d'hypertélescopes [30, 36]. Il va de soi que l'ensemble de ces travaux ne représentent qu'une petite partie des recherches effectuées sur les mécanismes à câbles, cependant ils permettent de démontrer le vaste choix d'applications envisageables pour ce type de système.

Dans un même ordre d'idées, le Laboratoire de robotique de l'Université Laval a d'ailleurs acquis une bonne expérience en ce qui a trait à l'étude du comportement des mécanismes à câbles. Plusieurs étudiants ont complété leur mémoire ou leur thèse par le biais d'une étude oeuvrant dans cette récente branche de la robotique. Par conséquent, ce projet fait suite à divers travaux tels que ceux réalisés par M. Guillaume Barrette en 2000 [5] et par M. Gabriel Côté en 2003 [13]. M. Barrette travaillait sur la caractérisation des performances des mécanismes à câbles en évaluant les espaces dynamiques tandis que M. Côté a trouvé des méthodes pour représenter et optimiser des modèles de mécanismes à câbles pour des applications précises telles que des accélérations à l'effecteur connues. Ensuite, M. Benoît Cantin en 2004 [12] a analysé et optimisé un mécanisme parallèle à six degrés de liberté à l'aide des travaux précédents. Par la suite, M. Marc Gouttefarde [23] a déterminé en 2005 des algorithmes qui permettent de connaître l'espace des configurations polyvalentes dans lequel un mécanisme

à câbles peut équilibrer tous les torseurs possibles. Et enfin, M. Régis Poulin en 2005 [38] a contrôlé un mécanisme parallèle comportant trois degrés de liberté dans le but de recréer une interaction physique entre un environnement virtuel et les déplacements réels du système. Donc, suite à ces nombreux travaux, le projet présent est appuyé sur une solide base théorique et expérimentale. Il permet de synthétiser certaines notions préétablies dans le but d'optimiser le design d'un mécanisme à câbles comportant six degrés de liberté en maximisant son espace des configurations polyvalentes tout en minimisant le nombre de contacts causés par les câbles de la plate-forme.

Structure du mémoire

L'évolution des différents chapitres de ce mémoire représente sensiblement l'enchaînement réel des étapes accomplies dans le cadre de cette étude. Cette méthodologie devrait permettre de simplifier la lecture de ce texte, tout en assurant le suivi du déroulement du projet. De plus, à la toute fin du document, quelques annexes sont disponibles et elles seront référencées au moment opportun à l'intérieur du texte pour compléter les propos exprimés.

Ainsi, le premier chapitre contient un survol de la notation utilisée tout au long de ce mémoire de même qu'une présentation de la problématique du projet et du cahier des charges. De plus, le choix de la solution initiale et l'énumération des caractéristiques liées à l'utilisation d'un mécanisme à câbles font aussi partie de ce chapitre.

Le second chapitre présente quant à lui l'élaboration des équations du problème géométrique inverse des mécanismes parallèles entraînés par câbles, les outils choisis pour évaluer les performances des mécanismes solutions et une description détaillée de la méthodologie utilisée pour améliorer ces dites performances.

Le chapitre suivant propose un outil supplémentaire utilisé pour améliorer l'évaluation des mécanismes à l'étude. Aussi, cette section du mémoire comprend une comparaison des différentes solutions engendrées par ce travail, la sélection de l'architecture qui servira de base à la conception de l'interface de locomotion ainsi que la description des particularités de cette dernière.

Le quatrième chapitre comporte l'élaboration des équations cinématiques et dynamiques du mécanisme à câbles sélectionné ainsi que la méthode utilisée pour déterminer les tensions requises dans les câbles pour réaliser une trajectoire telle que celle de la marche humaine.

Finalement, le cinquième chapitre comprend principalement une énumération des travaux futurs qui devraient être accomplis pour mener à bien la suite du projet global, soit la construction d'une interface de locomotion fonctionnelle à l'échelle humaine.

Chapitre 1

Généralités

Ce chapitre propose une description de la notation utilisée pour l'ensemble de ce mémoire. Ensuite, une définition complète de la problématique du projet est élaborée ainsi qu'une présentation du cahier des charges. Les particularités de l'utilisation des mécanismes à câbles sont par la suite présentées. Finalement, le choix de la géométrie initiale utilisée dans le cadre de cette étude est effectué avant de poursuivre au chapitre suivant.

Tout d'abord, avant d'entrer au coeur même du sujet de ce chapitre, il est requis de définir la notation utilisée et respectée tout au long de ce mémoire. Ainsi, il sera plus aisé pour le lecteur de suivre les explications et les développements mathématiques présentés dans les chapitres suivants.

1.1 Notation

De manière générale, une lettre minuscule en caractère normal tel que x représentera un scalaire tandis qu'une lettre majuscule avec ce même caractère tel que X désignera un point ou bien une droite. Par contre, l'utilisation du caractère gras annoncera une entité contenant plus d'une composante comme par exemple une lettre minuscule tel que \mathbf{x} pour un vecteur et une lettre majuscule tel que \mathbf{X} pour un tenseur. De plus, les symboles en caractères calligraphiques tel que \mathcal{X} seront associés à l'appellation des systèmes de repère.

Il est nécessaire de noter que les unités utilisées tout au long du mémoire correspondent à celles proposées par le Système International SI [3]. Alors, les unités de longueur, de masse et de temps seront respectivement le mètre m, le kilogramme kg et la seconde s. En ce qui concerne les unités SI dérivées tels que l'angle plan, la force et le moment, elles seront respectivement représentées par le radian rad (de même que le degré $^\circ$ lorsque spécifié), le newton N et le newton-mètre N·m. Finalement, le sens positif des rotations concernant les angles d'Euler respectera la règle de la main droite.

1.2 Problématique du projet

Le sujet de ce mémoire est un projet faisant partie d'une initiative du Laboratoire de robotique en étroite collaboration avec le Laboratoire de Vision et Systèmes Numériques de l'Université Laval qui se résume en la conception d'une interface de locomotion. Celle-ci permettra entre autres à un utilisateur de marcher naturellement à l'intérieur d'un environnement virtuel. Les applications potentielles d'un tel système sont nombreuses et variées. À titre d'exemples, ce type de mécanisme pourrait avoir un impact sur les nouvelles conceptions d'appareils d'entraînement ou de réhabilitation, d'appareils de

réalité virtuelle et d'interfaces de divertissement de hautes technologies.

Un système tel que décrit comporte plusieurs défis à relever. Le plus contraignant est sans doute la présence de deux effecteurs (deux systèmes robotisés) évoluant dans un même espace de travail. Plus précisément, chaque plate-forme a son propre volume de travail mais ces espaces se superposent grandement, ce qui accentue les risques de collisions éventuelles. Ainsi, pour permettre la reproduction de la marche humaine, ces deux plates-formes doivent se mouvoir à proximité l'une de l'autre sans pour autant entrer en contact. Bien sûr, chaque espace de travail doit être assez volumineux pour permettre de bonnes amplitudes de mouvement en position et en rotation.

Dans l'optique d'atteindre et de respecter les exigences de ce projet, le Laboratoire de robotique a décidé de proposer un nouveau type d'architecture pouvant servir de support mécanique pour une telle interface de locomotion. Cette idée est basée sur l'application de la technologie des mécanismes parallèles entraînés par câbles à la construction d'un simulateur de marche. Pour ce faire, il est nécessaire de bien déterminer et d'optimiser les points d'attache permettant de fixer chacun des câbles à une base fixe et sur les effecteurs. De plus, chaque effecteur ou plate-forme de marche doit être conçu de manière à éviter les contacts mécaniques et à résister aux contraintes internes qui seront engendrées via les efforts appliqués par l'utilisateur et par les câbles simultanément. Il ne faut pas oublier que l'objectif de se mouvoir naturellement dans un environnement virtuel engendre le fait que l'utilisateur ne perçoive ni le poids ni l'inertie des supports robotisés lors de ses mouvements. Il va de soi que toutes ces exigences doivent être rencontrées pour obtenir au bout de la ligne un système permettant de recréer la majorité des mouvements que l'être humain exécute lors de ces déplacements quotidiens, du moins au niveau de ses pieds.

La section suivante propose les exigences établies, dès le commencement du projet, dans le but d'atteindre les objectifs du projet global.

1.3 Cahier des charges

L'approche adéquate pour bien entreprendre un projet est de définir dès le commencement les caractéristiques générales que le mécanisme à concevoir doit respecter. Dans

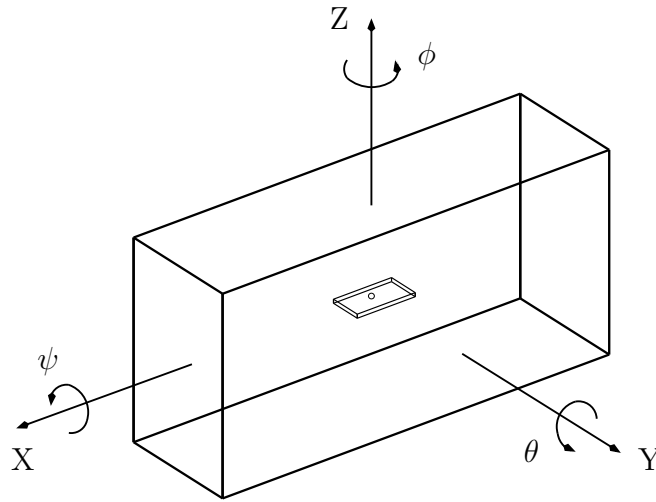


FIG. 1.1 – Espace de travail préalablement déterminé.

le cadre de ce projet, la première exigence devant être fixée pour le système concerne les plages de débattement désirées en ce qui a trait aux six degrés de liberté (ddl) que le mécanisme doit comporter pour bien reproduire le mouvement de la marche humaine (voir la figure 1.1). Cette spécification permet alors de fixer les premiers objectifs à atteindre et par le fait même de déterminer par la suite les dimensions générales du système complet.

Le tableau 1.1 présente les exigences prescrites au niveau des plages de débattement en position ainsi que celles en rotation. Il est à noter que la position de l'effecteur d'un mécanisme est définie suivant les trois axes X, Y et Z et que son orientation est déterminée par la convention d'angles d'Euler ZYX. Cette convention représente une série de trois rotations qui permet de passer d'une orientation initiale vers une orientation finale. Par conséquent, à l'aide de la convention utilisée, les trois rotations successives sont une rotation ϕ autour de l'axe Z, suivie d'une rotation θ autour du

TAB. 1.1 – Débattements prescrits en position et en rotation.

Position		Rotation	
Axe	Débattement (m)	Angle	Débattement (°)
X	$\pm 1,0$	ψ	± 20
Y	$\pm 0,3$	θ	± 45
Z	$\pm 0,5$	ϕ	± 45

nouvel axe Y' et d'une rotation ψ autour du nouvel axe X'' .

Une autre restriction a été définie lors des premières rencontres avec le directeur de recherche soit d'utiliser une architecture strictement entraînée à l'aide de câbles. Cette exigence vient du fait que le prototype doit conserver la qualité d'être simple à construire et à assembler. D'ailleurs, ces qualités s'allient généralement bien à de tels mécanismes vu la présence seulement d'une base avec des actionneurs, d'un effecteur et d'un certain nombre de câbles les reliant. De plus, chaque mécanisme doit conserver une certaine symétrie à l'intérieur de sa géométrie dans le but d'obtenir des architectures simples et fonctionnelles. Il est requis de minimiser le nombre de câbles pour faciliter le contrôle du système mais aussi pour éviter au maximum les risques de contacts câble/câble et câble/structure.

Donc, un mécanisme hybride comportant une quelconque liaison rigide avec la base ou un effecteur présentant un degré de liberté supplémentaire à contrôler ne constituent pas des solutions envisageables. Celles-ci ne causeraient que la perte de la simplicité des mécanismes à câbles ainsi qu'une diminution des performances possibles avec ces technologies. Il est à noter que les particularités de ces mécanismes seront présentées en profondeur à la section 1.4.1.

Au niveau des performances requises, il a été établi que le premier objectif est la reproduction de la marche humaine sur une surface plane. Les autres trajectoires possibles telles que la course et l'ascension de marche d'escalier seront analysées ultérieurement après une validation du concept à l'aide d'un éventuel prototype à échelle réduite résultant de la présente étude.

En résumé, les caractéristiques préalablement définies pour ce projet sont les suivantes :

- atteindre les débattements préétablis en position et en rotation tout en conservant le plein contrôle des plates-formes ;
- utiliser des architectures simples et strictement entraînées à l'aide de câbles ;
- minimiser les risques de contacts entre les deux plates-formes, l'ensemble des câbles et entre les câbles et les structures ;
- obtenir des performances représentatives de celles exigées lors de la marche humaine à l'aide d'un prototype à échelle réduite.

La section suivante présente l'ensemble des spécifications qui ont permis de déterminer le mécanisme ayant servi de point de départ pour cette étude.

1.4 Choix du mécanisme initial

Tel que pour la plupart des projets, il est nécessaire de débiter l'étude à partir d'une solution qui, à première vue, semble plausible. Cette solution doit ensuite être améliorée et validée afin d'atteindre en bout de ligne les performances et les exigences prescrites pour le bon succès du projet.

Cette première solution doit être choisie en se basant sur l'expérience et les connaissances de l'étudiant et de ceux qui l'encadrent. Alors, pour faire un choix éclairé, il est primordial de bien connaître les particularités du type de système envisagé. Par conséquent, la sous-section suivante définit les particularités des mécanismes à câbles.

1.4.1 Particularités des mécanismes à câbles

Tout d'abord, certaines hypothèses sont appliquées tout au long de ce mémoire. Elles permettent de simplifier le problème sans toutefois négliger les détails qui pourraient s'avérer importants. Donc, les hypothèses faites sont les suivantes :

1. Les câbles sont considérés vectoriellement tels que des droites.
2. Les coefficients d'élasticité des câbles ainsi que leurs masses sont négligés.
3. Les points d'attache des câbles sur la base et sur les effecteurs sont considérés constants, c'est-à-dire que le diamètre des oeillets est considéré infiniment petit.
4. Des déflexions nulles sont supposées au niveau de la structure des plates-formes lors des simulations (corps indéformables).

Les implications de ces hypothèses sont explicites mais elles doivent être plus élaborées pour en assurer la compréhension. Donc, il n'y a aucun relâchement de câbles d'inclus à l'intérieur des analyses, ceux-ci n'étant pas souhaités, de toute manière, pour

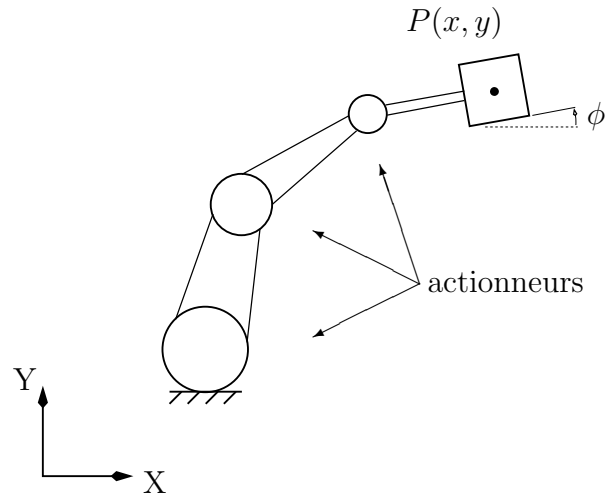


FIG. 1.2 – Exemple d’un robot sériel plan à trois ddl.

ne pas perdre le contrôle d’une plate-forme. Les variations de longueur des câbles sont strictement causées par le déroulement ou l’enroulement des actionneurs et non pas par des allongements dans le domaine élastique ou bien plastique des matériaux utilisés dus à leur poids ou aux efforts internes. Aucune modification de la position des points d’attache des câbles n’est prise en compte, donc les oeillets devront être conçus de manière à limiter cet effet lors des changements d’orientation des câbles. Et finalement, la structure des plates-formes devra être pensée et construite de façon à minimiser les flexions dues aux contraintes internes lors des différentes trajectoires.

Maintenant que les hypothèses et leurs implications sont présentées, il est requis de connaître les avantages et les inconvénients des mécanismes entraînés à l’aide de câbles par rapport aux mécanismes robotiques conventionnels. Les figures 1.2, 1.3 et 1.4 illustrent de manière schématique les différences structurales entre les robots sériels, les robots parallèles conventionnels et ceux entraînés par câbles. Donc, la figure 1.2 montre que les robots sériels comportent, en général, une série de moteurs et de membrures rigides permettant de déplacer son effecteur. Par contre, les manipulateurs parallèles présentent plusieurs chaînes cinématiques reliées au même organe terminal tel qu’illustré à la figure 1.3. Ainsi, en général, les robot sériels détiennent un espace de travail de plus grande envergure comparativement à celui des robots parallèles. Néanmoins, ces derniers comportent une meilleure rigidité ainsi que la possibilité de manipuler une charge utile plus importante par rapport à leur masse propre vu la faible inertie de leur partie mobile. Finalement, la figure 1.4 aide à visualiser les liaisons flexibles (quatre câbles pour trois ddl) liant l’effecteur d’un robot parallèle à câbles.

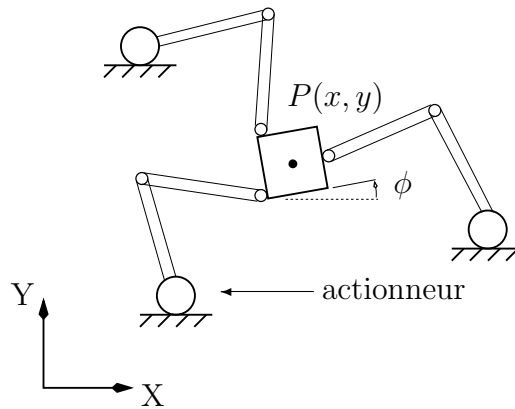


FIG. 1.3 – Exemple d’un robot parallèle plan à trois ddl conventionnel.

Dans le but de faire un premier choix éclairé, chaque particularité des mécanismes à câbles doit être comprise adéquatement. Ceci peut paraître banal mais il est impératif de faire un choix de solution initiale réfléchi, car en général, plus le choix est judicieux, plus la solution optimale pourra être atteinte rapidement. Alors, cette étape est très importante pour démarrer le projet dans la bonne direction.

Les principaux avantages des robots parallèles à câbles par rapport aux manipulateurs parallèles conventionnels sont les suivants :

- la légèreté des parties mobiles de ce type de manipulateur ;
- les grandes accélérations permises grâce entre autres à la faible inertie du système ;
- l’étendue des déplacements et des orientations accessibles ;
- la modification de l’espace de travail simplement en repositionnant les actionneurs sur le cadre externe ou les points d’attache sur l’effecteur ;
- le coût moindre des équipements.

Plus précisément, le mécanisme mobile se résume en l’effecteur lui-même et les câbles le contraignant. Les manipulateurs parallèles conventionnels doivent dépenser de l’énergie supplémentaire en déplaçant les membrures rigides reliant leur effecteur. Grâce à ce fait, les mécanismes à câbles ont la possibilité d’atteindre des accélérations beaucoup plus élevées que leur vis-à-vis conventionnels pour des actionneurs de puissances équivalentes. Cette dernière particularité est très intéressante relativement à une application telle que la réalisation d’un simulateur de marche. Les déplacements n’étant pas limités par les longueurs des membrures mais seulement par la capacité des enrouleurs à emmagasiner le câble, les débattements possibles sont de beaucoup

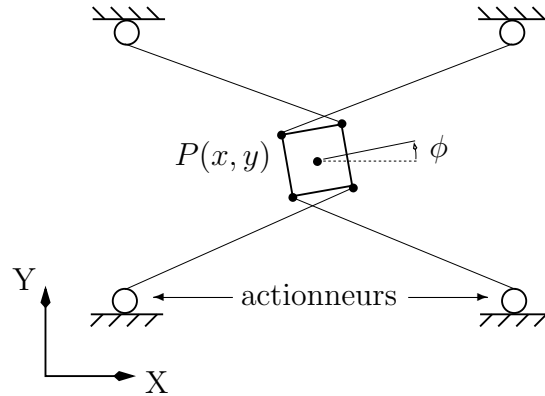


FIG. 1.4 – Exemple d’un robot parallèle plan à trois ddl entraîné par câbles.

accrus. Les espaces de travail peuvent être facilement modifiés en repositionnant les points d’attaches des câbles au lieu de concevoir de nouvelles membrures. Finalement, le coût de fabrication des équipements nécessaires est inférieur dû au fait qu’il n’y a peu ou pas de pièces à usiner et aussi qu’il est possible d’acheter des câbles pour une somme d’argent relativement faible.

D’un autre côté, ces systèmes ne possèdent pas que des avantages. Les désavantages sont contraignants et il est important de bien les maîtriser pour ne pas obtenir des résultats désastreux. Donc, les inconvénients peuvent se résumer comme suit :

- l’unilatéralité des efforts permis par les câbles (tension seulement) ;
- la présence de $n + 1$ câbles pour contrôler pleinement n degrés de liberté ;
- les interférences entre les câbles eux-mêmes et celles avec les autres objets présents dans l’espace de travail ;
- la vibration possible au niveau des câbles et ainsi de l’ensemble du mécanisme mobile.

Ces inconvénients présentent différentes facettes de l’utilisation des mécanismes à câbles. La première et la deuxième s’expliquent par le fait qu’il n’est pas possible de contrôler complètement un degré de liberté, par exemple le mouvement selon l’axe X , en utilisant un seul câble. Il est nécessaire d’utiliser au moins deux câbles, car ceux-ci ne permettent que d’appliquer des efforts en tension sur un objet et non pas en compression telles que les membrures rigides conventionnelles. Donc, en attachant un câble de chaque côté de l’objet suivant l’axe X , il est évidemment possible de contrôler adéquatement ce degré de liberté. Ce phénomène est applicable et généralisé aux systèmes comportant plusieurs degrés de liberté et il y a d’ailleurs maintes publications en plus de la thèse

de M. Marc Gouttefarde [23] qui démontrent la nécessité d'utiliser $n + 1$ câbles pour pleinement contrôler n degrés de liberté. Néanmoins, il peut y avoir des exceptions lorsqu'il est possible de remplacer un câble par l'effet de l'accélération gravitationnelle, mais tout en perdant la possibilité d'effectuer des accélérations supérieures à la norme de cette dernière selon cette même direction.

La troisième facette découle de la présence d'un grand nombre de câbles pour contrôler un mécanisme. Dans la situation du simulateur de marche, chaque plate-forme possède six ddl. En suivant la formulation précédente, il est rapidement réalisé que le système doit au minimum posséder quatorze câbles pour permettre un contrôle sécuritaire des deux plates-formes en simultané. Alors, vu le nombre élevé de câbles dans un espace commun de travail, les risques de croisement entre les différents câbles et les interférences avec les structures mécaniques sont accentués. Enfin, la dernière facette est la possibilité d'observer un phénomène de vibration des câbles lors des essais expérimentaux. Ces vibrations, se propageant à la structure mobile du système, peuvent entraîner une diminution de la précision avec laquelle les plates-formes pourront être positionnées. Ce problème n'est pas inclus dans la présente étude et il devra être pris en considération lors d'éventuels essais expérimentaux à l'aide d'un futur prototype à échelle réduite.

1.4.2 Détermination de la solution initiale

Maintenant que les particularités des mécanismes à câbles sont connues, il est nécessaire de faire le choix de la géométrie initiale qui sera utilisée comme point de départ pour le cheminement de cette étude.

Les faits sont qu'il est obligatoire que le mécanisme possède six ddl (donc un minimum de sept câbles), les débattements en position et en rotation ayant été prescrits dès le début du projet, et qu'il est requis d'éviter les interférences liées à la présence de câbles en mouvement dans cet espace de travail. Alors, pour ce faire, une méthode logique est de minimiser le nombre de câbles par plate-forme. Cependant, s'il survient un contact avec un câble lors d'une trajectoire, il serait sécuritaire d'avoir au moins une redondance d'actionnement, ce qui permettrait théoriquement de pouvoir relâcher un câble par plate-forme tout en conservant le minimum de sept câbles en tension. De

plus, l'ajout d'un ou de plusieurs câbles permet en général d'augmenter l'espace de travail du mécanisme à l'étude [18, 24] et de mieux répartir la distribution de tensions dans les câbles (valeurs de tensions moindres). Par conséquent, il a été décidé d'utiliser un mécanisme parallèle à six ddl entraîné à l'aide de huit câbles comme solution de départ.

Par la suite, une fois l'idée générale établie, il faut définir les coordonnées des points d'attache sur la base, la géométrie de cette base, la géométrie de l'effecteur et les coordonnées des points d'attache sur cet effecteur. Pour simplifier la chose, un prisme rectangulaire a été choisi pour représenter la plate-forme ainsi que la base, les points d'attache se trouvant à proximité des sommets et/ou sur les arêtes de ces deux prismes. De plus, pour obtenir la possibilité d'atteindre les plages de rotation demandées, certains câbles ont été croisés tel que présenté, pour un mécanisme plan, à la figure 1.4. Donc, dans un même ordre d'idées, la figure 1.5 représente la projection de ce concept pour un mécanisme spatial à six ddl. En fait, cette figure résume la solution initiale pour une seule plate-forme et il est à noter que cette solution est inspirée des idées proposées par l'ingénieur de recherche du Laboratoire de robotique de l'Université Laval, M. Thierry Laliberté (voir figure 1.6). Finalement, il faut préciser que les axes du repère de la figure 1.5 sont parallèles aux arêtes du prisme rectangulaire représentant la plate-forme (effecteur) de ce mécanisme.

En somme, les figures 1.5 et 1.7 présentent la géométrie générale servant de solution initiale dans le cadre de cette étude. La première illustre une vue tridimensionnelle d'une seule plate-forme (celle de droite) à l'intérieur de la charpente externe. Cette charpente est constituée d'un prisme rectangulaire dont les dimensions sont de $4 \times 4 \times 3$ mètres (longueur \times largeur \times hauteur). La géométrie du parallélépipède composant l'effecteur est choisie pour être en mesure de contenir les dimensions d'un pied humain moyen. Donc, ces dimensions sont de $0,35 \times 0,15 \times 0,15$ mètre. Ces deux composantes sont reliées en parallèle à l'aide de huit câbles et il faut noter que ceux en traits discontinus sont orientés vers le bas de la charpente et que ceux en lignes continues sont orientés vers le haut. De plus, les cercles représentent l'emplacement des moteurs et des enrouleurs tandis que les points illustrent l'emplacement des points d'attache des câbles sur la plate-forme. Ensuite, la figure 1.7 montre une vue de dessus du système contenant les deux plates-formes. Les composantes de couleur pâle appartiennent à la plate-forme de gauche. Les points carrés à l'intérieur de chaque effecteur marquent le centre géométrique des plates-formes ainsi que la position de l'origine du repère mobile

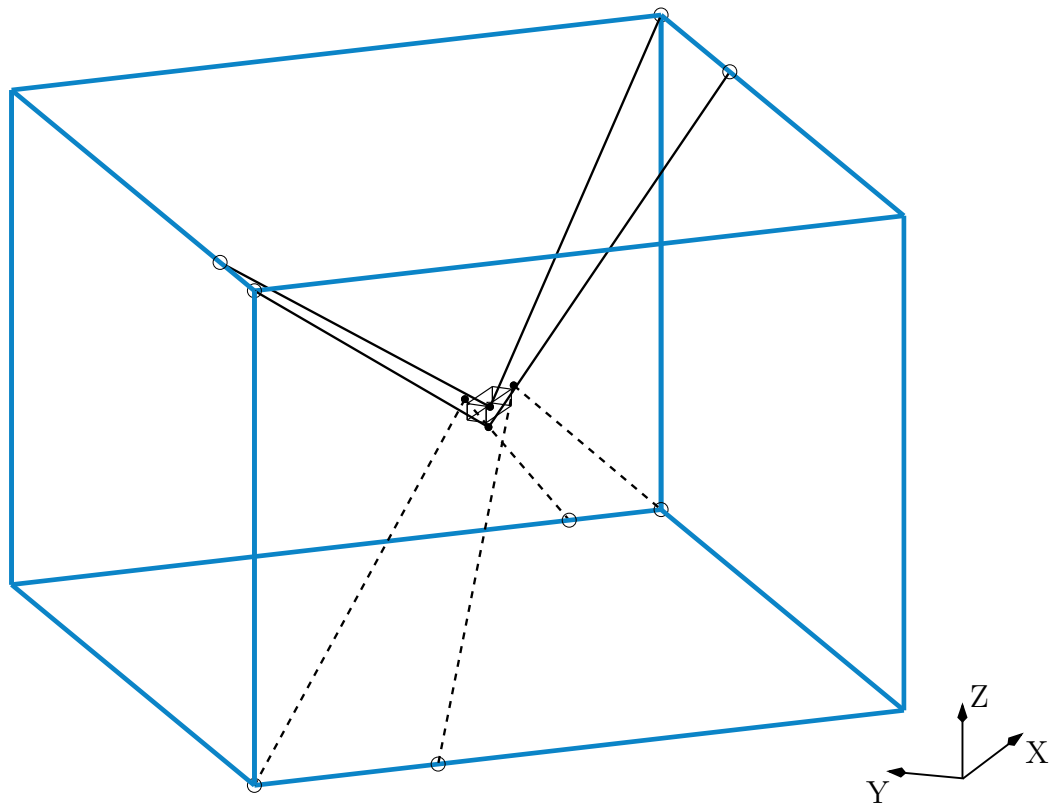


FIG. 1.5 – Solution initiale : vue tridimensionnelle du manipulateur parallèle à six ddl entraîné par huit câbles.

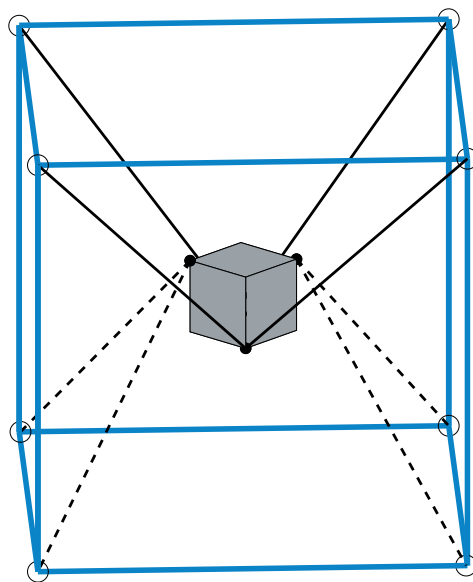


FIG. 1.6 – Représentation schématique du concept de base.

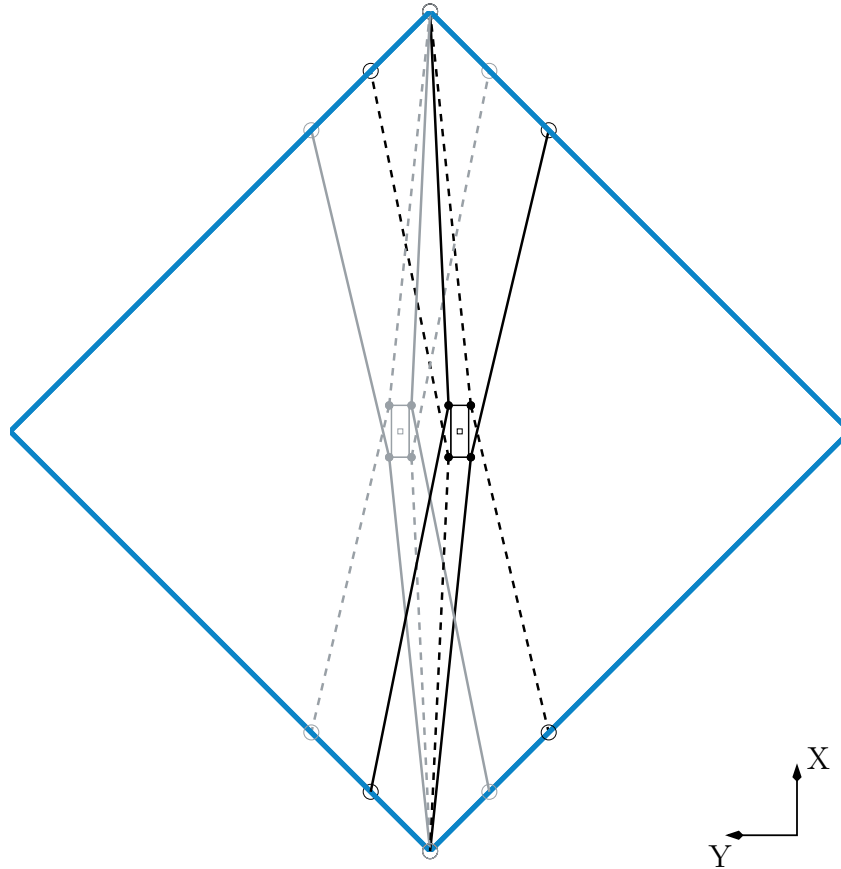


FIG. 1.7 – Solution initiale : vue de dessus du système global.

\mathcal{O}' lié à chacune d'elle. Finalement, il est à noter que les coordonnées exactes de la position des points d'attache sont disponibles à l'annexe A de même que celles de tous les mécanismes étudiés dans ce mémoire.

Cette solution constitue un bon point de départ pour les analyses de cette étude. Les résultats obtenus pour ce mécanisme seront présentés et comparés lors du choix de la solution finale au chapitre 3.

1.5 Conclusion

En résumé, ce chapitre se devait de présenter la problématique du projet de conception d'une plate-forme de marche actionnée par câbles. Tout d'abord, la notation et les unités utilisées tout au long de ce mémoire ont été explicitées. Par la suite, la des-

cription du projet fut élaborée et a permis de mieux comprendre les contraintes liées à la conception d'une telle interface de locomotion. Les exigences par rapport aux performances du système sont établies en expliquant en détail le cahier des charges du projet ainsi que les objectifs à atteindre. Ensuite, le choix de la solution initiale étant une étape primordiale pour le bon déroulement de cette étude, les hypothèses imposées ainsi que les particularités liées à l'analyse des mécanismes à câbles ont été décrites. Ces dernières, accompagnées de la connaissance des avantages et des inconvénients de l'utilisation de ce type de manipulateur, ont mené à la détermination d'une géométrie simple mais réfléchie d'un robot parallèle à six ddl entraîné à l'aide de huit câbles qui servira de base lors des analyses de ce mémoire.

Une fois le choix fixé sur une géométrie initiale, avant même de débiter les analyses, il est nécessaire de définir les critères qui serviront à évaluer les performances de chacune des architectures testées dans l'optique de trouver un mécanisme, le plus optimal possible, qui permettra d'atteindre les exigences prescrites en début de projet. Ces dernières étapes précédant les analyses sont en fait le principal sujet du prochain chapitre.

Chapitre 2

Outils et techniques d'optimisation géométrique

Ce chapitre résume les différentes techniques utilisées pour l'optimisation géométrique dans cette étude. La détermination générale du problème géométrique inverse des mécanismes parallèles entraînés par câbles est d'abord élaborée. Ensuite, les différents critères de performance et les tests requis pour optimiser les géométries sont énumérés et expliqués. Finalement, les méthodologies d'analyse qui ont été expérimentées lors de ce travail sont présentées.

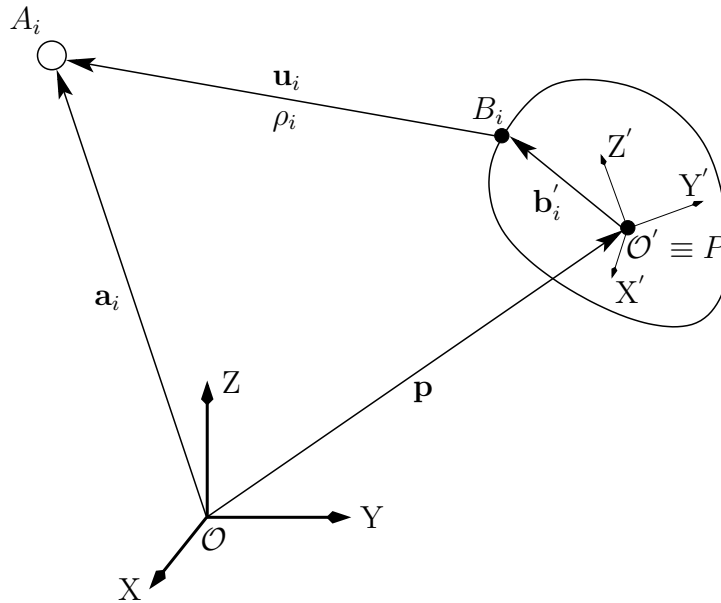


FIG. 2.1 – Modèle cinématique d'un mécanisme parallèle entraîné par câbles.

Tout d'abord, avant de présenter de manière exhaustive les différents critères de performance liés à l'optimisation géométrique, il est nécessaire d'élaborer les notions théoriques qui correspondent au phénomène physique étudié.

2.1 Problème géométrique inverse des mécanismes entraînés par câbles

En premier lieu, la figure 2.1 démontre les relations vectorielles permettant de définir la pose de l'effecteur dans un environnement à six ddl. Cette illustration aidera à saisir les expressions mathématiques qui suivront. De plus, il est possible d'effectuer la projection de cette dernière figure vers le schéma de la figure 2.2 qui représente l'assemblage mécanique général d'un manipulateur parallèle entraîné à l'aide de câbles.

La première figure (figure 2.1) montre les éléments qui vont permettre entre autres de déterminer la longueur des câbles requise pour atteindre une pose prescrite à l'effecteur (communément nommé plate-forme dans le contexte du présent projet). Chacun de ces éléments est d'ailleurs énuméré ci-dessous :

- le vecteur \mathbf{a}_i représente la position de l'enrouleur A_i dans le repère global \mathcal{O} lié à

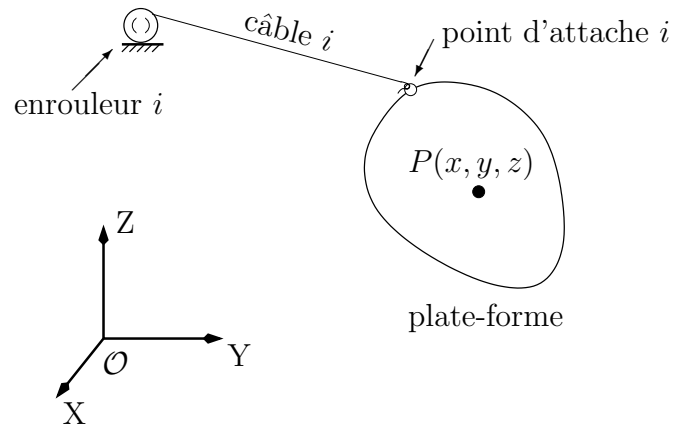


FIG. 2.2 – Liaison typique d'un mécanisme parallèle entraîné par câbles.

la base ;

- le vecteur \mathbf{b}'_i représente la position du point d'attache B_i dans le repère mobile \mathcal{O}' lié à la plate-forme ;
- le vecteur $\mathbf{p} = [x \ y \ z]^T$ représente la position de la plate-forme P dans le repère global ;
- le vecteur \mathbf{u}_i représente le vecteur défini du point B_i au point A_i le long du câble i dans le repère global ;
- le scalaire ρ_i représente la norme (la coordonnée articulaire) du câble i .

Le problème géométrique inverse (PGI) étant de déterminer les composantes du domaine articulaire permettant d'imposer une configuration connue de l'effecteur dans le domaine cartésien, il est donc nécessaire de trouver une équation vectorielle, à l'aide du schéma de la figure 2.1, reliant le scalaire ρ_i aux autres éléments proposés.

Il faut noter que ce dernier scalaire est une notation utilisée qui est équivalente à un scalaire u_i qui serait obtenu en déterminant la norme du vecteur \mathbf{u}_i :

$$\rho_i = u_i = \|\mathbf{u}_i\| \quad (2.1)$$

Pour élaborer le PGI, il est requis de définir une relation effectuant le passage du repère mobile \mathcal{O}' lié à l'effecteur du robot au repère global \mathcal{O} (le repère de travail en général). Dans cette optique, la notion de matrice ou de tenseur de rotation est utilisée. Selon la convention des angles d'Euler, il y a douze possibilités de suites différentes de rotations pour passer d'une orientation initiale vers une autre. Donc, tel qu'il est indiqué à la section 1.3, la convention des triplets d'angles d'Euler utilisée dans ce document est celle décrite par la série ZYX. Cette suite dicte une série de trois rotations simples et

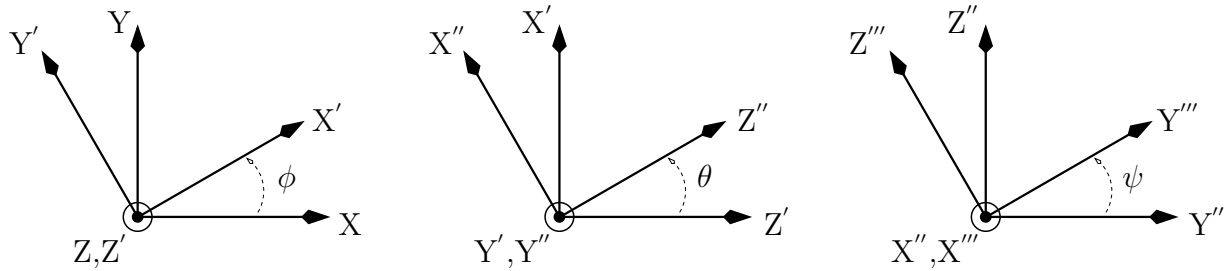


FIG. 2.3 – Série de rotations reliée à la convention d'angles d'Euler ZYX.

successives autour de trois axes différents. La figure 2.3 montre les diverses étapes pour atteindre une orientation finale selon la convention choisie.

Par ailleurs, il faut préciser que cette convention n'a pas été choisie arbitrairement. En effet, elle correspond à une suite intuitive de rotations pour définir l'orientation du pied à un instant donné selon un repère fixe. Donc, la première rotation est intuitivement celle de lacet au niveau du pied, ensuite celle en tangage et finalement celle en roulis. La figure 2.4 résume ces propos en montrant la projection de la convention utilisée sur un modèle DAO en trois dimensions d'un pied humain¹.

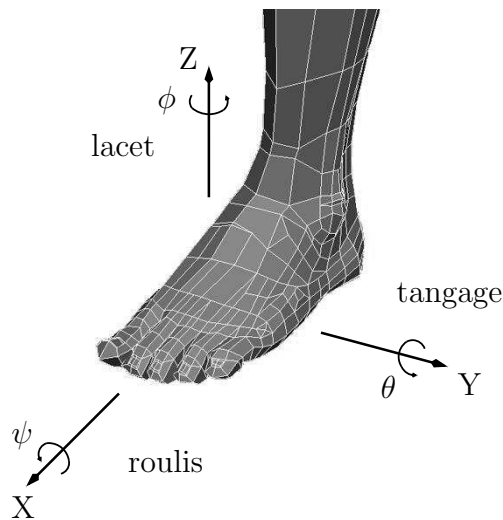


FIG. 2.4 – Représentation des trois axes de rotation à l'aide d'une modélisation tridimensionnelle d'un pied humain.

En multipliant les trois matrices de rotation obtenues pour passer du repère initial au premier repère intermédiaire, du premier repère intermédiaire au deuxième et du deuxième vers le repère final, il est possible d'obtenir une matrice de rotation globale qui relie le repère mobile (repère initial) au repère fixe ou global (repère final). Cette

¹Ce modèle provient du site web http://www.3d.sk/tutorials/Modeling_a_foot_in_Maya.htm.

opération mathématique est élaborée ci-dessous :

$$\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_Z = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi & 0 \\ \sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\mathbf{Q}_2 = \mathbf{Q}_Y = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\mathbf{Q}_3 = \mathbf{Q}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & -\sin \psi \\ 0 & \sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Alors, la matrice de rotation globale est déterminée comme suit :

$$\mathbf{Q}_{globale} = \mathbf{Q} = \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \mathbf{Q}_3 = \mathbf{Q}_Z \mathbf{Q}_Y \mathbf{Q}_X \quad (2.5)$$

et les différents éléments composant cette matrice \mathbf{Q} sont exprimés ci-dessous (où $c(\cdot) \equiv \cos(\cdot)$ et $s(\cdot) \equiv \sin(\cdot)$) :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} c(\phi)c(\theta) & -s(\phi)c(\psi) + c(\phi)s(\theta)s(\psi) & s(\phi)s(\psi) + c(\phi)s(\theta)c(\psi) \\ s(\phi)c(\theta) & c(\phi)c(\psi) + s(\phi)s(\theta)s(\psi) & -c(\phi)s(\psi) + s(\phi)s(\theta)c(\psi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\psi) & c(\theta)c(\psi) \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Dorénavant, en ayant comme outil cette relation, il est possible de projeter un vecteur exprimé à partir d'un repère mobile vers un repère global en le prémultipliant par ce tenseur de rotation.

Donc, à la suite de ces préparations théoriques, il est maintenant aisé de représenter sous la forme d'une équation vectorielle le PGI d'un mécanisme parallèle à câbles. Pour ce faire, le vecteur \mathbf{u}_i (vecteur supposé inconnu) doit être premièrement exprimé à l'aide des composantes connues telles que la position \mathbf{p} et l'orientation \mathbf{Q} de l'effecteur, le vecteur \mathbf{a}_i et le vecteur \mathbf{b}'_i . Cette relation s'écrit comme suit :

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i \quad (2.7)$$

Par contre, ce n'est pas exactement le vecteur \mathbf{u}_i qui est recherché, mais bien la norme de ce dernier qui est le scalaire ρ_i (longueur du $i^{\text{ième}}$ câble). Ainsi, cette valeur est donnée par l'équation suivante :

$$\rho_i = \|\mathbf{u}_i\| = \sqrt{(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)} \quad (2.8)$$

De cette manière, à tout moment, les coordonnées articulaires (longueur de chaque câble) nécessaires pour prescrire une pose (position et orientation) à l'effecteur du mécanisme parallèle à câbles sont connues.

La prochaine section décrit les différentes manières utilisées dans le cadre de cette maîtrise pour évaluer les performances des mécanismes. Les notions présentées jusqu'ici serviront à établir les critères proposés à l'intérieur des prochaines sections, entre autres lors de la détection des interférences présentée à la section 2.2.2.

2.2 Techniques d'optimisation

Dans l'optique d'obtenir un mécanisme permettant d'atteindre les objectifs prescrits en début de projet, il est nécessaire, vu la minime chance de choisir arbitrairement une géométrie et que celle-ci soit du même coup optimale, de trouver un moyen d'augmenter les performances du mécanisme mis à l'étude. Ceci est bien entendu dans le but ultime de créer le système optimal pour une application donnée. Alors, la section suivante contient la définition des critères de performance sélectionnés pour évaluer les mécanismes envisagés. Il faut ajouter que dans un monde parfait, tous les prochains critères et tests auraient été déterminés en début de projet, cependant le projet ne s'est pas déroulé ainsi. En effet, les mécanismes qui seront présentés ultérieurement n'ont pas eu la chance de profiter d'une méthode d'optimisation aussi complète et le prochain chapitre en discutera plus en détail. Pour l'instant, la section suivante propose une description de l'ensemble des tests qui ont été définis au cours de cette maîtrise.

2.2.1 Sélection des critères de performance

Une des parties les plus importantes lors d'une analyse de performance est sans aucun doute le choix des critères d'évaluation eux-mêmes. Lorsque ces critères de sélection ou d'optimisation sont bien définis, ceux-ci permettent de quantifier l'efficacité de l'architecture selon un objectif particulier ou encore de reproduire théoriquement les conditions d'utilisation du système à l'étude. Les interactions physiques entre les différentes composantes mécaniques ou l'ensemble des efforts auxquels le mécanisme

sera confronté lors d'essais expérimentaux font entre autres partie de ces conditions d'utilisation. Celles-ci sont bien sûr simplifiées par l'application des hypothèses déjà établies. Ainsi, la performance de chaque mécanisme analysé par le biais de ces critères se reflète par une valeur ou un résultat spécifique qui doit être minimisé ou maximisé selon l'identité même du critère.

Diverses techniques de conception ont été utilisées dans la littérature en ce qui a trait aux mécanismes à câbles. En ce sens, quelques exemples peuvent être cités tels que l'optimisation par le biais de l'évaluation de l'espace atteignable statique pour l'équilibre du seul poids de l'effecteur [4, 18, 39], l'espace atteignable statique pour l'équilibre de forces et de moments arbitraires [43, 46], l'espace de travail dynamique [6], l'espace de travail en translation avec des orientations fixes [29], la détection des différentes interférences possibles [29, 43, 46] et aussi la détermination de la dextérité globale du mécanisme [18, 39].

La technique choisie pour cette étude représente une approche regroupant plusieurs critères compris dans ceux qui ont été proposés ci-haut. En effet, cette méthodologie contient deux niveaux d'évaluation pour les mécanismes et elle est décrite ci-dessous. Le premier niveau comprend un moyen de déterminer un sous-ensemble de l'espace de travail dans lequel tous les torseurs (forces et moments) appliqués à l'effecteur peuvent être équilibrés.

2.2.1.1 Espace des poses polyvalentes

Un des critères importants de cette étude est la maximisation de l'Espace des Poses Polyvalentes (EPP). Cette théorie est expliquée en détail pour les mécanismes parallèles plans à l'aide des références suivantes [21, 23, 24]. La matière relative aux mécanismes comprenant six ddl est démontrée plus spécifiquement au chapitre 4 de la thèse de Marc Gouttefarde [23] et à l'aide de l'article [22]. Par conséquent, dans le cadre de ce mémoire, seulement une brève explication sera présentée, car l'accent sera plutôt mis sur son utilisation lors de l'optimisation d'une géométrie.

L'espace des poses polyvalentes est défini comme l'ensemble des poses (positions et orientations) dans lesquelles l'effecteur est en mesure d'équilibrer tous les torseurs possibles (forces et moments) en tendant la totalité ou une combinaison de ses câbles. Ce moyen d'étudier le mécanisme fait abstraction des tensions mises en jeu et il se base

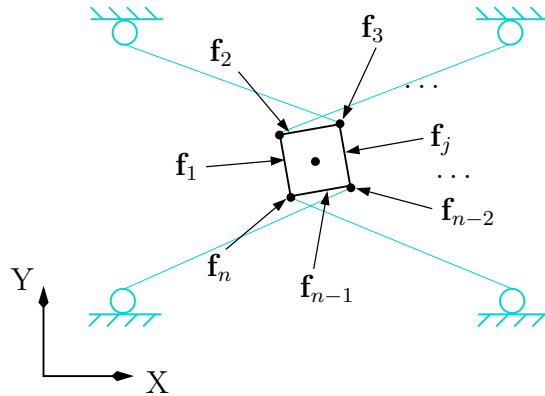


FIG. 2.5 – Torseurs arbitraires pouvant être équilibrés à l’effecteur d’un mécanisme plan entraîné par câbles.

strictement sur la géométrie de l’architecture. Par conséquent, cette méthode fait appel à une analyse purement mathématique du phénomène.

En somme, il est simple de réaliser que cette technique vérifie le comportement statique du système. C’est-à-dire qu’elle permet de savoir si la géométrie peut équilibrer d’une manière quelconque à l’aide de ses câbles l’ensemble des torseurs applicables à son effecteur lorsque ce dernier est fixé en une pose donnée. La figure 2.5 illustre bien le concept projeté sur un mécanisme parallèle plan à trois ddl entraîné à l’aide de quatre câbles. Il y est observé, pour une seule pose $\mathbf{p} = [x \ y \ \phi]^T$ du manipulateur, divers torseurs aléatoires $\mathbf{f} = [f_x \ f_y \ \tau_z]^T$ que le système doit équilibrer pour faire partie de cet espace (il faut noter qu’il était impossible de représenter l’infinité de tous les torseurs possibles à l’intérieur de la figure, donc seulement une infime portion de cet ensemble est proposée strictement à titre d’exemple visuel).

Dans le cadre de cette étude, les mécanismes étudiés comportent six ddl (contrairement à l’exemple de la figure 2.5 qui en comporte seulement trois) et donc les vecteurs des torseurs sont exprimés sous la forme suivante :

$$\mathbf{f} = \left[f_x \ f_y \ f_z \ \tau_x \ \tau_y \ \tau_z \right]^T \quad (2.9)$$

En supplément, il est intéressant de noter que cet espace se distingue de l’espace dynamique, étudié par Guillaume Barrette [5, 7], par le biais de l’évaluation utilisant l’équilibre statique au lieu de prendre en compte les effets inertiels du système. De plus, il faut mentionner qu’un critère utilisant l’EPP est très exigeant au niveau des performances d’un mécanisme et qu’il ne veut pas nécessairement dire que cette architecture

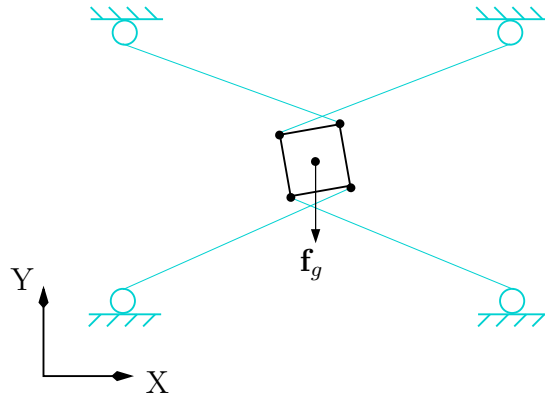


FIG. 2.6 – Torseur engendré par le poids de l’effecteur d’un mécanisme plan entraîné par câbles.

ne peut pas effectuer un travail adéquat dans un espace de travail même si ce dernier n’est pas couvert par l’EPP. Par contre, ce critère amène un certain niveau de sécurité au système car, lorsque couverture il y a, l’EPP assure que tous les efforts appliqués à la plate-forme peuvent être équilibrés.

La section ci-dessous présente le second critère d’optimisation. Celui-ci est en fait un espace de travail qui englobe l’EPP de par sa nature moins contraignante.

2.2.1.2 Espace des poses de compensation gravitationnelle

Le deuxième niveau d’évaluation de cette étude est la détermination de l’Espace des Poses de Compensation Gravitationnelle (EPCG). Celui-ci est un volume comprenant l’EPP par le fait qu’il vérifie l’équilibre d’un seul torseur au lieu de l’ensemble des torseurs possibles. Le torseur choisi en est un de sécurité (torseur minimum devant être équilibré), c’est-à-dire qu’il permet de savoir si un vecteur d’efforts en particulier peut être équilibré selon toutes les poses évaluées. Ce torseur est créé à partir du vecteur de force lié au poids de l’utilisateur de même que celui de la plate-forme. Ainsi, il faut rappeler que la norme de ce vecteur n’a pas d’importance vu que la théorie utilisée ne considère pas les tensions nécessaires dans les câbles. La figure 2.6 démontre l’idée globale de ce critère de performance associée à un manipulateur plan. Ainsi, le torseur s’appliquant dans la direction de l’accélération gravitationnelle est le suivant :

$$\mathbf{f}_g = \begin{bmatrix} 0 & -mg & 0 \end{bmatrix}^T \quad (2.10)$$

et ce dernier doit être équilibré en prenant toute les poses possibles dans l’espace de travail prescrit.

Nécessairement, selon la nature de ces deux critères, l'EPCG devrait toujours être plus étendu que l'EPP. Cependant, il est possible, dans une situation particulière, que les deux couvertures soient semblables. Ce cas précis peut apparaître si et seulement si le torseur \mathbf{f}_g ne peut pas être équilibré en dehors de l'EPP. De plus, imaginant le cas où l'EPP ne couvrirait pas totalement l'espace de travail prescrit, il serait alors souhaité que l'EPCG tende à couvrir l'ensemble de ce même volume. Cette dernière affirmation permettrait d'être assuré que le poids de l'utilisateur peut, selon l'ensemble des combinaisons d'orientation, être supporté par le système en tout temps. Il va de soi que ce volet de sécurité est très important pour un mécanisme qui devra inclure un être humain à son bord.

Enfin, la technique de visualisation des résultats de ces deux critères est similaire et elle est basée sur une évaluation par nuages de points. C'est-à-dire que l'espace de travail désiré est discrétisé pour obtenir un échantillon acceptable en frais de temps de calcul. Donc, en général, les trois axes de déplacements sont divisés pour obtenir un échantillon de 1 000 points (centré à la position $x = 0$, $y = 0$ et une hauteur z préalablement établie dans le repère global \mathcal{O}). L'algorithme utilisé pour évaluer les mécanismes est basé sur la théorie de l'Espace des Poses Polyvalentes à Orientation Constante (EPPOC) et il est défini de sorte qu'il permet d'évaluer une pose d'un mécanisme en tenant compte d'une orientation constante [21, 22, 23, 24]. Alors, il est requis de compiler en boucle l'algorithme précédemment discuté pour prendre en compte les différentes orientations voulues.

Dans le cadre de cette étude, en se rapportant au tableau 1.1, les déplacements angulaires limites devant être atteints avec le mécanisme solution sont connus. Par conséquent, dans le but de minimiser le nombre de calculs requis, seulement les valeurs extrêmes, passant par celles de référence ($\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ et $\psi = 0^\circ$), sont évaluées en ce qui a trait aux rotations. En somme, l'espace de travail en position est réduit en général à 1 000 positions et celui en orientation est borné à 27 combinaisons d'orientation. Ainsi, chaque fois que l'EPP ou l'EPCG d'un mécanisme doit être connu, 27 000 poses différentes (27 orientations différentes pour chacune des 1 000 positions) sont vérifiées. Il faut préciser que cette méthode numérique ne garantit pas que toutes les configurations dans l'espace résultant sont atteignables. Cependant, il est tout de même raisonnable de le supposer.

La représentation des résultats ainsi obtenue est effectuée en illustrant l'espace

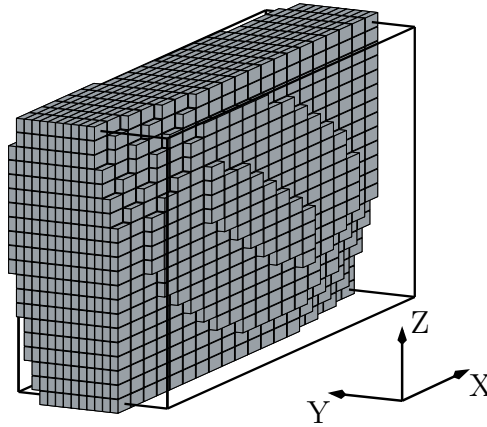


FIG. 2.7 – Résultat découlant de l'évaluation de l'EPP du mécanisme de la figure 1.5.

couvert à l'intérieur du volume de travail prescrit. L'empilement de parallélépipèdes est proposé pour mieux visualiser l'EPP et l'EPCG de chaque mécanisme. La figure 2.7 illustre un exemple de résultat obtenu lors de l'évaluation de l'EPP (débattements angulaires de $\phi = \pm 20^\circ$, $\theta = \pm 20^\circ$ et $\psi = \pm 20^\circ$) du mécanisme solution initial à l'intérieur de l'espace de travail prescrit (environ 66,8 % de cet espace est couvert par l'EPP en analysant 216 000 poses (8 000 positions et 27 orientations)). Il est à noter qu'une représentation à l'aide d'un simple nuage de points a été proposée lors de la présentation d'une affiche réalisée par l'auteur dans le cadre d'une conférence portant sur les systèmes intelligents (IS2006) [37]. Cependant, cette première avenue ne présentait pas l'avantage de visualiser les reliefs présents à la surface de l'espace résultant. Par conséquent, l'utilisation des simples points a été remplacée par celle des prismes rectangulaires.

La séquence de l'algorithme permettant d'obtenir de tels résultats est résumée ci-dessous :

1. Discrétisation des trois arêtes de l'espace de travail prescrit pour obtenir 1 000 positions en général (8 000 dans le cas présenté à la figure 2.7).
2. Discrétisation des trois axes de rotation pour obtenir 27 combinaisons d'orientation (combinaisons considérant les valeurs extrêmes et celles de référence).
3. Début du test en fixant l'orientation de l'effecteur suivant une combinaison pré-établie.
4. Évaluation, en chaque point du nuage créé à l'étape 1, si cette pose précise est à l'intérieur de l'EPPOC.

5. Modification de l'orientation, retour à l'étape 4 et ainsi de suite pour toutes les combinaisons d'orientation.
6. Intersection de tous les EPPOC calculés pour obtenir une approximation de l'EPP de ce mécanisme pour les plages de rotation et de position désirées.
7. Représentation du nuage de points (ou de prismes rectangulaires) illustrant l'EPP de l'architecture à l'étude à l'intérieur de l'espace de travail prescrit et détermination du pourcentage de couverture du nuage par rapport à l'espace désiré.

L'énumération des étapes constituant cet algorithme clôt cette section en élaborant la méthodologie à suivre pour évaluer les performances des mécanismes. Il faut préciser que cet algorithme est adéquat pour la détermination tant de l'EPP que de l'EPCG.

Enfin, pour compléter la définition des tests à imposer aux différentes architectures dans le but de les améliorer, la prochaine section contient la théorie permettant de prévoir les lieux de contacts entre les différents éléments d'un système dans l'optique de modifier sa géométrie de manière adéquate pour mieux les éviter.

2.2.2 Détection des interférences

Une des particularités désavantageuses des mécanismes parallèles à câbles est la nécessité d'une redondance d'actionnement pour pleinement contraindre le système. Cette dernière entraîne une complexité accrue du contrôle de ces mécanismes et un risque élevé de l'apparition de contacts entre les câbles lors de l'exécution de trajectoires spécifiques. Il va de soi que pour être en mesure d'utiliser la pleine capacité de ce type de système, il faut être capable de gérer efficacement ces interférences et/ou de pouvoir les éviter au maximum. L'approche choisie pour cette étude de conception est celle de minimiser les lieux de contacts entre les câbles eux-mêmes ainsi que ceux entre les câbles et les différentes composantes de la structure mécanique.

Quelques laboratoires utilisent déjà cette approche de vérification des interférences pour des objectifs similaires à ceux de ce travail tels que pour soutenir la conception de mécanismes à câbles [31] et pour déterminer un espace de travail qui est libre de tous contacts [33]. Cette évaluation est très importante pour la conception d'un mécanisme entraîné à l'aide de câbles, car elle permet de minimiser les risques de retrouver

des zones contenant des contacts entre les différentes parties du système lors de trajectoires variées. Évidemment, il n'est pas possible d'être complètement certain qu'un mécanisme ne présentera aucune interférence peu importe la trajectoire imposée. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'un certain nombre de trajectoires représentatives d'une utilisation expérimentale du système doivent être précisées. Celles-ci doivent couvrir la majorité des situations réelles dans lesquelles le mécanisme devra oeuvrer. Par contre, une attention particulière doit être prise quant à la fréquence d'échantillonnage des trajectoires construites, car leur discrétisation doit être suffisamment fine pour ne pas infliger des erreurs de résultats relatives à la détermination des interférences sans, d'un autre côté, engendrer des temps de calculs excessifs. À titre d'exemple, même si la possibilité de contacts à l'intérieur d'un parcours liant deux poses de l'effecteur est prévisible, ces quelques indices seuls ne sont pas suffisants pour confirmer l'obtention d'une interférence. La trajectoire que l'effecteur suit peut s'exécuter de manière à contourner les zones risquées. Donc, il va de soi qu'il est requis de suivre pas à pas l'évolution de la pose des plates-formes pour s'assurer de l'existence ou non d'un contact entre deux entités. Plus la fréquence d'échantillonnage sera fine, plus le risque d'erreurs relié à la détermination des interférences sera réduit. De cette manière, une conception qui tend à minimiser les lieux de contacts à l'intérieur d'un espace de travail que l'on a préalablement défini est permise.

Pour ce faire, il faut cependant définir les équations qui permettront de réaliser ce travail. Par conséquent, la section suivante propose la théorie utilisée dans le cadre de ce mémoire pour déterminer le lieu et l'instant précis auxquels un contact quelconque aurait lieu.

2.2.2.1 Méthode de détection

Les expressions mathématiques qui soutiennent la méthode utilisée sont tirées en partie du rapport de stage d'un étudiant en génie électrique (M. Patrice Lambert) au sein du Laboratoire de robotique de l'Université Laval à l'hiver 2004. Elles sont expliquées ci-dessous de manière exhaustive en se basant sur la figure 2.8. Cette illustration représente les liens vectoriels reliant les différentes composantes en jeu lors d'un éventuel contact mécanique entre deux entités quelconques. Par exemple, dans le cas d'un contact entre deux câbles, les points A_i montrent la position des enrouleurs fixés sur la charpente du système et les points B_i donnent quant à eux la position des points d'attache des câbles sur la(es) plate(s)-forme(s) (il faut préciser qu'une interférence peut

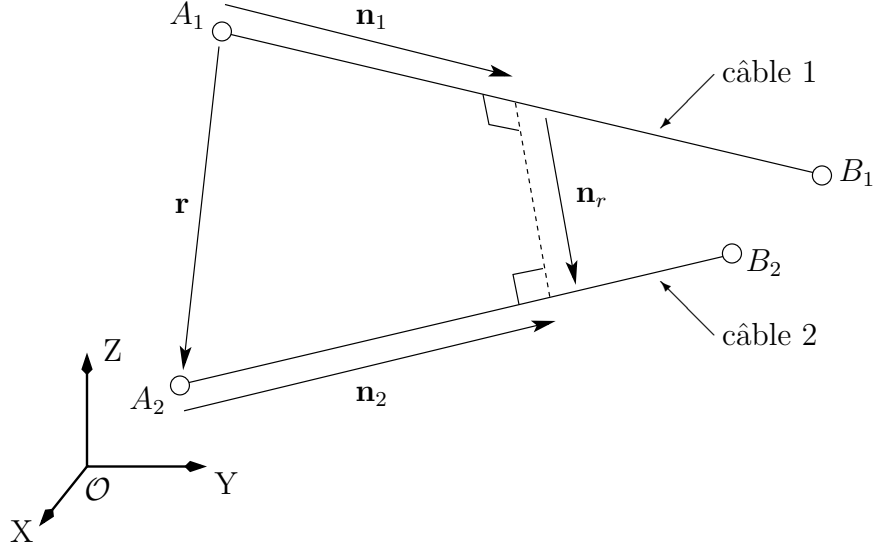


FIG. 2.8 – Représentation vectorielle de la détection des interférences mécaniques.

avoir lieu entre deux câbles du même effecteur ou de deux plates-formes différentes ou encore avec une partie rigide de l'un ou l'autre des effecteurs). Les vecteurs \mathbf{n}_1 et \mathbf{n}_2 représentent la position du point de contact (ou du moins de l'endroit où la distance entre les deux entités est à son minimum) suivant leur câble respectif. Enfin, le vecteur \mathbf{r} relie la position de chacun des deux enrouleurs, c'est-à-dire de l'enrouleur du câble 1 vers celui du câble 2. Finalement, \mathbf{n}_r désigne le vecteur reliant les deux câbles étudiés. Ce dernier passe par la droite qui minimise la distance entre ces deux entités. Cette affirmation est basée sur le fait que ce vecteur est déterminé à partir du produit vectoriel de \mathbf{n}_1 et de \mathbf{n}_2 tel que montré ci-dessous :

$$\mathbf{n}_r = n_r \mathbf{n}_r^* = n_r \frac{(\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2)}{|\mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2|} \quad (2.11)$$

De cette manière, il est assuré que le vecteur \mathbf{n}_r suit une direction perpendiculaire aux deux vecteurs précédents et qu'ainsi, il constitue un vecteur orienté suivant la direction du vecteur unitaire \mathbf{n}_r^* . De plus, le vecteur \mathbf{n}_r présente une norme qui correspond à la distance minimale n_r entre les deux droites. Alors, suivant la représentation vectorielle de la figure 2.8, il est possible d'établir un système d'équations en parcourant le chemin vectoriel illustré. Cette formulation est donnée par ce qui suit :

$$\mathbf{n}_1 + \mathbf{n}_r - \mathbf{n}_2 - \mathbf{r} = 0 \quad (2.12)$$

De manière équivalente, il peut être écrit que :

$$n_1 \mathbf{n}_1^* + n_r \mathbf{n}_r^* - n_2 \mathbf{n}_2^* = \mathbf{r} \quad (2.13)$$

où n_1 , n_r et n_2 sont des scalaires représentant la norme de leur vecteur respectif. Ces derniers expriment la position du contact (ou la distance minimale) entre deux entités (câbles ou arêtes de la structure). De plus, les vecteurs \mathbf{n}_i^* sont les vecteurs unitaires suivant la direction des vecteurs \mathbf{n}_i . Enfin, il est possible d'exprimer le système d'équations (2.13) sous une forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{n}_1^* & \mathbf{n}_r^* & -\mathbf{n}_2^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_1 \\ n_r \\ n_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{r} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Ainsi, ces équations suivent une formulation familière soit :

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b} \quad (2.15)$$

dans laquelle chacun des éléments de la matrice \mathbf{A} ainsi que du vecteur \mathbf{b} doivent être connus pour déterminer les inconnues représentées par les éléments du vecteur \mathbf{x} .

En effet, il est facile de déterminer les composantes des trois vecteurs unitaires grâce à la connaissance exacte de la position des enrouleurs et des points d'attache des plates-formes à chaque pas de temps. Donc, ce fait additionné à la résolution du PGI, présentée à la section 2.1, permet de trouver les vecteurs unitaires \mathbf{n}_1^* et \mathbf{n}_2^* à l'aide de l'expression qui suit :

$$\mathbf{n}_i^* = \frac{\mathbf{u}_i}{\rho_i} \quad (2.16)$$

Puisque le vecteur unitaire \mathbf{n}_r^* est déterminé de manière similaire à la relation (2.11) tel que $\mathbf{n}_r^* = (\mathbf{n}_1^* \times \mathbf{n}_2^*) / |\mathbf{n}_1^* \times \mathbf{n}_2^*|$ et que le vecteur \mathbf{b} est équivalent au vecteur \mathbf{r} , le système d'équations peut être résolu théoriquement à l'aide de la relation suivante :

$$\mathbf{x} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{b} \quad (2.17)$$

où

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} n_1 & n_r & n_2 \end{bmatrix}^T \quad (2.18)$$

Cependant, l'équation (2.17) contient une opération d'inversion de matrice. Celle-ci est utilisée adéquatement sous un oeil théorique, mais il s'avère qu'elle comporte plusieurs désavantages lors de son application à une résolution numérique telle qu'une faible précision lorsque la matrice en question est presque singulière et donc lorsqu'elle

possède un mauvais conditionnement [20]. Pour pallier à cet inconvénient, une méthode alternative est d'utiliser une élimination gaussienne à la place de l'inverse. Ceci résulte en un temps de calcul moindre ainsi qu'en une précision numérique accentuée [42]. Donc, cette manière de faire est beaucoup plus appropriée pour des calculs itératifs de ce type.

Dans un autre ordre d'idées, il faut ajouter que dans le cas où le contact a lieu entre un câble et une arête de la structure mobile du mécanisme, la seule modification à apporter est que les équations reliées à l'arête de la structure (supposée similaire à un câble de longueur constante) soit posées à la place de celles du deuxième câble.

Maintenant que ces expressions sont établies, les cas possibles et les conditions précises menant à la détermination d'une interférence réelle entre deux entités doivent être spécifiés. Premièrement, trois cas différents peuvent survenir dans ce genre de calcul :

1. Aucune interférence n'est détectée lors de la trajectoire.
2. Une ou plusieurs interférences sont détectées, mais elles sont de nature virtuelle.
3. Une ou plusieurs interférences sont détectées et au moins une est de nature réelle.

Deuxièmement, trois conditions sont nécessaires à l'obtention du cas 3. En fait, cette situation particulière est dictée de la manière suivante :

Il y a présence d'une interférence réelle si et seulement si les trois conditions suivantes sont observées :

- 1) $0 \leq n_1 \leq \text{longueur de l'entité 1}$
 - 2) $0 \leq n_2 \leq \text{longueur de l'entité 2}$
 - 3) $|n_r| \leq \epsilon$ ou \mathbf{n}_r change de sens entre 2 points consécutifs
de la trajectoire
- (2.19)

La troisième condition peut être modifiée à partir de l'imposition d'un sens au vecteur \mathbf{n}_r à l'intérieur du système d'équations (voir figure 2.8). Dans ce cas, la troisième condition s'écrit simplement comme suit :

- 3) $|n_r| \leq \epsilon$ ou n_r change de signe entre 2 points consécutifs
de la trajectoire
- (2.20)

Enfin, il est important d'expliquer ces trois conditions pour comprendre leurs implications au niveau de la physique du phénomène. Tout d'abord, le lieu de contact doit être situé à l'intérieur de la section réelle des deux entités (conditions 1 et 2). Ceci veut dire que la valeur de la norme n_1 du vecteur \mathbf{n}_1 doit être positive et plus petite ou égale à la longueur de l'entité 1 (ρ_1 si l'entité 1 est un câble). Si la valeur de n_1 est négative ou plus grande que la longueur du segment 1, le lieu de contact est situé sur le prolongement de l'entité et il n'y a pas d'interférence en réalité. Il va de soi que la même contrainte s'applique à la deuxième entité en jeu. De plus, même si les deux conditions précédentes sont respectées, la troisième doit l'être aussi. Celle-ci dicte que la valeur absolue de la norme n_r du vecteur \mathbf{n}_r , qui est la distance minimale entre les deux segments, devienne assez petite pour assurer la présence d'un contact entre les deux parties du système. Plus précisément, la valeur $|n_r|$ doit être inférieure ou égale à une constante ϵ pour émettre la possibilité d'un contact. Si $|n_r|$ égale ϵ , il est considéré que les deux entités glissent pratiquement l'une contre l'autre et ce contact est qualifié de *léger*. Par contre, si n_r comporte un changement de signe (le sens du vecteur \mathbf{n}_r change durant la trajectoire) tout en s'éloignant de la valeur ϵ , le contact est qualifié de *sévère* et les deux entités interfèrent l'une contre l'autre. En d'autres mots, il y a un risque de bris mécaniques dans cette situation ou encore il y a croisement entre deux câbles. Évidemment, cette dernière situation n'est pas souhaitable dans le cadre de ce projet. Il faut préciser aussi que si la fréquence d'échantillonnage n'est pas suffisamment fine, il se peut que la résolution des équations ne permette pas d'observer une valeur de n_r s'approchant de ϵ , mais que seulement un changement de signe soit constaté. Cette constatation explique le fait de l'élaboration de la condition 3 en deux parties et elle réitère du même coup l'importance de l'attention qui doit être portée au niveau du choix de la fréquence d'échantillonnage pour connaître le moment précis de l'apparition d'un contact.

En complément, les figures 2.9, 2.10, 2.11 et 2.12 présentent de manière graphique les quatre cas d'interférences ci-haut mentionnés. Donc, à l'aide d'une trajectoire simple et d'un mécanisme arbitraire, les différents résultats possibles sont illustrés.

Premièrement, la figure 2.9 montre le cas où il n'y a aucun contact décelé entre deux entités quelconques du système lors de la simulation, c'est-à-dire que les parties demeurent convenablement éloignées en tout temps. Il y est observé que la courbe représentant la norme n_r du vecteur reliant les deux entités à l'étude ne s'approche guère de l'axe des x . Alors, il n'y a aucun risque d'interférence pour cette combinaison

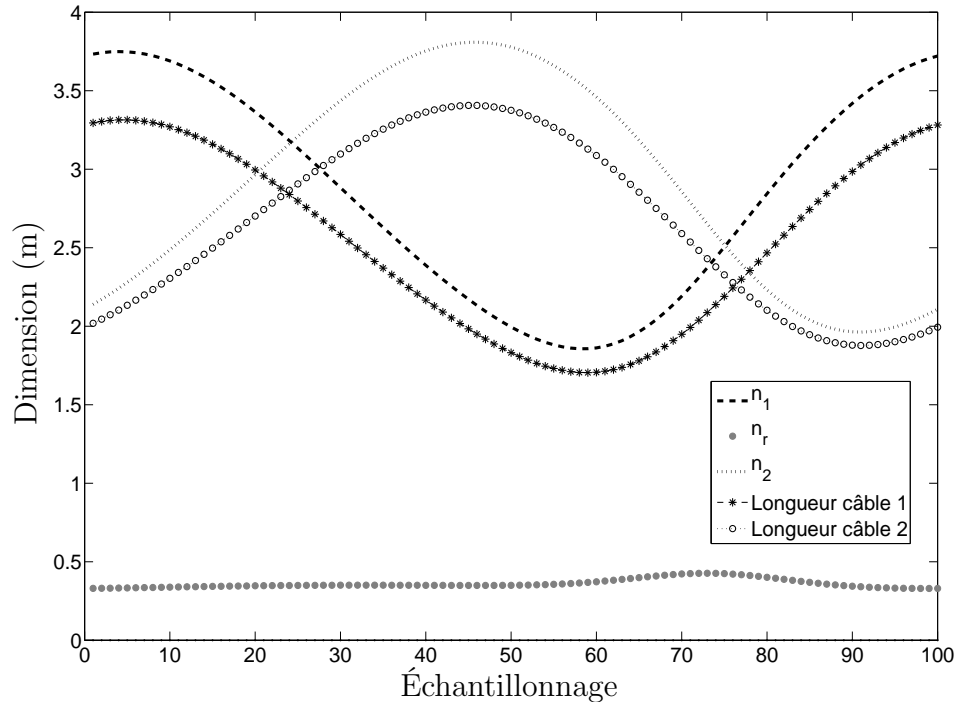


FIG. 2.9 – Exemple ne présentant aucun contact physique entre deux entités lors d’une simulation arbitraire.

lors de cette simulation, car la distance minimale entre les deux entités demeure en tout temps plus élevée que la constante ϵ (ϵ étant fixé à 0 pour cette série d’exemples).

La figure 2.10 propose plutôt le cas où il y a au moins un contact, mais celui-ci se trouve dans le domaine virtuel, c’est-à-dire qu’il se trouve sur le prolongement de la droite d’une ou des entités en jeu et non à l’intérieur de leurs dimensions physiques et réelles. En effet, en se rapportant à cette figure, il est remarqué, sous l’indice **I**, que les deux objets entrent en contact parce que la distance n_r devient nulle. Par contre, la position où le contact a lieu est située sur le prolongement du corps 2 (câble 2 dans l’exemple) parce que la valeur de la norme n_2 du vecteur \mathbf{n}_2 est plus grande que la longueur du corps correspondant. Le même phénomène peut être observé sous l’indice **II**, sauf que le contact se situe alors sur le prolongement du corps 1 (câble 1 dans l’exemple). Il faut préciser que la plupart du temps, il y aura toujours un minimum de deux contacts pour représenter un seul phénomène d’interférence. C’est-à-dire qu’il y a un premier contact générant l’entrée en interférence (rapprochement et collision des deux entités) et un second amenant plutôt la fin de cette même interférence (séparation des deux entités après la collision).

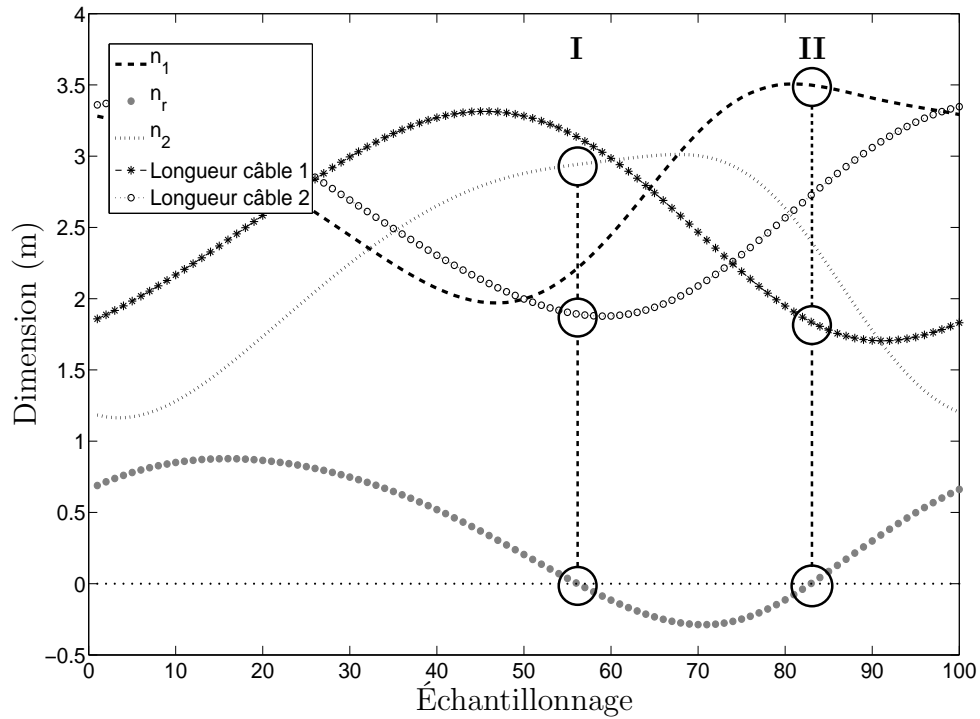


FIG. 2.10 – Exemple présentant un croisement virtuel entre deux entités lors d’une simulation arbitraire.

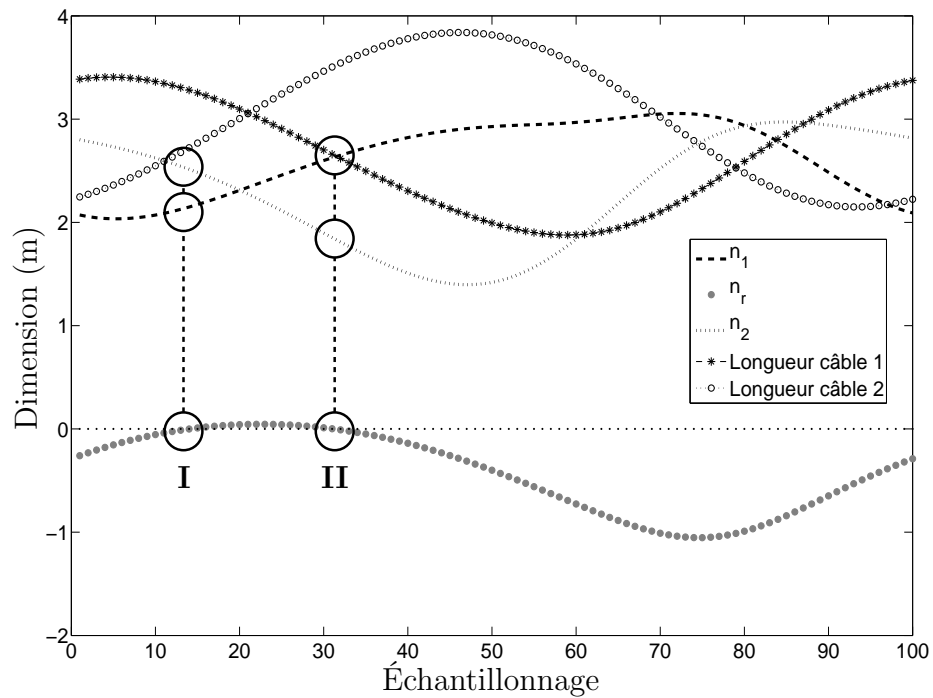


FIG. 2.11 – Exemple présentant un croisement réel *léger* entre deux entités lors d’une simulation arbitraire.

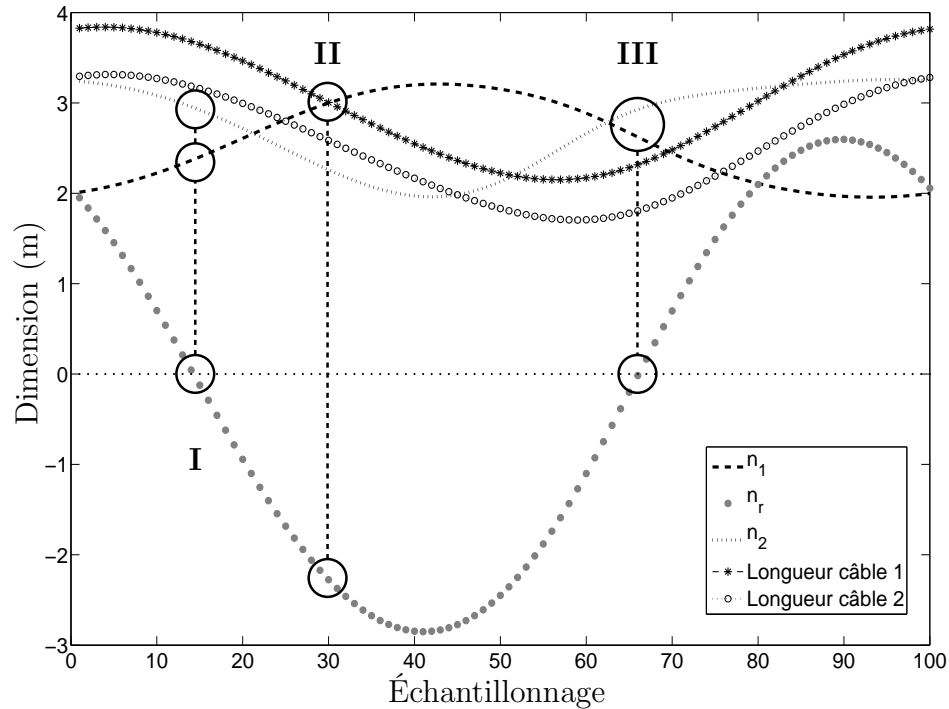


FIG. 2.12 – Exemple présentant un croisement réel *sévère* entre deux entités lors d’une simulation arbitraire.

Ensuite, les figures 2.11 et 2.12 présentent le cas, qui doit être minimisé et même idéalement évité complètement, où il y a présence d’au moins une interférence qui possède les propriétés telles qu’elles respectent les trois conditions nécessaires à l’obtention d’un contact réel entre deux parties du mécanisme. La première figure montre un contact qui est qualifié de *léger* tandis que la deuxième illustre un exemple caractérisé de *sévère*. Sous l’indice **I** de la figure 2.11, il est vu qu’il y a un contact (n_r près de la valeur nulle) et que celui-ci est bel et bien réel, car les normes n_1 et n_2 respectent les longueurs physiques de leurs entités respectives. De plus, il est aisé de constater que cette interférence est de type *léger*, car les deux corps ne se croisent que faiblement grâce à une valeur de n_r qui voisine zéro durant la totalité de la période de temps que dure ce croisement. De plus, sous l’indice **II**, il est remarqué que l’interférence se termine et que les deux corps s’éloignent près d’une extrémité appartenant au corps 1 (la valeur de n_1 est environ équivalente à la valeur de la longueur de l’entité 1). Finalement, ceci permet de présumer que le croisement décrit ci-haut a glissé ou évolué le long du corps 1 jusqu’à ce que les deux entités s’éloignent l’une de l’autre.

Pour terminer, il est vu, sous l’indice **I** de la figure 2.12, qu’il y a un contact et que celui-ci est bel et bien réel, car les normes n_1 et n_2 sont plus faibles que les longueurs

physiques de leurs entités respectives. De plus, cette interférence est de type *sévère*, car les deux corps se croisent grandement et ceci se traduit par une valeur absolue de n_r qui dépasse largement la valeur nulle durant la totalité de la période de temps que dure ce croisement. Il faut noter, en observant sous l'indice **II**, que ce dernier se termine dès que la valeur n_1 est environ équivalente à la valeur de la longueur du corps 1 (câble 1). Aussi, il peut être ajouté, sous l'indice **III**, que la présente interférence, devenue virtuelle, se termine et qu'elle est demeurée dans le domaine virtuel, car la valeur des normes n_1 et n_2 est plus élevée que celle de la longueur physique de leur support respectif. Finalement, il est important de réaliser que ce type de croisement est à éviter et qu'il pourrait s'avérer dangereux d'utiliser l'interface de locomotion si ce type de croisement était le moins envisageable, à moins d'être en mesure de relâcher (ou réduire) la tension d'un des câbles en jeu pour diminuer les conséquences de l'impact.

Maintenant que les équations liées à la détection des interférences sont établies et que ces notions sont bien comprises à l'aide des quelques exemples montrés, il est temps de définir les situations auxquelles il sera possible de les appliquer. Ainsi, la section suivante présente les différentes trajectoires dans lesquelles ces relations sont utilisées pour trouver les lieux de contact.

2.2.2.2 Définition des trajectoires

L'objectif de cette section est de définir une série de trajectoires qui sont représentatives des tâches que devront accomplir les plates-formes de marche lors de futurs essais expérimentaux. De plus, ces dernières doivent fournir une aide à la sélection de la géométrie des mécanismes dans le but de minimiser le risque d'éventuelles interférences en cours d'utilisation du système.

C'est pour répondre à ces critères qu'un ensemble de quatre trajectoires a été conçu. Trois d'entre elles constituent des trajectoires que le système pourrait avoir à réaliser lors de futurs essais. La quatrième se veut une trajectoire dite *exigeante* pour mieux établir le degré de performance de l'architecture à l'essai vis-à-vis les risques de contacts à l'intérieur de l'espace de travail prescrit en déplacement et en rotation. Ces divers parcours sont décrits et illustrés dans ce qui suit.

Avant tout, il est nécessaire de spécifier que le repère global lié au système est

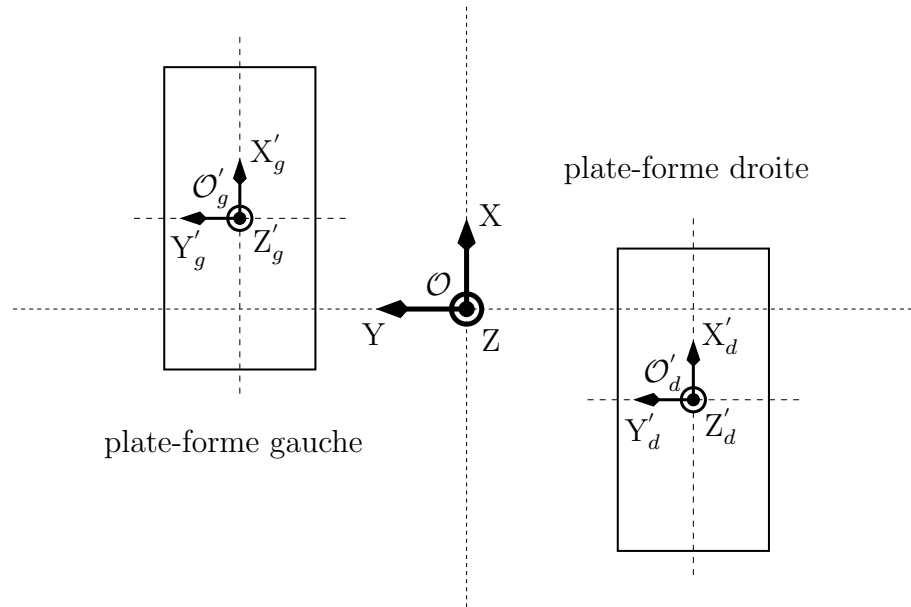


FIG. 2.13 – Schéma des différents repères inclus dans un système complet.

situé au même endroit peu importe l'architecture mise à l'étude. Donc, ce repère est positionné au centre de la charpente extérieure du mécanisme complet et au niveau du sol (à $z = 0$). La figure 2.13 illustre une vue de dessus schématisant un système complet quelconque (sans la charpente externe). Cette vue laisse entrevoir la position du repère fixe \mathcal{O} (repère global) par rapport aux principaux éléments soient les deux plates-formes et leur repère mobile respectif (\mathcal{O}'_d et \mathcal{O}'_g). Plus précisément, l'axe X est centré entre la pose de référence des deux plates-formes de marche tandis que l'axe Y intersecte l'axe X de manière à ce que la charpente externe soit séparée de façon parfaitement symétrique. De plus, la figure ne pouvant permettre de l'observer, il faut noter que la valeur nulle de l'axe Z du repère fixe se trouve au niveau du sol (tel que discuté précédemment) contrairement à la position des effecteurs, qui se trouvent à une certaine hauteur pour atteindre le centre de leur espace de travail respectif (voir figure 2.14). Il faut aussi remarquer que la distance, selon l'axe Y , entre la position de référence des deux repères mobiles (gauche et droit) est déterminée en effectuant une moyenne de cette distance à l'aide des données de la marche humaine et elle est fixée à 0,15 mètre (voir figures 2.15 et 2.17).

De plus, il est nécessaire de présenter la disposition de l'espace de travail lié à chacune des plates-formes. Pour ce faire, la figure 2.14 montre la position des deux espaces de travail. Ces espaces sont majoritairement superposés l'un sur l'autre et ceci est dû au fait que les deux pieds d'une personne évoluent à proximité l'un de l'autre lors

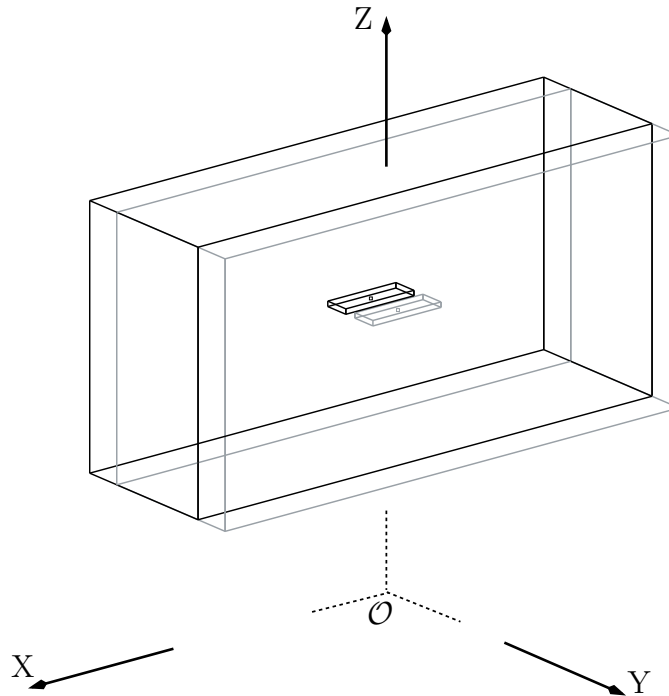


FIG. 2.14 – Schéma représentant la disposition de l'espace de travail lié à chacun des pieds de l'utilisateur.

de la démarche humaine. Alors, évidemment, il y a une zone de travail qui est commune aux deux pieds (ou effecteurs) et ceci doit être pris en compte lors de la vérification des interférences, car celles-ci peuvent avoir lieu entre les entités d'une même plate-forme ainsi qu'entre celles des deux plates-formes. Enfin, il faut préciser que l'effecteur de couleur *noire* ainsi que l'espace de travail comportant le contour noir appartiennent à la partie droite du mécanisme soit le pied droit. Les deux autres éléments illustrés de couleur *grise* correspondent au pied gauche.

Maintenant que les deux espaces de travail sont présentés et que les deux repères mobiles ainsi que celui global du système sont fixés, les trajectoires peuvent être définies en se rapportant naturellement au système de coordonnées global.

Tout d'abord, la première trajectoire à être imposée aux mécanismes est celle correspondant à une démarche typiquement humaine. Cette série de points est accessible grâce à la collaboration du Centre Interdisciplinaire de Recherche en Réadaptation et Intégration Sociale (CIRRIS) de Québec. Ces données ont été soigneusement rassemblées lors d'une acquisition expérimentale s'effectuant dans les laboratoires de ce centre de recherche à l'aide d'un candidat sain dans le cadre d'une de leurs études [32]. L'an-

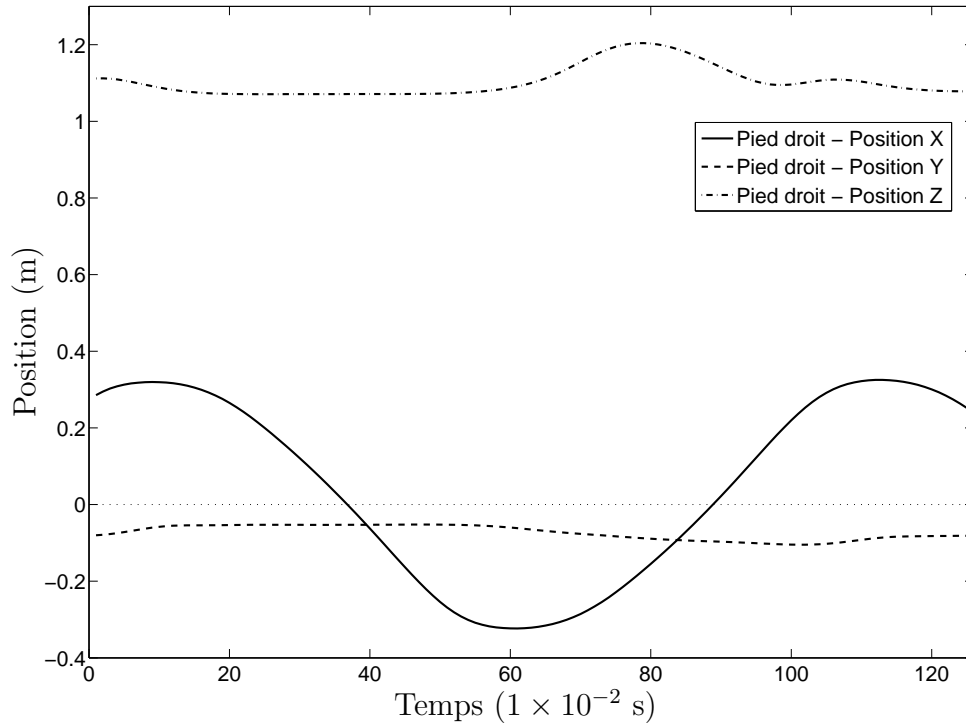


FIG. 2.15 – Évolution de la position du pied droit lors d’une démarche humaine typique.

nexe B contient une brève présentation de ces informations dans l’optique de les utiliser dans le cadre de simulations numériques. Celles-ci permettent au mécanisme parallèle entraîné à l’aide de câbles d’être lié à un parcours reproduisant la démarche humaine. Donc, les figures 2.15, 2.16, 2.17 et 2.18 présentent les évolutions cartésiennes des pieds (déplacements et rotations) élaborant cette trajectoire. Il est nécessaire de préciser que les déplacements liés aux plates-formes de marche sont confinés à évoluer aux alentours du point central de leur espace de travail respectif. Par conséquent, l’annexe B comporte aussi une description de la méthode utilisée pour imposer un rappel sur la position des effecteurs de ce type de trajectoire. De plus, il faut préciser que, dans le cadre de ces simulations, le centre de masse du pied est considéré au même endroit que le repère mobile \mathcal{O}' (voir la figure 2.1) de la plate-forme de marche (le centre de masse du pied est interprété comme étant confondu avec le point P). Cette simplification n’engendre que de minimes modifications au niveau des résultats, car le centre de masse du pied évolue habituellement légèrement au-dessus de la surface du support physique soit le sol ou dans ce cas-ci la structure de support.

Ainsi, la figure 2.15 présente l’évolution des trois coordonnées cartésiennes exprimées dans le repère global décrivant la position du pied droit à l’intérieur de son espace de

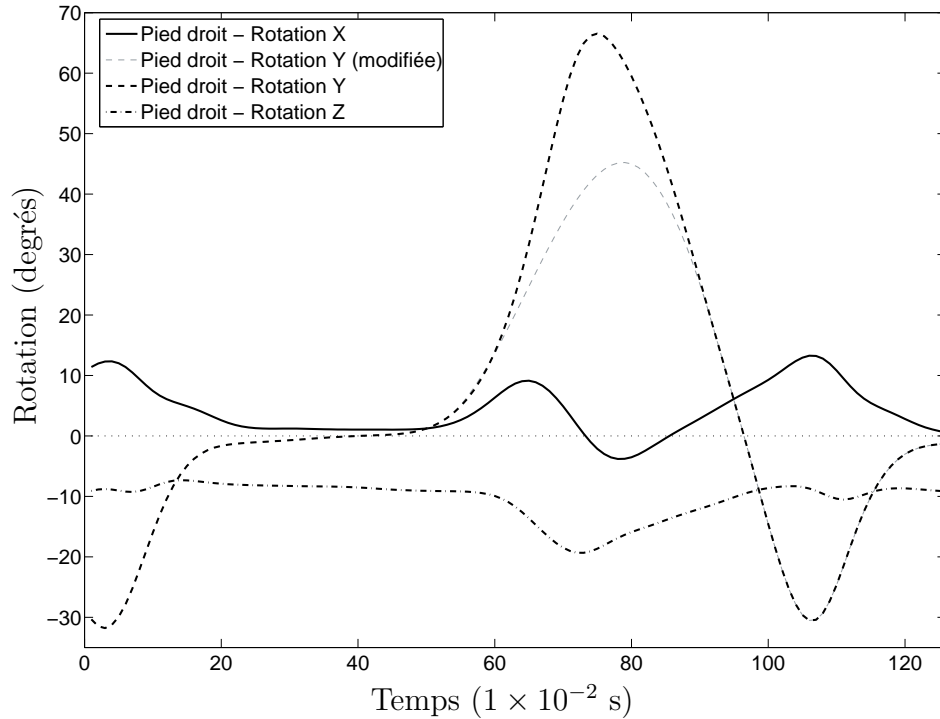


FIG. 2.16 – Évolution de l’orientation du pied droit lors d’une démarche humaine typique.

travail. Cette trajectoire comporte un rappel sur la position du pied (ou de la plateforme) selon l’axe X (celui qui comporte les plus grandes amplitudes de mouvement). De plus, la coordonnée en y demeure négative et ceci s’explique par le fait que le pied droit évolue du côté négatif (selon l’axe Y) du repère global du système. Enfin, il est observé que la coordonnée z (élévation du centre de masse du pied par rapport au sol) évolue au dessus d’un plancher virtuel fixé arbitrairement à 1 mètre. Il faut ajouter que cette trajectoire se trouve à évoluer près de la position centrale de l’espace de travail de sa plate-forme respective soit une position fixée aux coordonnées globales $x = 0$, $y = -0,075$ et $z = 1$ mètre. Aussi, il est facilement remarqué que ces déplacements respectent les débattements prédéterminés lors de la phase initiale du projet et présentés à l’intérieur du tableau 1.1.

Ensuite, la figure 2.16 illustre l’orientation du pied droit lors de cette démarche humaine. Il est noté que les rotations autour des axes X et Z respectent les valeurs préalablement définies à l’intérieur du tableau 1.1. Par contre, ceci n’est pas vrai en ce qui a trait à la rotation autour de l’axe Y. Cette valeur atteint environ 66,5 degrés tandis que la spécification selon l’angle de tangage est fixée à ± 45 degrés. Ceci étant dit, il faut

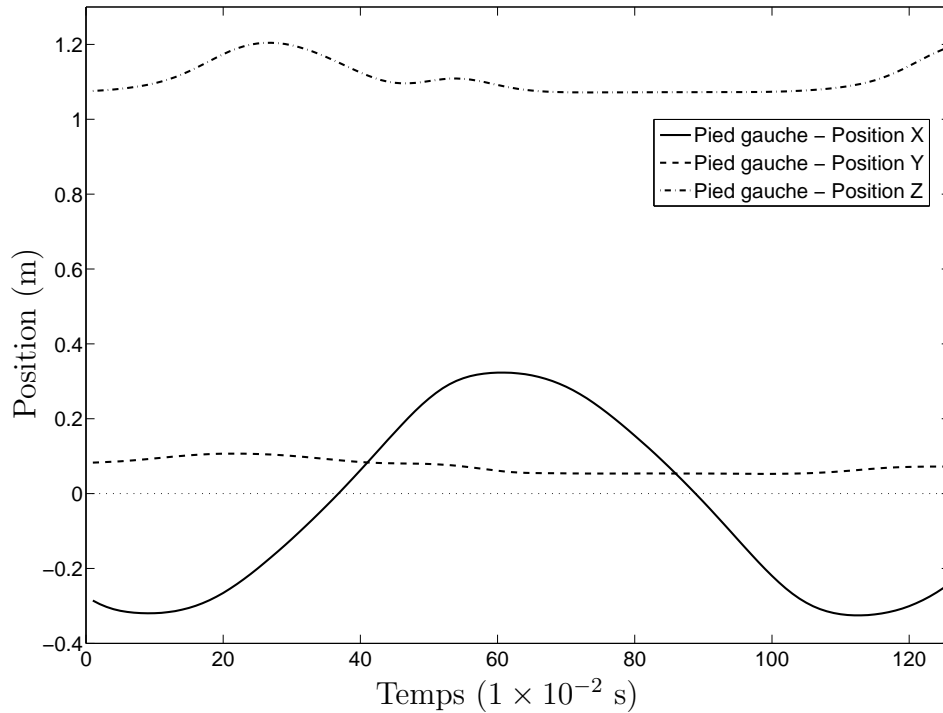


FIG. 2.17 – Évolution de la position du pied gauche lors d’une démarche humaine typique.

mentionner que cette particularité n’entrave en rien le niveau de rendement attendu par les architectures envisagées, car un artifice mécanique pourrait être implanté sur les plates-formes pour permettre des débattements angulaires en tangage plus élevés que ± 45 degrés (cet artifice sera proposé au chapitre 5). Bien entendu, l’angle en tangage représente physiquement la rotation qui comporte le plus grand débattement lors de la marche humaine, surtout lorsque le pied est en phase de balancement aérien. Par ce fait, ce dernier correspond à une partie critique lors de la conception des mécanismes. Ces dernières affirmations mènent par conséquent à la décision d’effectuer la détection des interférences en imposant les débattements angulaires réels selon l’angle θ lors de cette trajectoire. Donc, l’excédent de la plage de rotation possible en tangage sans contact est considéré tel un facteur de sécurité pour l’utilisation réelle du mécanisme. Finalement, la figure 2.16 comporte une seconde évolution pour l’angle θ soit la courbe grise. Cette dernière représente l’évolution modifiée de cet angle pour la simulation numérique qui sera complétée au chapitre 4 (limitation respectée de $\pm 45^\circ$). La détermination de cette nouvelle courbe est aussi décrite à l’annexe B.

La figure 2.17 présente l’évolution des trois coordonnées cartésiennes pour le pied

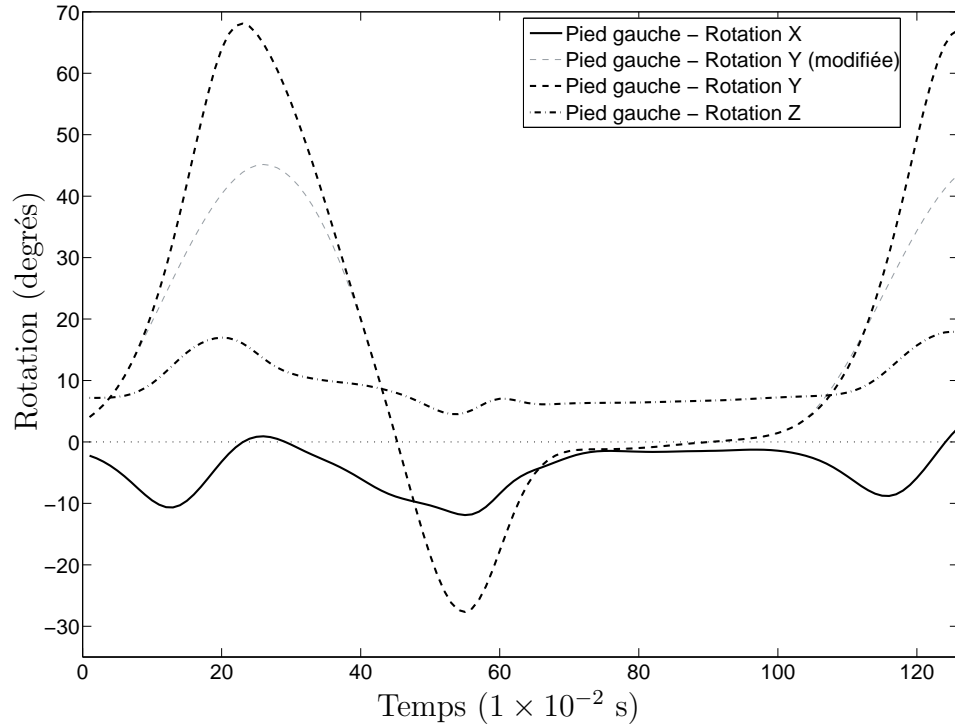


FIG. 2.18 – Évolution de l'orientation du pied gauche lors d'une démarche humaine typique.

gauche. Les mêmes particularités que celles observées au pied droit sont notées, sauf pour ce qui concerne la coordonnée y qui évolue du côté positif de l'axe Y. Ainsi, la position du centre de l'espace de travail correspondant à la plate-forme de gauche est décalée de 0,15 mètre suivant le sens positif de l'axe Y, soit $x = 0$, $y = 0,075$ et $z = 1$ mètre.

La figure 2.18 présente à peu près les mêmes caractéristiques que celles remarquées à la figure 2.16 sauf le fait que les rotations en tangage du pied gauche sont déphasées par rapport à celles du pied droit. Cette affirmation s'explique naturellement par le fait que chacun des pieds sert de corps porteur du poids de la personne l'un après l'autre selon un intervalle régulier lors d'une marche typique. Enfin, les mêmes remarques précisées pour la courbe grise de la figure 2.16 doivent être appliquées à celle de la figure 2.18.

Finalement, la figure 2.19 présente une vue en trois dimensions de la trajectoire de la marche décrite ci-haut. Cette courbe comporte un cycle complet de la démarche humaine. Donc, les deux phases importantes de la marche soient la phase d'appui (partie plate de la courbe) et celle oscillante (partie aérienne) sont observées. Il faut

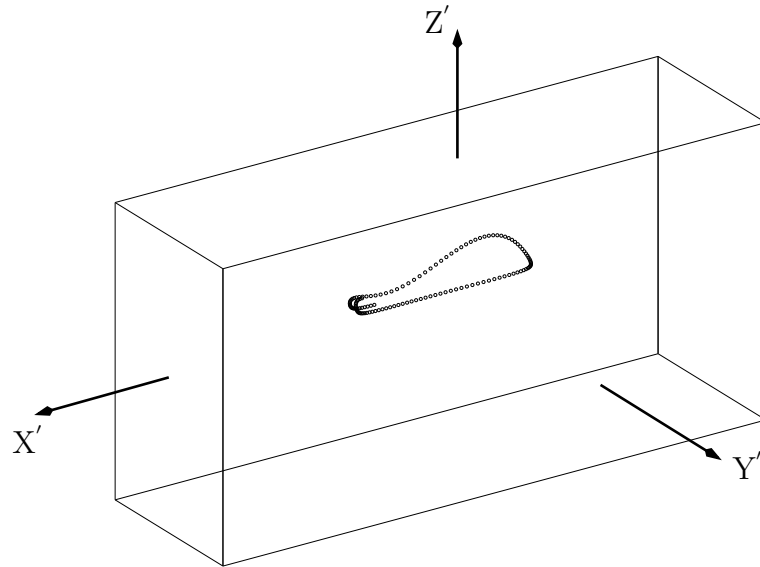


FIG. 2.19 – Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la marche humaine.

préciser que cette courbe représente l'évolution du pied droit à l'intérieur de son espace de travail. Par contre, la courbe liée au pied gauche serait similaire à celle présentée. De plus, il est observé que la trajectoire n'est pas parfaitement cyclique tel qu'il est naturel de le supposer. Cette remarque s'explique par le fait que celle-ci provient de mesures expérimentales et que la démarche humaine réelle comporte de légères irrégularités².

La seconde trajectoire à être imposée aux mécanismes est celle correspondant à une démarche typiquement humaine en imposant des rotations de sens inverse. Cette trajectoire présente les mêmes déplacements que la première, cependant les rotations évoluent dans le sens contraire. En fait, ce test permet de conserver une certaine symétrie lors de la conception des mécanismes. En effet, il est préférable d'agir ainsi pour forcer les mécanismes devant être optimisés à démontrer une versatilité au niveau des mouvements (possibilité d'effectuer une trajectoire dans une direction ou bien à son opposé) qu'ils peuvent reproduire pour éviter les interférences de tous types. Alors, les figures 2.20 et 2.21 présentent l'évolution des rotations pour le pied droit et le pied gauche respectivement. Bien entendu, ces valeurs correspondent aux figures 2.16 et 2.18

²Lors d'une vraie séance de simulation à l'aide d'une future interface de locomotion, ces irrégularités seraient évidemment corrigées à l'aide d'un algorithme de rappel de la position de l'utilisateur vers le centre de l'espace de travail du système. Cependant, pour les fins des analyses présentes, il n'est pas nécessaire que la trajectoire soit parfaitement cyclique, mais elle doit plutôt reproduire fidèlement la démarche humaine.

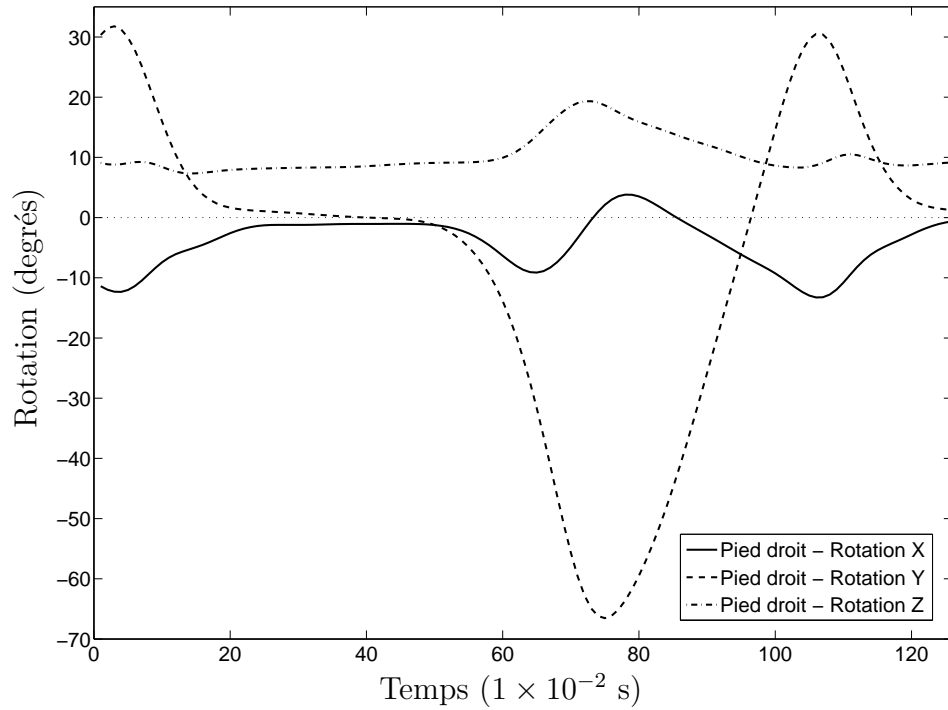


FIG. 2.20 – Évolution de l'orientation du pied droit lors d'une démarche humaine typique avec orientation inversée.

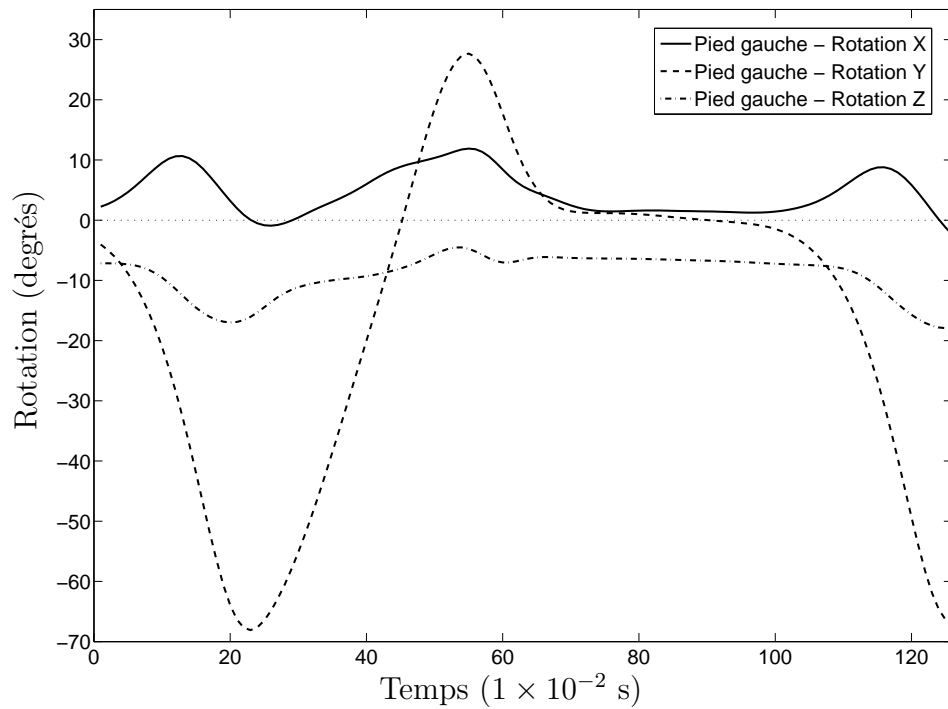


FIG. 2.21 – Évolution de l'orientation du pied gauche lors d'une démarche humaine typique avec orientation inversée.

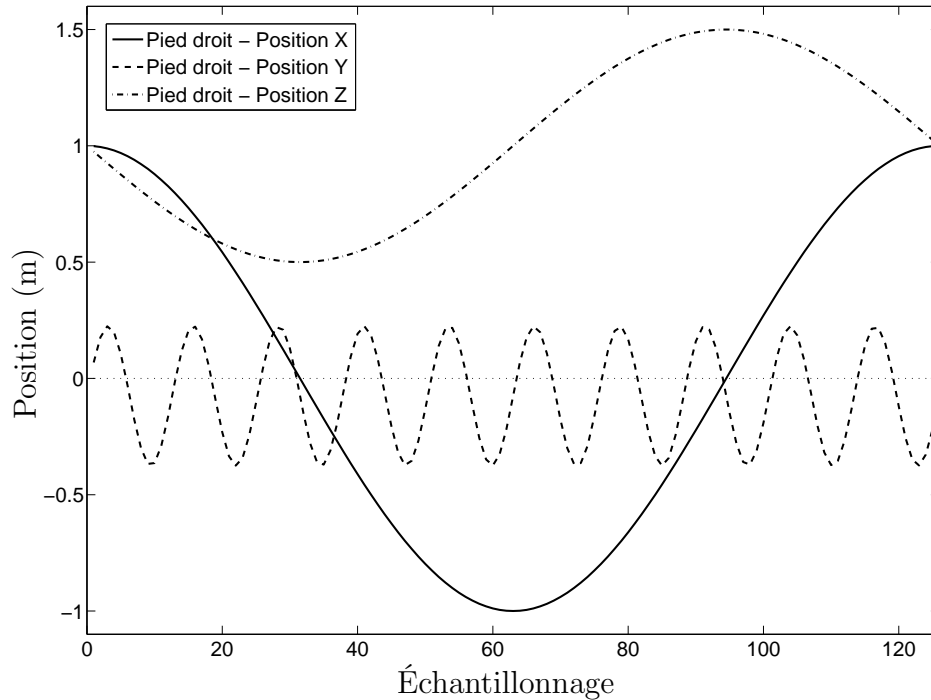


FIG. 2.22 – Évolution de la position du pied droit lors de la trajectoire ellipsoïdale.

mais de signe inverse.

La troisième trajectoire représente un parcours suivant une forme ellipsoïdale qui atteint les extrémités de l'espace de travail de la plate-forme à laquelle elle est imposée. Ce parcours est de forme ellipsoïdale dans le plan de vue XZ et il est oscillant selon l'axe Y pour permettre au mécanisme d'évoluer sur la majorité de la frontière de l'espace de travail. De plus, telles que les deux trajectoires précédentes, celle-ci oscille autour de la position centrale de l'espace de travail. La figure 2.22 correspond à l'évolution de la position du pied droit, car la coordonnée y oscille autour d'une valeur négative soit $y = -0,075$ mètre. Les équations mathématiques modélisant cette trajectoire (où $a = -0,075$ et $b = 1$) sont écrites comme suit :

$$\begin{aligned}
 x &= \cos(2\pi t) \\
 y &= \frac{3}{10} \sin(20\pi t) + a \\
 z &= -\frac{1}{2} \sin(2\pi t) + b
 \end{aligned}
 \tag{2.21}$$

La figure 2.23 représente l'évolution du pied gauche à la suite de l'imposition de cette trajectoire ellipsoïdale. Il est possible de s'en assurer en observant la valeur moyenne selon l'axe Y de $y = 0,075$ mètre. Les équations décrivant son comportement sont les

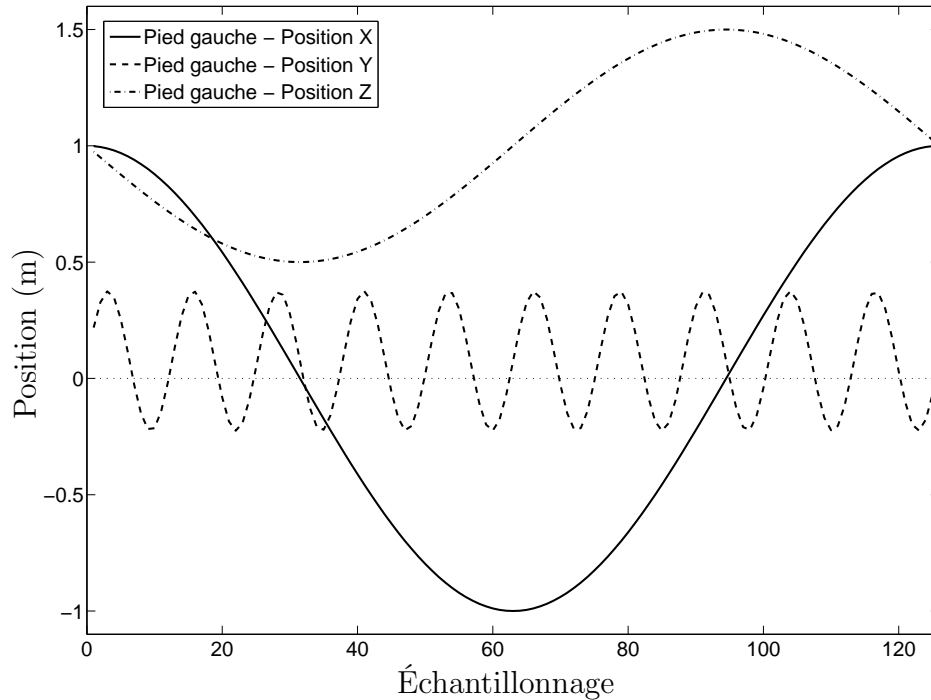


FIG. 2.23 – Évolution de la position du pied gauche lors de la trajectoire ellipsoïdale.

mêmes que celles présentées à l'équation (2.21) sauf que les constantes a et b valent 0,075 et 1 mètre respectivement. De plus, il faut ajouter que l'orientation de l'effecteur lors de cette trajectoire est définie comme étant celle de référence, c'est-à-dire que les angles de rotation selon les trois axes sont nuls en tout temps et ce pour les deux pieds. Enfin, la figure 2.24 montre la forme générale de cette trajectoire à l'intérieur de l'espace de travail. Elle démontre évidemment un comportement oscillant selon l'axe Y et une évolution en forme d'ellipse dans le plan XZ.

Finalement, la quatrième trajectoire est qualifiée de trajectoire *exigeante* puisqu'elle correspond à un parcours qui évolue de différentes manières à l'intérieur de l'espace de travail. Elle est constituée de plusieurs petites trajectoires qui se succèdent pour couvrir adéquatement le volume de travail. De plus, les orientations de l'effecteur balayent l'ensemble des plages de rotation qui ont été préalablement établies lors de la phase initiale du projet. Ceci étant bien sûr dans l'optique de vérifier si le mécanisme à l'étude peut se mouvoir dans l'ensemble de son espace de travail sans produire d'interférences. Cette trajectoire en est une de sécurité, car il serait improbable qu'une telle trajectoire ait lieu dans le cadre d'une simulation de mouvements imposés par un individu se déplaçant à l'intérieur d'un monde virtuel. Par contre, elle est nécessaire pour bien évaluer et optimiser les mécanismes solutions.

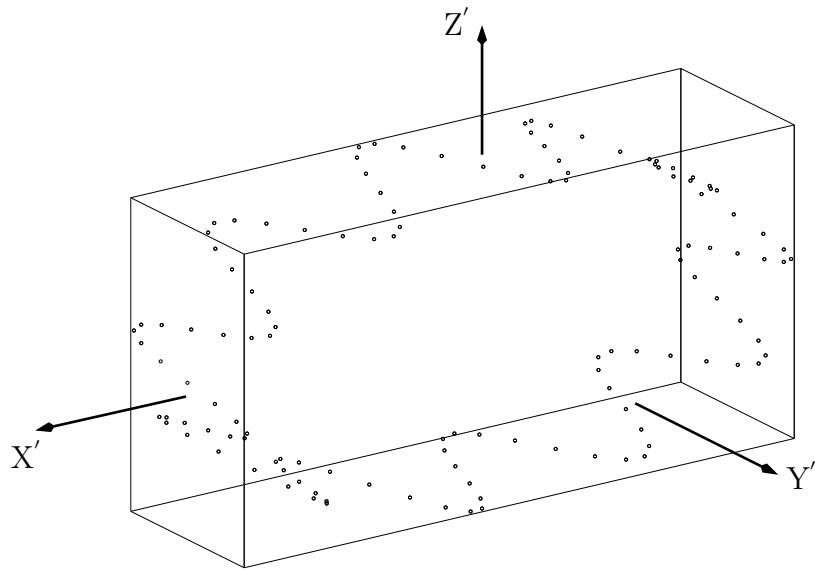


FIG. 2.24 – Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la trajectoire ellipsoïdale.

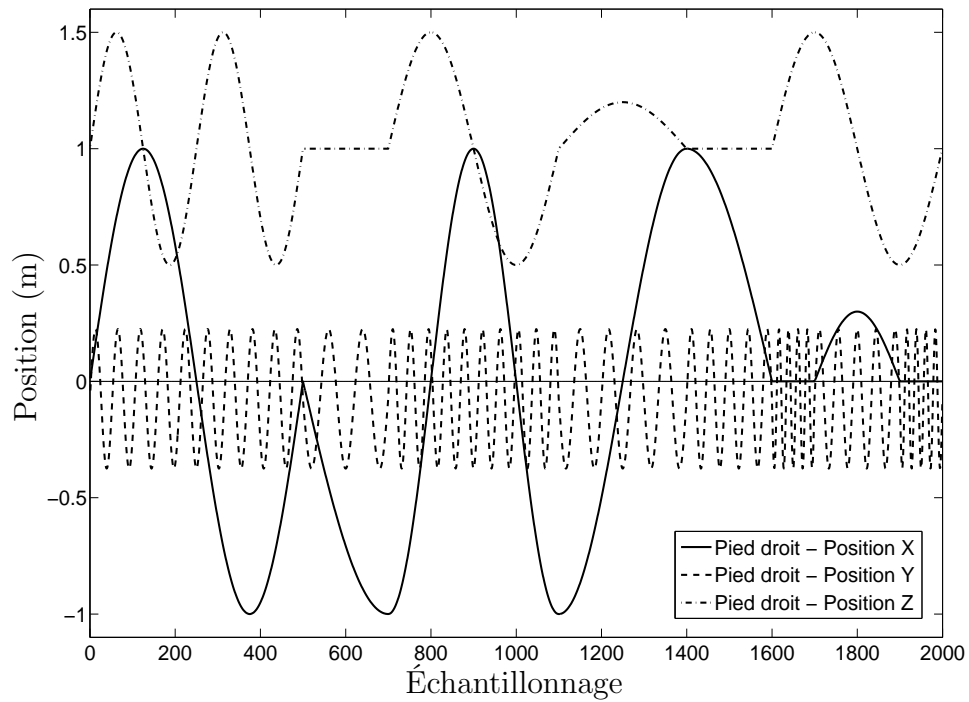


FIG. 2.25 – Évolution des trois coordonnées de position du pied droit lors de la trajectoire *exigeante*.

Alors, la figure 2.25 présente l'évolution de l'effecteur droit à l'intérieur de l'espace de travail. Cette trajectoire comporte, telle que la trajectoire précédente, une hauteur centrale d'environ 1 mètre au dessus du sol et le pied droit évolue autour de la position $y = -0,075$ mètre. Il est à noter que cette courbe sera plus aisément visualisée à l'aide des figures 2.28 et 2.29.

Tout d'abord, la série de relations exprimant le comportement des coordonnées cartésiennes du pied droit (avec les constantes $a = -0,075$ et $b = 1$ mètre) sont données ci-dessous :

$$\left. \begin{aligned} x &= \sin(2\pi t) \\ y &= \frac{3}{10} \sin(19\pi t) + a \\ z &= \frac{1}{2} \sin(4\pi t) + b \end{aligned} \right\} 0 \leq t < 500 \quad (2.22i)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= -\sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) \\ y &= -\frac{3}{10} \sin(5\pi t) + a \\ z &= b \end{aligned} \right\} 500 \leq t < 700 \quad (2.22ii)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= -\cos(2\pi t) \\ y &= \frac{3}{10} \sin(19\pi t) + a \\ z &= \frac{1}{2} \sin(2\pi t) + b \end{aligned} \right\} 700 \leq t < 1\,100 \quad (2.22iii)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= -\cos(\pi t) \\ y &= -\frac{3}{10} \sin(9\pi t) + a \\ z &= \frac{1}{5} \sin(\pi t) + b \end{aligned} \right\} 1\,100 \leq t < 1\,400 \quad (2.22iv)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) \\ y &= \frac{3}{10} \sin(9\pi t) + a \\ z &= b \end{aligned} \right\} 1\,400 \leq t < 1\,600 \quad (2.22v)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= 0 \\ y &= -\frac{3}{10} \sin(9\pi t) + a \\ z &= \frac{1}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) + b \end{aligned} \right\} 1\,600 \leq t < 1\,700 \quad (2.22vi)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{3}{10} \sin(\pi t) \\ y &= \frac{3}{10} \sin(9\pi t) + a \\ z &= \frac{1}{2} \cos(\pi t) + b \end{aligned} \right\} 1\,700 \leq t < 1\,900 \quad (2.22vii)$$

$$\left. \begin{aligned} x &= 0 \\ y &= -\frac{3}{10} \sin(9\pi t) + a \\ z &= -\frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) + b \end{aligned} \right\} 1\,900 \leq t < 2\,000 \quad (2.22viii)$$

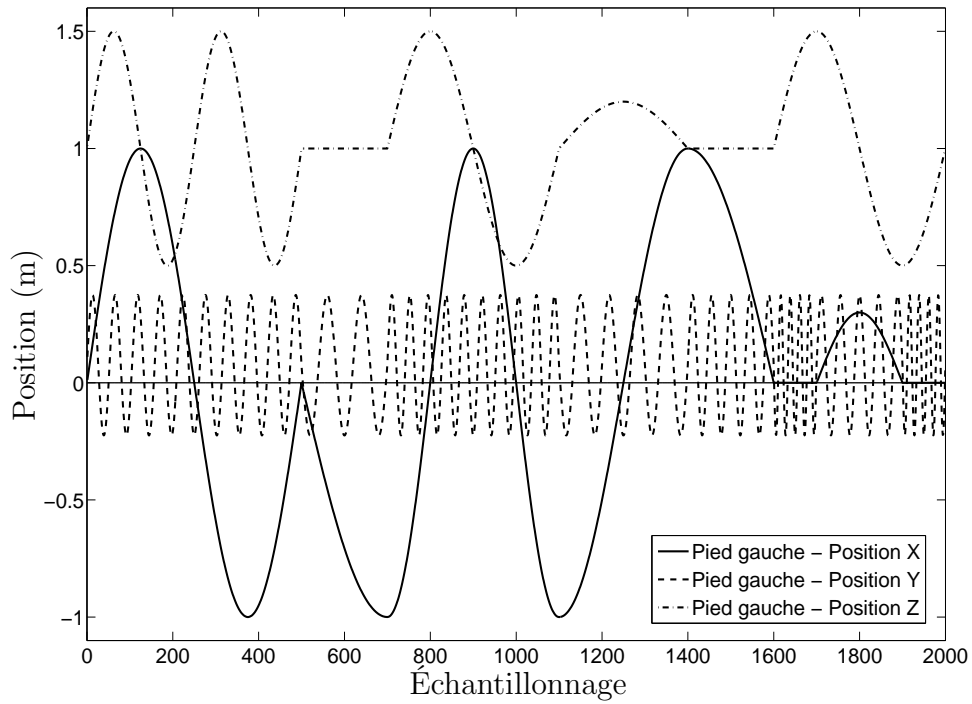


FIG. 2.26 – Évolution des trois coordonnées du pied gauche lors de la trajectoire *exigante*.

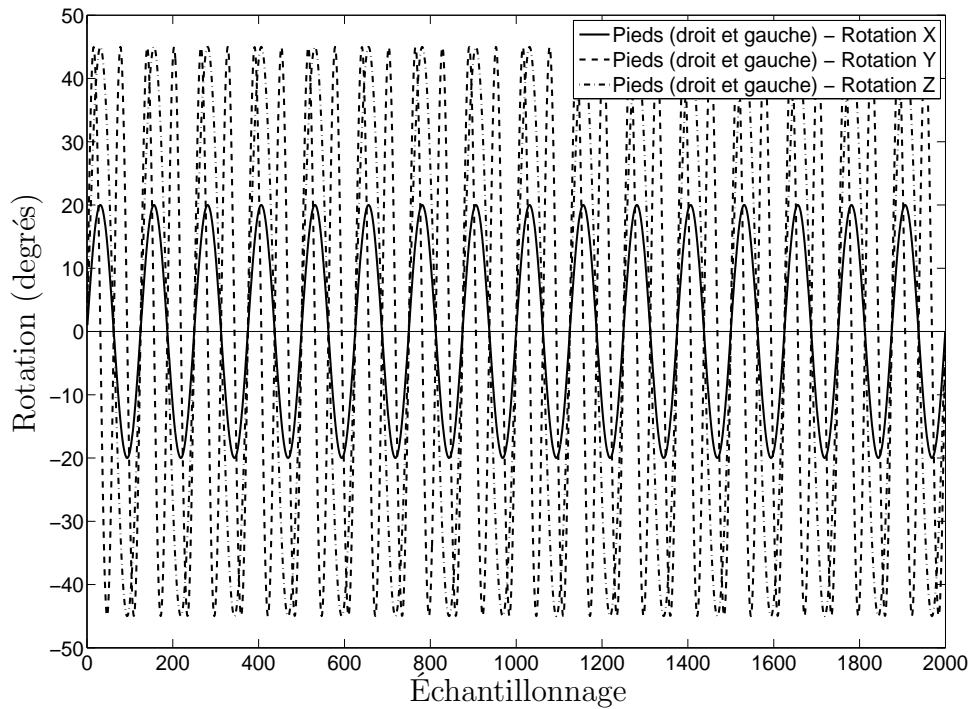


FIG. 2.27 – Évolution des angles d'Euler des pieds droit et gauche lors de la trajectoire *exigante*.

Ensuite, la figure 2.26 propose l'évolution du pied gauche pour cette même trajectoire *exigeante* en utilisant les valeurs des constantes a et b tel que $a = 0,075$ et $b = 1$ à l'intérieur des équations (2.22). Enfin, la figure 2.27 présente l'évolution des angles d'Euler associés à l'orientation du pied droit (identique à ceux du pied gauche) lors de cette trajectoire. Il peut être observé que les amplitudes des débattements angulaires atteignent les limites des plages de rotation établies dans le tableau 1.1. Les équations qui définissent ces débattements sont élaborées ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 \psi &= 20 \sin(32\pi t) && \text{(rotation autour de X)} \\
 \theta &= 45 \sin(64\pi t) && \text{(rotation autour de Y)} \\
 \phi &= 45 \sin(32\pi t) && \text{(rotation autour de Z)}
 \end{aligned}
 \tag{2.23}$$

Il faut noter, tel que dicté précédemment, que le débattement angulaire le plus critique lors de la conception d'une interface de locomotion est celui en tangage, c'est-à-dire celui qui est le plus sollicité lors de la démarche humaine. Donc, c'est pour cette raison que cette rotation effectue deux fois plus de cycles lors de cette trajectoire que les autres déplacements angulaires soient ceux en lacet et en roulis.

Finalement, les figures 2.28 et 2.29 démontrent la forme complexe qui illustre la dernière trajectoire. Il est remarqué que celle-ci tend à couvrir les principales zones du volume de travail. D'ailleurs, il n'est pas évident de visualiser la trajectoire à l'aide de la figure 2.28 et c'est pourquoi une vue selon le plan XZ est ajoutée (figure 2.29). Cette dernière permet de reconnaître les différentes courbes (voir les équations (2.22)) qui forment l'ensemble de cette trajectoire. De plus, il faut rappeler que ce parcours est effectué tout en variant constamment l'orientation de la plate-forme.

Ainsi, les différentes trajectoires qui seront imposées aux mécanismes à évaluer sont décrites et illustrées pour cerner leur correspondance physique et leur nécessité dans une étude d'optimisation géométrique. La section suivante présentera donc un algorithme permettant de regrouper les différentes évaluations dans le but de noter le comportement des mécanismes à l'étude pour améliorer leur géométrie.

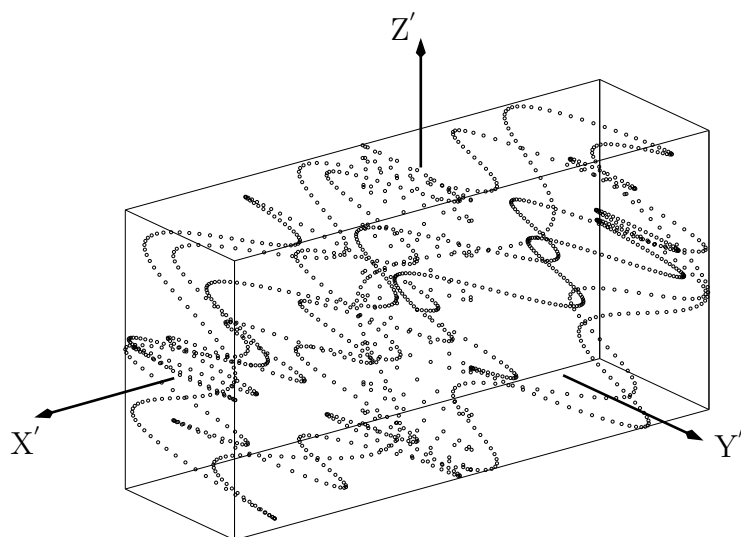


FIG. 2.28 – Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la trajectoire *exigeante*.

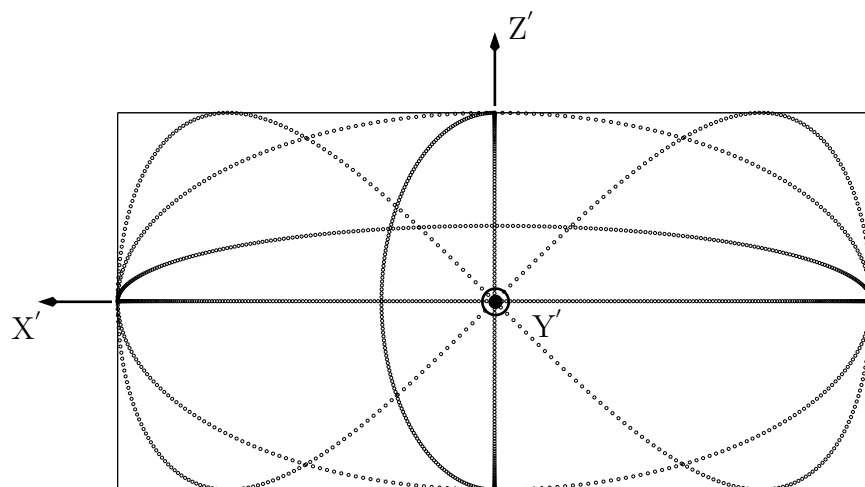


FIG. 2.29 – Évolution de la position de l'effecteur à l'intérieur de l'espace de travail lors de la trajectoire *exigeante* à l'aide d'une vue XZ .

2.2.3 Optimisation à l'aide d'un algorithme séquentiel

La méthodologie employée pour optimiser les mécanismes peut se présenter sous différentes formes. Celle qui est choisie dans le cadre de cette étude est simple et permet d'effectuer une analyse rapide des résultats de manière graphique. Cette dernière a déjà été brièvement présentée par l'auteur dans le cadre d'une conférence sur les systèmes intelligents (IS2006) [37].

Tout d'abord, cette technique est basée sur l'optimisation de différents paramètres géométriques de l'architecture soient la position des enrouleurs et celle des points d'attache des câbles sur la plate-forme. Donc, en considérant qu'un mécanisme possède huit enrouleurs, huit points d'attache et qu'il y a trois degrés de liberté à contraindre pour fixer chacun de ces points dans l'espace, un total de 48 paramètres est obtenu. De plus, il est toujours possible d'en ajouter telles que la distance entre les deux plates-formes lors des simulations de trajectoire et la hauteur de la position centrale des espaces de travail. Il est évident qu'un nombre de paramètres élevé augmente le temps requis pour l'analyse complète d'un mécanisme. Donc, pour simplifier la méthode sans limiter les possibilités accessibles au niveau des différentes géométries, le nombre de paramètres à analyser par mécanisme a été minimisé. En effet, dans le but de conserver une certaine symétrie dans la forme générale des mécanismes, il est possible de joindre deux à deux tous les câbles. Les mécanismes étant séparés symétriquement de part et d'autre de l'axe Y suivant l'axe X du repère fixe, il est donc possible de fixer la position de deux câbles en se servant d'un seul grâce au fait qu'il y en a un qui aura une coordonnée positive selon l'axe X tandis que pour le deuxième, cette même coordonnée sera négative. Ainsi, le nombre de paramètres est diminué à environ 24.

L'idée principale de cette méthode est de choisir la meilleure valeur pour un paramètre qui doit être optimisé en vérifiant la réaction du système vis-à-vis le résultat des différents tests. De cette manière, les paramètres peuvent être optimisés un à un, de manière séquentielle, pour ainsi tendre vers un mécanisme qui présente des meilleures caractéristiques. Bien entendu, il ne peut pas être assuré, par cette manière, d'atteindre une solution optimale et ce, même après plusieurs cycles d'optimisation. Par conséquent, lorsque la technique n'est plus en mesure d'améliorer l'architecture, il peut être conclut que celle-ci a permis de converger, du moins, vers une solution optimale et locale.

De plus, il est possible de penser à tendre vers une autre solution optimale et locale

seulement en modifiant l'ordre des paramètres optimisés lors d'une analyse de la sorte. Il y a donc plusieurs moyens de modifier l'évolution des résultats qui seront obtenus. Devant l'incapacité de prévoir ou de connaître l'ordre idéal des choix de paramètres menant à une solution optimale et globale, il est requis de se restreindre à emprunter la voie qui semble logiquement la plus prometteuse et à atteindre son optimal local. La plupart du temps, le choix de l'ordre des paramètres étant intuitif, les paramètres sont analysés un à la suite de l'autre selon l'ordre dans lequel ils apparaissent à l'intérieur du code de programmation. Enfin, chacun des paramètres est ainsi testé et optimisé un à un et ceci à plusieurs reprises pour obtenir, après quelques cycles, une solution dont les résultats atteignent un plateau ou en d'autres mots dont les résultats sont maximisés.

Pour faciliter l'analyse des résultats reliés à chacune des valeurs du paramètre à l'étude, la méthode implantée est d'obtenir la somme pondérée de tous les résultats. Cette pondération donne la possibilité de spécifier les tests étant plus importants que d'autres dans le but de concevoir un mécanisme. Dans le cas présent, la pondération est fixée égale (à l'aide d'un facteur $k_i = 1$) pour les deux critères de performance et les quatre tests d'interférence. Ainsi, la somme est exprimée de la manière suivante :

$$\text{Somme} = \sum_{i=1}^6 k_i \eta_i \quad (2.24)$$

À l'intérieur de cette dernière équation, les indices η_1 , η_2 , η_3 , η_4 , η_5 et η_6 correspondent respectivement aux valeurs résultantes des tests de l'EPP, l'EPCG, le nombre de contacts lors du parcours lié à la marche humaine (Trajectoire 1), le parcours lié à la marche humaine avec orientation inversée (Trajectoire 2), le parcours contenant une forme ellipsoïdale (Trajectoire 3) et celui étant qualifié de trajectoire *exigeante* (Trajectoire 4).

De plus, il faut s'assurer que cette somme contient des résultats qui doivent être soit strictement minimisés ou bien strictement maximisés. De par la manière dont les critères de performance ont été établis (EPP et EPCG), il est naturel de vouloir maximiser leur valeur. Les interférences doivent être, quant à elles, nécessairement minimisées. Par conséquent, les résultats des critères de performance ne représenteront plus le pourcentage de couverture de ces espaces par rapport au volume de travail mais bien son complémentaire. C'est-à-dire que les résultats des tests reliés à l'EPP et à l'EPCG seront dorénavant représentés par la partie non couverte par ces espaces à l'intérieur

du volume de contrôle global. De cette manière, l'ensemble des tests engendreront une valeur devant être minimisée à l'aide des algorithmes d'optimisation. En effet, les zones non couvertes par l'EPP et l'EPCG ainsi que les lieux propices aux interférences lors des quatre trajectoires préalablement définies devront être minimisés.

En somme, les différentes variables η_i de l'équation 2.24 sont définies comme suit :

- η_1 contient le pourcentage de couverture du complémentaire de l'EPP ;
- η_2 contient le pourcentage de couverture du complémentaire de l'EPCG ;
- η_3 contient le nombre de contacts décelés lors de la trajectoire de la démarche humaine ;
- η_4 contient le nombre de contacts décelés lors de la trajectoire de la démarche humaine avec orientation inversée ;
- η_5 contient le nombre de contacts décelés lors de la trajectoire ellipsoïdale ;
- η_6 contient le nombre de contacts décelés lors de la trajectoire dite *exigeante*.

Enfin, l'énumération suivante résume la séquence des différentes étapes menant vers une solution optimisée :

1. Choisir le paramètre à optimiser.
2. Définir la plage des différentes valeurs que prendra ce paramètre ainsi que la discrétisation de cette plage.
3. Déterminer les résultats des deux critères de performance ainsi que ceux de la détection des interférences lors des 4 trajectoires définies et les regrouper à l'aide de l'équation (2.24).
4. Observer et analyser les résultats pour ensuite fixer la nouvelle valeur du paramètre étudié qui minimise la somme des résultats.
5. Poursuivre en optimisant un autre paramètre de la géométrie (étapes 1 à 4).
6. Effectuer les étapes 1 à 5 jusqu'à ce que tous les paramètres du mécanisme aient été optimisés.
7. Recommencer les étapes 1 à 6 jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible d'améliorer les résultats de la géométrie.

La figure 2.30 montre un exemple des résultats observés lors d'une analyse effectuée pour un choix de paramètre quelconque d'un mécanisme arbitraire. Donc, il est remar-

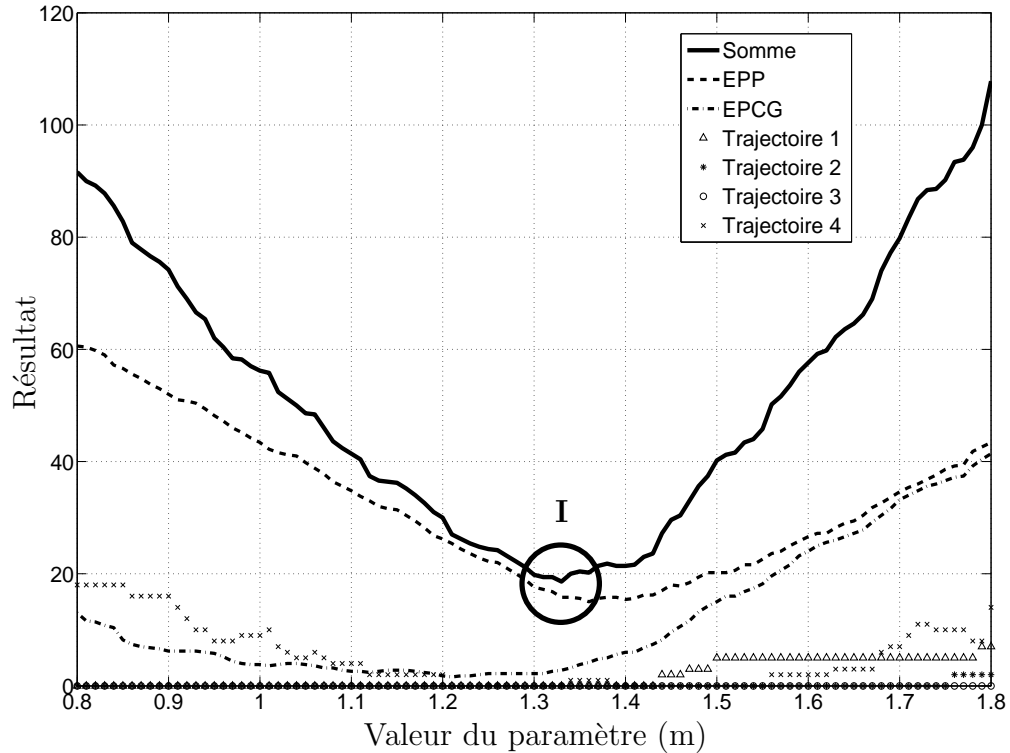


FIG. 2.30 – Exemple d'un résultat obtenu lors d'une optimisation utilisant l'algorithme séquentiel.

qué que le graphique propose sept courbes distinctes. La première courbe représente l'évolution de la somme des différents tests. Les courbes formées par des lignes discontinues proposent les résultats liés aux espaces de travail de l'EPP et de l'EPCG. Ensuite, ceux relatifs à la détection des interférences sont illustrés à l'aide de différentes formes géométriques. De cette manière, il est facile d'analyser ces résultats en suivant l'évolution de ces courbes selon la modification de la valeur du paramètre étudié. Donc, pour faire le choix de la valeur qui serait imposée lors des prochaines analyses, la courbe illustrant la somme des résultats est observée et la zone qui tend à minimiser l'ensemble des tests est recherchée, c'est-à-dire la valeur du paramètre qui permet d'obtenir le meilleur des compromis entre les divers tests. Dans le cadre de cet exemple, cette zone est accentuée par le cercle **I**. À l'intérieur de ce cercle, il est noté que la fonction est minimisée pour une valeur d'environ 1,33 mètres. Par conséquent, c'est cette dernière qui serait choisie comme valeur nouvellement imposée pour ce paramètre avant de poursuivre vers les étapes suivantes de la méthode.

Ainsi, suite à cet exemple, il est possible d'imaginer la série d'optimisations similaires qui est requise pour améliorer petit à petit les résultats d'une architecture. En fait,

cette méthode permet d'améliorer le mécanisme sans pour autant savoir vers quel type de solution l'optimisation se dirige (une solution localement optimale ou une solution globalement optimale).

De manière générale, il est intéressant pour un système d'atteindre une solution globalement optimale, mais celle-ci est très difficile à déceler pour ce type d'étude et ce, même si elle est déjà atteinte. En effet, il n'y a pas de moyen simple pour s'en assurer parfaitement. Donc, dans l'objectif de lever en partie cette interrogation permanente, la section suivante présente une seconde méthode d'optimisation permettant de sonder une plus vaste gamme de solutions pour ainsi s'approcher de plus en plus d'une solution optimale et globale.

2.2.4 Optimisation à l'aide d'un algorithme génétique

Les algorithmes génétiques sont depuis fort longtemps étudiés et utilisés pour apporter une solution alternative de haut niveau, dans le but de résoudre des problèmes complexes. Ils permettent entre autres de déterminer les solutions qui tendent à être optimales pour des problèmes de plus en plus variés. En effet, les problèmes contenant des contraintes à respecter peuvent être résolus, tels que ceux comportant des relations d'égalité et/ou d'inégalité. Plusieurs domaines comportent diverses situations où ce type de méthode peut être appliquée, tels que les problèmes liés à la biologie, la médecine, la science informatique, l'ingénierie et même les sciences sociales.

Cette technique est principalement basée sur l'organisation et l'évolution de la génétique des organismes vivants sur cette planète. Les concepts de reproduction, de croisement et de mutation sont les trois idées sur lesquelles cette méthode est appuyée. Bien entendu, plusieurs autres types d'interactions sont proposés et utilisés pour améliorer l'efficacité et la robustesse de tels algorithmes [19].

Dans le cadre de cette étude, cette technique est utilisée pour vérifier si les solutions envisagées tendent vers des solutions optimales globales ou locales. Cette vérification est possible puisque les algorithmes génétiques contiennent une méthode d'amélioration qui tient compte d'une large plage de solutions pour ne pas se borner aux solutions voisines de celle envisagée. De cette manière, il est moins probable de perdre des informations

TAB. 2.1 – Terminologies de l’algorithme génétique versus celles liées à l’application.

Algorithme génétique	Application
allèle	valeur du paramètre
gène	paramètre
individu	ensemble de paramètres, solution
population	ensemble de plusieurs solutions

avantageuses et ainsi la méthode est beaucoup plus robuste que celle présentée à la section précédente.

Plus spécifiquement, cet algorithme est basé sur l’analyse de performance de plusieurs individus se regroupant dans une ou plusieurs populations. Chaque individu est similaire à une solution précise d’un mécanisme (une série de paramètres fixes) et il est analysé selon le critère d’évaluation défini. De plus, l’évolution de ce genre de calcul s’effectue suivant une série de générations, c’est-à-dire une suite de descendance parents/enfants. Les concepts de reproduction entre deux individus, les croisements de gènes (un seul paramètre d’une solution) et les mutations (modification de l’allèle (valeur attachée) d’un gène) sont présents et forment l’idée générale du fonctionnement de ce type de fonction. De cette manière, les rejetons obtenus après plusieurs générations tendent vers une ou des solutions qui optimisent (minimisent) l’indice d’évaluation choisi. À titre informatif seulement, le tableau 2.1 résume les différentes correspondances entre les termes de l’algorithme génétique et ceux liés aux mécanismes étudiés de cette étude.

De plus, la figure 2.31 illustre un exemple de résultats obtenus dans le cadre d’une optimisation arbitraire. Tout d’abord, il faut préciser que les outils *ga* et *gatool* du logiciel MATLAB³ ont été grandement utilisés pour faciliter l’intégration de cette technique de résolution à l’intérieur des études réalisées. Ceci étant dit, l’indice d’évaluation choisi dans le cadre de cette méthode est similaire à celui décrit pour les analyses de la section précédente (méthode séquentielle). Donc, la méthode tente, par le biais des algorithmes génétiques, de minimiser la somme des résultats des différents tests établis (le complémentaire de l’EPP et de l’EPCG et le nombre de contacts pour les quatre trajectoires). Ainsi, les cercles sur le graphique représentent l’évolution de la meilleure solution (meilleur individu) pour chacune des générations effectuées. Les triangles quant

³Le site web de la compagnie Mathworks est <http://www.mathworks.com/>.

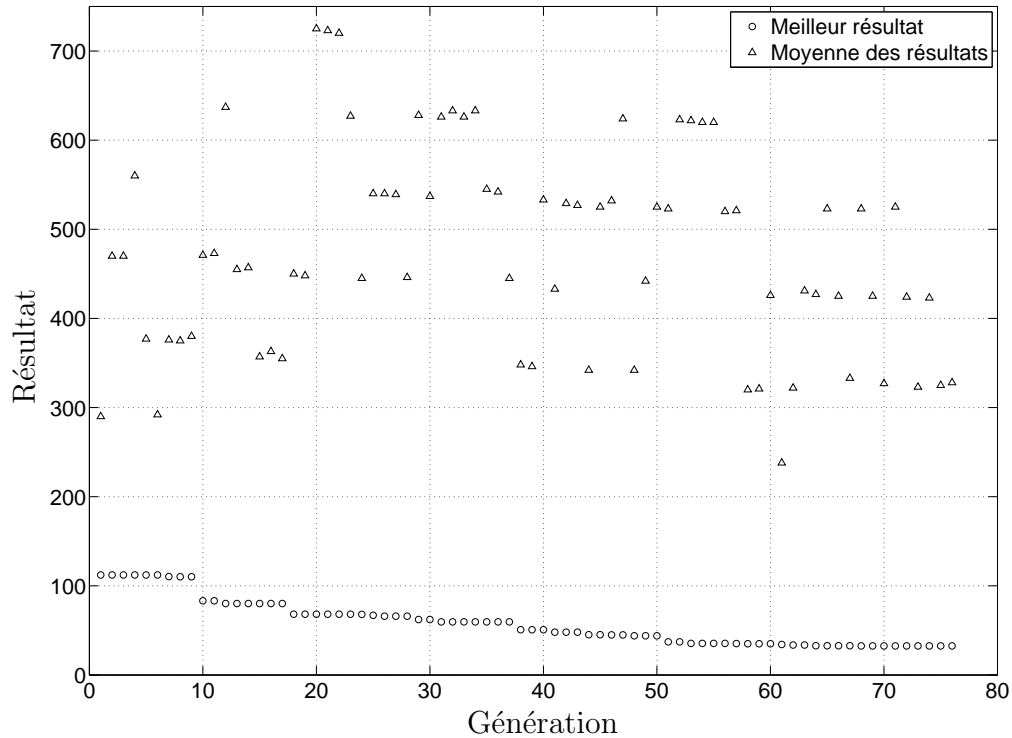


FIG. 2.31 – Exemple d’un résultat obtenu lors d’une optimisation utilisant l’algorithme génétique.

à eux illustrent les valeurs moyennes de tous les individus de la population pour chaque génération. Il faut préciser que cet exemple présente une analyse d’un mécanisme arbitraire et que dix individus ont été imposés initialement de manière aléatoire dans une même population. De plus, il est observé que la meilleure valeur de la population initiale (génération 1) est d’environ 110 et que celle-ci est améliorée jusqu’à une valeur d’environ 32 à la dernière génération (76^e génération).

Ce type d’analyse présente cependant un défaut qui est spécifique à l’étude présentée dans ce mémoire. Celui-ci étant qu’à chacune des générations, un nombre élevé de solutions doivent être calculées correspondant au nombre d’individus par population et ceci est bien entendu multiplié par le nombre de populations. Par conséquent, cette méthode est très lourde en frais de temps de calculs à cause de l’ampleur des tests définis dans les sections précédentes. En plus, ce type d’algorithme n’atteint un bon niveau d’efficacité qu’à la suite d’une série de générations qui doivent être idéalement assez nombreuses. Bien sûr, plus le nombre de générations effectuées est élevé, plus les solutions finales risquent de tendre vers une solution globalement optimale. Pour cette raison, il n’est pas possible d’utiliser strictement ce type d’analyse dans le cadre de la

présente étude. Ainsi, la section suivante propose le compromis envisagé pour mener à terme les analyses tout en vérifiant la direction que prend l'évolution des solutions au cours de leur optimisation.

2.2.5 Optimisation à l'aide d'un algorithme mixte

Dans l'optique de minimiser les désavantages et de rallier les avantages des deux méthodes proposées ci-haut, la méthodologie finalement utilisée pour les dernières analyses de ce mémoire est une alternance de l'optimisation à l'aide de l'algorithme séquentiel et de l'algorithme génétique. Cette alternance permet entre autres de préserver en partie la particularité de l'algorithme génétique soit de vérifier que les solutions envisagées tendent vers des solutions optimales mais aussi globales. Ainsi, une première optimisation à l'aide de l'algorithme séquentiel est complétée pour tous les paramètres et ensuite une optimisation à l'aide de l'algorithme génétique est effectuée dans le but de s'assurer que la direction entreprise correspond à une avenue prometteuse pour atteindre une bonne solution optimale. Ces étapes peuvent être répétées quelques fois jusqu'à l'obtention d'une solution qui atteint un niveau de performance maximal, c'est-à-dire que les optimisations ne permettent plus d'améliorer les résultats obtenus des divers tests pour ce mécanisme.

Ainsi, la méthode d'optimisation pour les mécanismes solutions liés au problème de cette étude est définie. Elle correspond à une optimisation à l'aide d'un algorithme mixte (alternance de l'utilisation de l'algorithme séquentiel suivi de l'algorithme génétique). Celle-ci présente l'avantage de permettre une amélioration relativement rapide à l'aide de la première série d'analyses (algorithme séquentiel) et de s'assurer par la suite que la direction prise s'avère être la plus avantageuse face à la minimisation des résultats des différents tests (algorithme génétique). Par contre, elle comporte quand même le désavantage d'être assez lourde en temps de calculs de par la nature même des tests préalablement définis et de leur incorporation à l'intérieur d'un algorithme génétique. Cependant, ce dernier algorithme est utilisé en imposant un nombre de générations réduit.

2.3 Conclusion

Ce chapitre a résumé de manière exhaustive les différents tests et les diverses techniques regroupés à l'intérieur de la méthodologie servant à optimiser la géométrie des mécanismes solutions de cette étude. Tout d'abord, le problème géométrique inverse des mécanismes parallèles entraînés à l'aide de câbles a été présenté et il a permis de comprendre les différents éléments de ce type d'architecture. Ces relations ont d'ailleurs conduit à l'élaboration des expressions donnant la valeur des coordonnées articulaires pour atteindre une pose précise et connue du mécanisme.

Ensuite, deux critères de performance ont été définis soient l'espace des poses polyvalentes et l'espace des poses de compensation gravitationnelle. Ces volumes donnent entre autres l'espace de travail où il est possible d'équilibrer tous les torseurs (EPP) ou un torseur en particulier (EPCG) et ceci à l'intérieur de l'espace de travail prescrit des plates-formes. Ces concepts forment les deux niveaux d'évaluation de performance utilisés pour comparer les mécanismes envisagés.

De plus, les équations exprimant la méthodologie qui permet de détecter les lieux d'interférence lors de différentes trajectoires ont été présentées. Celles-ci ont amené la définition de quatre types de croisement soient l'absence de contact lors d'une trajectoire, la présence de contacts virtuels, la présence de contacts physiques de type *léger* et ceux qualifiés de *sévère*. Aussi, pour comparer les architectures, quatre trajectoires ont été conçues. Ces parcours correspondent à une démarche humaine, une démarche humaine comportant une orientation inversée des pieds, une trajectoire ellipsoïdale balayant en partie la frontière de l'espace de travail prédéterminé d'une plate-forme et une dernière qui chemine aléatoirement à l'intérieur de cet espace de travail en orientant l'effecteur aux valeurs extrêmes des rotations exigées dans le cahier des charges de la section 1.3.

Par la suite, une méthode d'optimisation utilisant un algorithme séquentiel a été proposée dans le but d'améliorer les résultats des systèmes. Cette technique permet d'optimiser les mécanismes en analysant l'évolution des différents résultats obtenus suite à la variation de la valeur d'un seul paramètre à la fois. Cette façon de faire a l'avantage d'être très transparente. Par contre, elle ne garantit pas l'atteinte d'une solution globalement optimale.

Enfin, une méthode d'optimisation à l'aide de l'algorithme génétique est utilisée. Cette marche à suivre est basée sur une similitude entre le principe de l'évolution naturelle darwiniste et, dans le cas présent, la conception d'un mécanisme parallèle à câbles. Ainsi, les solutions présentant les meilleures caractéristiques survivent lors des analyses et elles s'améliorent généralement d'une génération à l'autre. Cette technique a l'avantage de permettre la vérification d'une plus grande bande passante de solutions à l'intérieur d'une même analyse grâce au fait qu'elle s'effectue à partir de plusieurs solutions au lieu d'une seule comme dans l'algorithme séquentiel. Donc, cette méthode améliore les chances que la solution finale tende vers une solution optimale et globale. Cependant, celle-ci présente un temps de calcul qui est beaucoup plus important que celle liée à la méthode séquentielle lorsqu'elle est appliquée à ce type de problème.

Finalement, la méthode idéale pour optimiser les architectures dans le cadre de ce mémoire se résume en un mélange des deux techniques précédentes soient l'algorithme séquentiel et l'algorithme génétique. L'optimisation à l'aide de l'algorithme séquentiel sera utilisée pour profiter du fait qu'elle est moins exigeante en frais de calcul et ensuite l'algorithme génétique sera utilisé pour acquérir une certaine assurance au niveau de l'obtention d'une solution finale qui tend à être une solution globalement optimale.

Ainsi, les différentes étapes à suivre pour optimiser les mécanismes solutions sont bien déterminées. Alors, le chapitre suivant propose une comparaison entre les diverses solutions obtenues chronologiquement au cours de cette maîtrise. D'ailleurs, ces géométries ont graduellement mené à l'obtention de l'architecture qui sera sélectionnée pour servir de base mécanique à la future interface de locomotion.

Chapitre 3

Obtention et description de la géométrie finale

Ce chapitre présente une énumération chronologique des mécanismes qui ont été élaborés au cours de cette étude. Tout d'abord, un outil supplémentaire est proposé pour mieux évaluer ces différentes géométries. Celui-ci est basé sur l'imposition de plusieurs combinaisons de plages de rotation exécutées lors d'une même trajectoire pour vérifier celles permettant d'éviter tous les contacts. Ensuite, une comparaison est effectuée en analysant l'ensemble des architectures selon les deux critères de performance et tous les tests liés à la détection des interférences. Enfin, le choix de la géométrie finale pour ce projet est effectué et complété en décrivant les particularités de cette dernière.

À l'intérieur de ce chapitre, les principales architectures qui ont démontré des propriétés intéressantes pour concevoir une interface de locomotion, s'appuyant sur la conception d'une plate-forme de marche entraînée à l'aide de câbles, sont présentées. Chacune d'entre elles est évaluée à l'aide des critères de performance ainsi que de l'ensemble des tests de détection d'interférences proposés au chapitre précédent. Ces résultats seront illustrés par le biais d'un tableau comparatif pour faciliter l'observation des avantages et des inconvénients de certains types de mécanismes lors d'une telle application.

Cependant, avant de passer à la comparaison des divers concepts de solution produits par les analyses de cette étude, un outil d'évaluation supplémentaire doit être élaboré pour compléter la série de tests utilisés. En effet, un nouvel algorithme est conçu pour permettre une vérification plus exhaustive du niveau d'évitement des interférences propre à chacune des architectures. Ainsi, la section suivante explique le fonctionnement et l'objectif d'un tel test.

3.1 Élaboration d'un outil supplémentaire

Ce dernier test est basé sur la théorie élaborée à la section 2.2.2 de ce mémoire concernant la détection des interférences. En guise de rappel, les différentes trajectoires élaborées dans cette section présentaient des moyens de s'assurer qu'il n'y ait pas de contacts mécaniques entre les divers éléments du système. Bien entendu, tout ceci s'exécutant lors de parcours qui étaient voués soit à reproduire une utilisation réelle et plausible du système, soit à s'assurer qu'il était possible d'atteindre les valeurs extrêmes de l'espace de travail en position ou encore à vérifier si le mécanisme permettait d'effectuer une trajectoire *exigeante* selon les 6 ddl (position et orientation). Ces tests étaient essentiels et opportuns dans un contexte d'optimisation, car ils reproduisaient une partie intéressante des conditions d'utilisation que devrait éventuellement affronter un tel système dans un usage réel. Par contre, si les analyses sont approfondies et que dorénavant l'optique est de vérifier à quel point les mécanismes permettent d'éviter les interférences, peu importe la pose de ces derniers à l'intérieur de l'espace de travail prédéterminé (voir tableau 1.1), un nouveau type de parcours s'impose. Celui-ci est composé d'une trajectoire *exigeante* selon les déplacements cartésiens en translation tel que décrit à la section 2.2.2.2. Cependant, il ne faut pas borner cette trajectoire à un seul

choix d'évolution de ces rotations tel qu'au chapitre précédent, mais bien s'approprier l'ensemble des possibilités. C'est-à-dire que le parcours choisi pour ce test devra être complété à répétition par la plate-forme, tout en modifiant les extremums des plages de rotation que celle-ci devra couvrir. Cette dernière stratégie permettra donc à l'effecteur de réaliser une multitude de trajectoires par rapport aux débattements angulaires. De cette manière, il sera possible de définir les combinaisons de plages de rotation dont l'architecture est potentiellement en mesure de parcourir la majeure partie de son espace de travail tridimensionnel en position, tout en évitant les différents types de contact pour cette seule plate-forme. Ainsi, il faut remarquer que ce test n'a pas pour but de vérifier les interférences possibles entre les deux plates-formes du système complet, mais bien d'évaluer les performances propres au mécanisme à l'étude.

En somme, ce test permet de connaître pour quelles combinaisons de plages de rotation (selon les axes de rotation montrés à la figure 2.4) il est possible d'effectuer une trajectoire cartésienne dite *exigeante*, tout en évitant les interférences à l'intérieur d'un seul mécanisme. Donc, dans l'objectif de comparer les différentes solutions, le résultat est exprimé sous la forme du pourcentage de l'ensemble des combinaisons possibles de ces plages de rotation pour lesquelles il n'y a pas de contacts. De plus, il faut préciser que ce test n'a pas été utilisé dans le cadre des optimisations, mais qu'il sert à titre de vérification du niveau de libération du mécanisme vis-à-vis ces éventuelles interférences.

Le parcours choisi, pour ce qui est de la portion translation de ce test, est celui de la trajectoire présentée à la section 2.2.2.2 à l'aide des figures 2.25, 2.28 et 2.29 (le mécanisme lié à la trajectoire du pied droit est arbitrairement sélectionné). Par la suite, en ce qui concerne les débattements angulaires, la plage de rotation préalablement définie pour chacun des axes (tableau 1.1) est discrétisée dans le but de compléter la trajectoire en orientant la plate-forme de manière à balayer l'ensemble des combinaisons de plages de rotation possibles. En fait, 1 331 évolutions de rotation (discrétisation selon onze valeurs pour chacun des trois axes de rotation) sont expérimentées dans le cadre de ce test. Plus spécifiquement, la première combinaison imposée lors de ce test est $\phi = -45^\circ$, $\theta = -45^\circ$ et $\psi = -20^\circ$, donc le balayage ($\pm\phi$, $\pm\theta$ et $\pm\psi$) de l'effecteur débute aux valeurs négatives des trois rotations. Ensuite, la deuxième combinaison est $\phi = -36^\circ$, $\theta = -45^\circ$ et $\psi = -20^\circ$ et ainsi de suite jusqu'à la dernière combinaison (1 331^e) soit $\phi = 45^\circ$, $\theta = 45^\circ$ et $\psi = 20^\circ$. Cette dernière présente donc une évolution angulaire s'initialisant aux valeurs positives des trois rotations et par conséquent, la plate-forme débute sa trajectoire selon une orientation opposée à celle proposée par

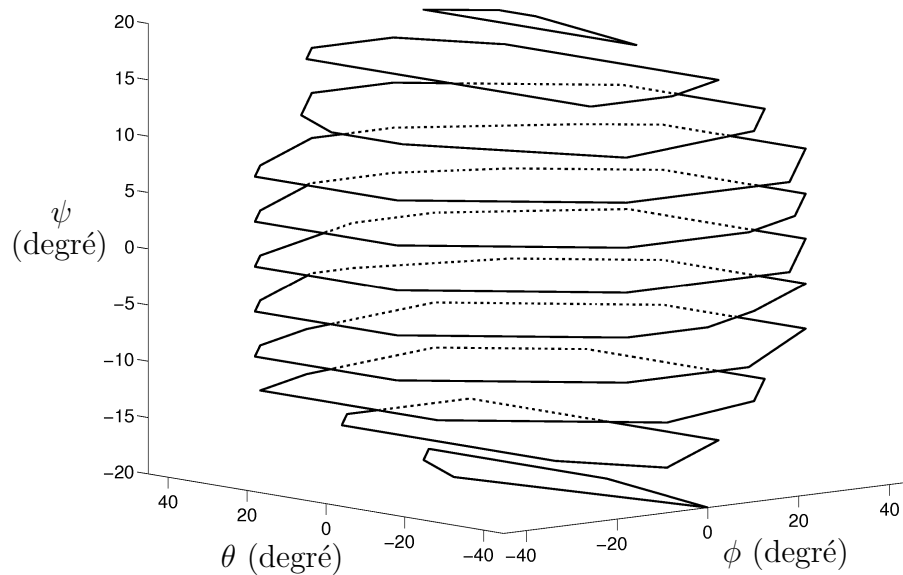


FIG. 3.1 – Graphique du résultat obtenu suite à l'utilisation de l'outil supplémentaire.

la première combinaison, tout en s'exécutant selon les mêmes amplitudes de plages de débattement angulaire. Alors, ceci démontre bien la profondeur de cet outil en ce qui a trait à la vérification de l'évitement des interférences à l'intérieur de l'espace de travail souhaité selon les six ddl.

À titre d'exemple, la figure 3.1 illustre un résultat obtenu pour un mécanisme arbitraire. Il y est représenté les frontières des zones contenant les plages de rotation admissibles selon onze plans liés à la plage de rotation autour de l'axe X (rotation selon l'angle ψ). Cet exemple montre ainsi qu'environ 50 % des plages de rotation sont accessibles avec ce mécanisme lors de cette trajectoire en évitant les interférences. Enfin, cet espace angulaire tridimensionnel est évidemment centré autour de l'orientation de référence ($\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ et $\psi = 0^\circ$). Finalement, les valeurs inscrites sur les trois axes de ce graphique représentent la position angulaire initiale selon laquelle chacune des itérations du test se sont déroulées soit de -45° à 45° pour ϕ ainsi que pour θ et de -20° à 20° pour ψ .

Le dernier outil d'évaluation ainsi défini, les principales architectures obtenues dans le cadre de cette maîtrise seront donc comparées les unes avec les autres, dans l'objectif de mettre en évidence les particularités avantageuses de la solution finale.

TAB. 3.1 – Parcours chronologique des optimisations de cette étude.

Mécanisme	EPP	T1	T3	T2	EPCG	T4	Outil +
1	—	—	—	—	—	—	—
2	X	—	—	—	—	—	—
3	X	X	X	—	—	—	—
4	X	X	X	X	X	—	—
5	X	X	X	X	X	—	—
6	X	X	X	X	X	X	—

3.2 Évolution chronologique et comparaison des différents mécanismes

Cette section propose les mécanismes obtenus à la suite d’optimisations géométriques. Ces optimisations ont été modifiées au cours de cette étude pour mieux répondre aux exigences d’une interface de locomotion. Par conséquent, les premiers mécanismes élaborés par le biais de cette méthode n’ont pas été conçus dans des conditions aussi exigeantes que les derniers. Ainsi, pour illustrer ce fait, le tableau 3.1 indique les tests utilisés pour optimiser chacun des six mécanismes qui seront comparés dans ce chapitre. Ces concepts seront présentés en ordre chronologique d’obtention et il en est ainsi pour les deux critères de performance et les autres tests. Donc, l’évolution chronologique des divers éléments peut se lire de la gauche vers la droite concernant la création des outils d’analyse et du haut vers le bas en ce qui a trait à l’ordre des solutions engendrées par ce travail.

En résumé, ce tableau laisse présumer que le dernier mécanisme devrait éventuellement être celui qui répond le mieux aux exigences les plus sévères qui ont été élaborées dans le cadre de ce travail. En effet, les «X» représentent la gamme des outils utilisés pour optimiser les différentes géométries qui seront présentées ci-dessous. Il faut mentionner que les notations T1, T2, T3 et T4 représentent les tests de détection des interférences lors des trajectoires 1 à 4 définies à la section 2.2.2.2 en utilisant la même notation qu’à la section 2.2.3. Finalement, l’utilisation du terme «Outil +» se rapporte au test élaboré tel un outil supplémentaire à la section 3.1.

Maintenant, le moment est adéquat pour illustrer les six architectures choisies pour

être incorporées à l'intérieur de ce chapitre. Ces mécanismes présentent de bons résultats relativement aux outils avec lesquels ils ont été optimisés. Au cours des pages suivantes, chacun d'entre eux sera décrit en insistant sur les particularités qui le différencient par rapport à celui qui le précède selon la chronologie présentée. De plus, il faut spécifier que leurs paramètres géométriques sont disponibles à l'annexe A et que les lignes discontinues illustrées à l'intérieur de ces figures représenteront les câbles orientés vers le sol tandis que celles continues représenteront ceux dirigés vers le haut. Finalement, certaines de ces images illustreront le système dans son ensemble en utilisant une couleur pâle pour les entités de la plate-forme gauche et une couleur foncée pour celles de la plate-forme droite.

Tout d'abord, le mécanisme 1 est celui qui a été initialement élaboré. Ce dernier représente le concept de base à la suite duquel les premières optimisations ont été réalisées. Ainsi, il a été présenté à la section 1.4.2 du chapitre 1 et illustré à l'aide des figures 1.5 et 1.7. Il n'est donc pas reproduit ici une seconde fois. De plus, cette solution n'est le résultat d'aucune optimisation (tel que le démontre le tableau 3.1) mises à part les réflexions l'ayant conceptualisée.

Donc, suite à la première série d'optimisations complétées à l'aide du critère de performance se résumant en la maximisation des résultats du mécanisme vis-à-vis l'EPP, une nouvelle architecture a été élaborée (mécanisme 2). Tout d'abord, cette première étude était vouée à optimiser uniquement la position des enrouleurs sur le cadre externe du système et non celle des points d'attache sur les effecteurs. Ainsi, cette géométrie améliorée a permis d'augmenter la performance de la solution initiale, qui était à l'origine de 0 %, vers une couverture d'environ 55 % de l'espace de travail prescrit. La figure 3.2 illustre ce nouveau concept en représentant la plate-forme de droite à l'aide d'une vue tridimensionnelle et la figure 3.3 montre l'arrangement du système complet par le biais d'une vue XY. Cette solution est sensiblement similaire à l'idée initiale, sauf en ce qui a trait à la répartition des points d'attache des câbles sur le cadre externe. De plus, il est important de garder en mémoire que cette architecture n'a pas été optimisée à l'aide des outils utilisant la détection des interférences. Ce fait est toutefois rapidement mis en évidence par la figure 3.3, dans laquelle il est aisé d'imaginer plusieurs combinaisons d'entités du système qui pourraient se croiser lors de la simulation d'une trajectoire quelconque. Par ailleurs, cette même remarque peut être faite en ce qui concerne le concept initial (voir figure 1.7).

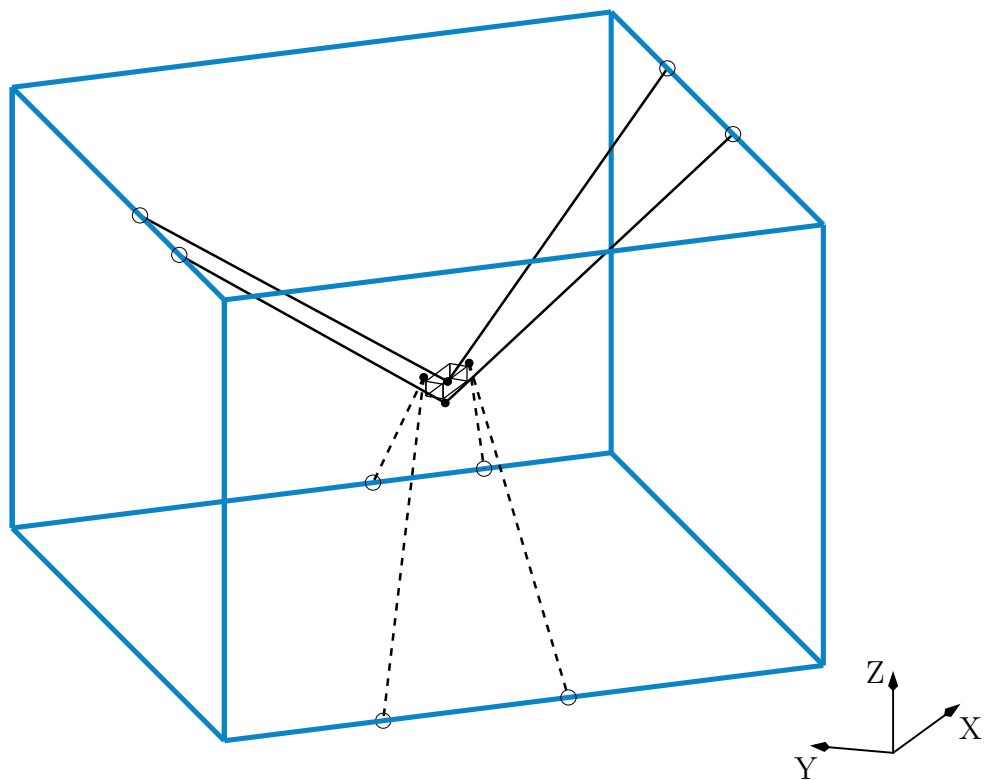


FIG. 3.2 – Solution 2 : vue tridimensionnelle du mécanisme.

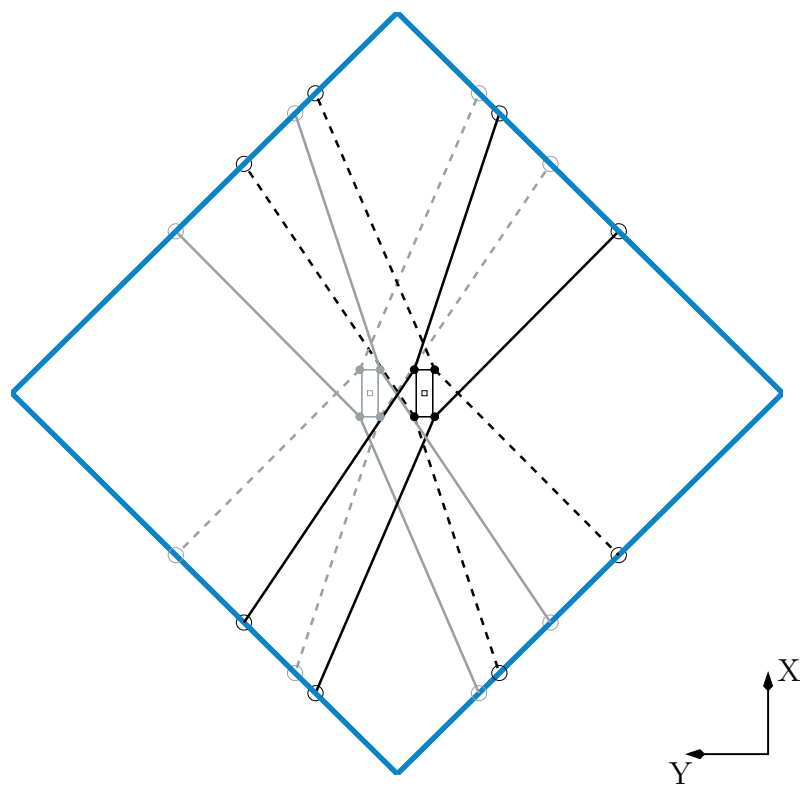


FIG. 3.3 – Solution 2 : vue de dessus du système global.

Par la suite, dans l'optique de pallier à l'absence de la vérification des interférences à l'intérieur de la méthode d'optimisation, une première ébauche de la stratégie de détection des contacts entre les câbles du système a été ajoutée aux algorithmes d'analyse. La nécessité de prévoir ces croisements et ainsi de les éviter le plus possible a donc imposé l'utilisation de la technique présentée à la section 2.2.2.1. Une première avenue a été de vérifier les contacts mécaniques entre toutes les combinaisons de câbles incluses dans le système. Ainsi, les interactions entre les seize câbles du système ont été analysées lors d'une trajectoire de marche (T1) et d'une trajectoire ellipsoïdale (T3). Enfin, il faut noter que cette version de la technique de détection des interférences ne contenait pas la vérification des contacts entre un câble et une arête de la structure représentant l'effecteur.

Avant d'initier une nouvelle série d'analyses, quelques modifications ont été apportées à la solution 2. Premièrement, les espaces de travail des deux plates-formes ont été distancés dans l'objectif de diminuer les risques de contact entre les câbles des deux mécanismes. Par conséquent, la forme de la base a été modifiée vers une forme carrée dont les arêtes sont dorénavant parallèles aux prismes représentant l'effecteur (dont l'orientation est celle de référence) pour faciliter ces déplacements selon l'axe Y du repère global. De plus, une attention particulière a été portée au fait que les câbles orientés vers le haut du mécanisme droit devraient superposer les câbles orientés vers le bas du mécanisme gauche et vice versa pour minimiser les risques de collision. Cet artifice peut être observé en comparant les figures 3.3 (mécanisme 2) et 3.5 (mécanisme 3). Finalement, la méthode d'optimisation elle-même a été modifiée soit de l'utilisation unique de l'algorithme séquentiel vers l'utilisation de l'algorithme mixte présenté à la section 2.2.5.

Ensuite, après maintes séries d'optimisations, le mécanisme 3 est apparu tel que présenté à l'aide des figures 3.4, 3.5 et 3.6. À partir de ces illustrations, il est remarqué que les plates-formes sont distancées selon l'axe Y et qu'une structure pour supporter les pieds de l'utilisateur a été ajoutée à chacun de ces effecteurs. De plus, ce nouveau mécanisme a permis d'obtenir une couverture de l'espace de travail évaluée à 94,8 % et il a présenté peu d'interférences lors des deux trajectoires pour lesquelles il a été optimisé. Cependant, les algorithmes de détection des croisements ne prenaient pas en compte les contacts entre un câble et une arête de la structure de l'effecteur, tel que précisé précédemment. Par conséquent, les résultats obtenus à la suite de cette optimisation, concernant les interférences, ne sont pas représentatifs et ils ne sont donc

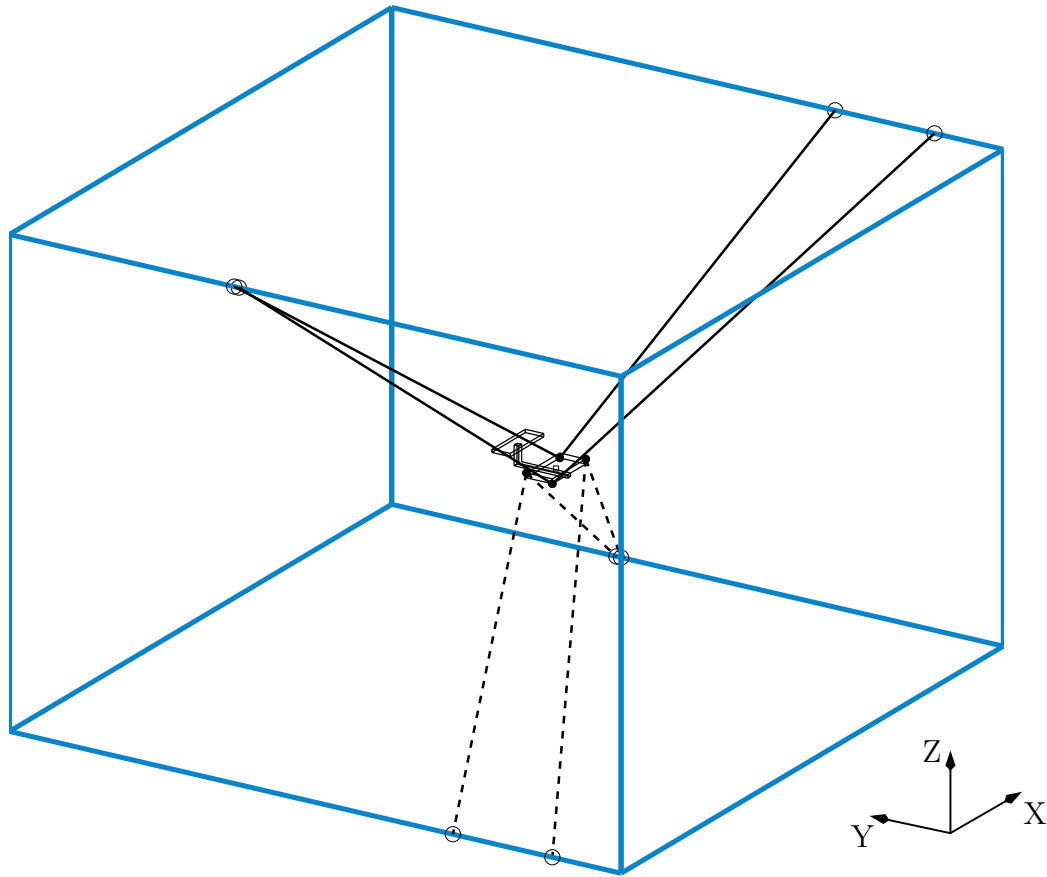


FIG. 3.4 – Solution 3 : vue tridimensionnelle du mécanisme.

pas présentés. Néanmoins, ceux obtenus à l'aide des tests complets feront l'objet d'une discussion plus loin dans le présent chapitre. Enfin, il faut préciser que les optimisations ont été complétées en considérant les coordonnées des points d'attache des câbles sur le cadre externe ainsi que ceux situés sur l'effecteur comme paramètres à optimiser.

Dans la continuité du projet, une troisième trajectoire est ajoutée dans la série d'outils servant à détecter les interférences soit celle de la démarche humaine comportant des orientations inversées (T2). De plus, un nouveau critère de performance est créé dans l'optique de vérifier le pourcentage de l'espace de travail prescrit pour lequel les mécanismes sont en mesure d'équilibrer le torseur lié à leur poids (voir la section 2.2.1 concernant l'EPCG). Enfin, le déplacement des espaces de travail des deux plateformes, dans des directions opposées selon l'axe X du repère global, a été effectué pour accentuer l'évitement des interférences et pour libérer le plus possible l'espace où l'utilisateur sera positionné dans une utilisation future du concept. En effet, l'utilisateur du système devra être libre de tout contact avec les différentes composantes du système pour maintenir un niveau de sécurité adéquat.

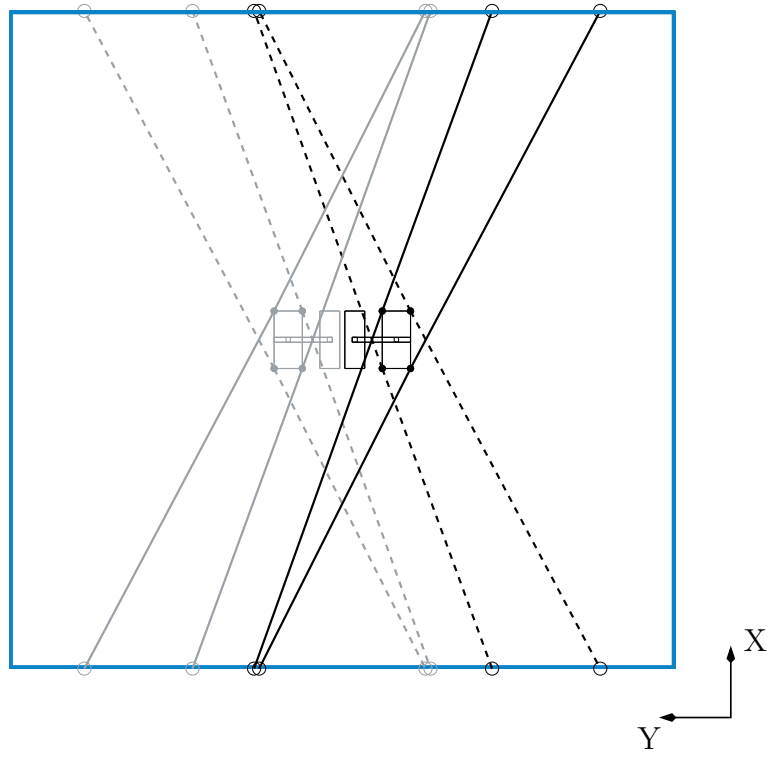


FIG. 3.5 – Solution 3 : vue de dessus du système global.

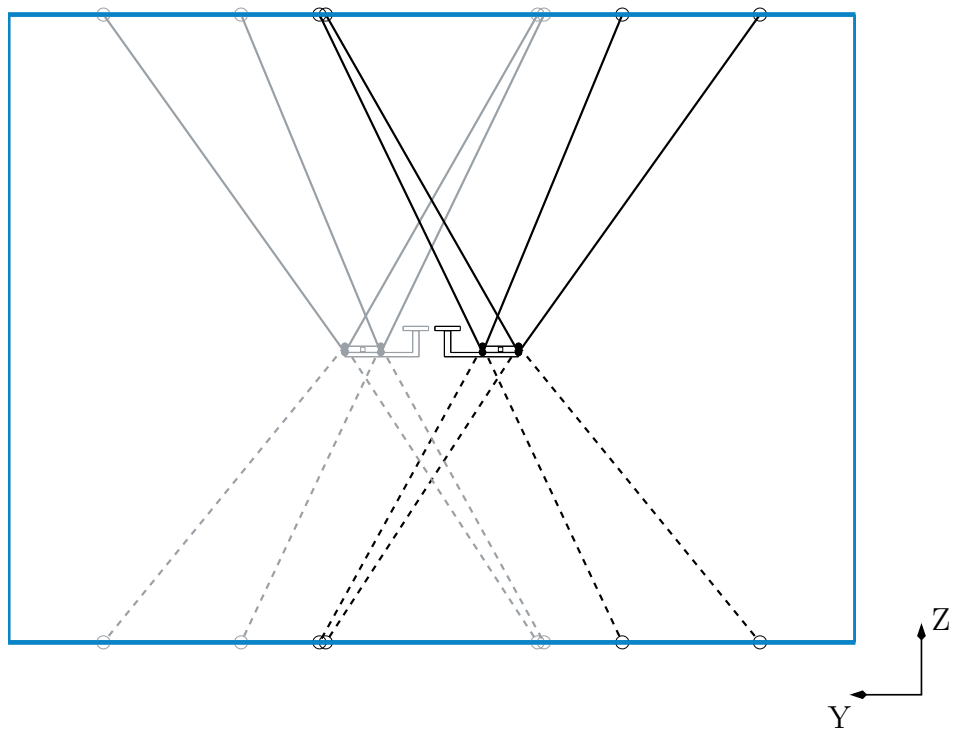


FIG. 3.6 – Solution 3 : vue de derrière du système global.

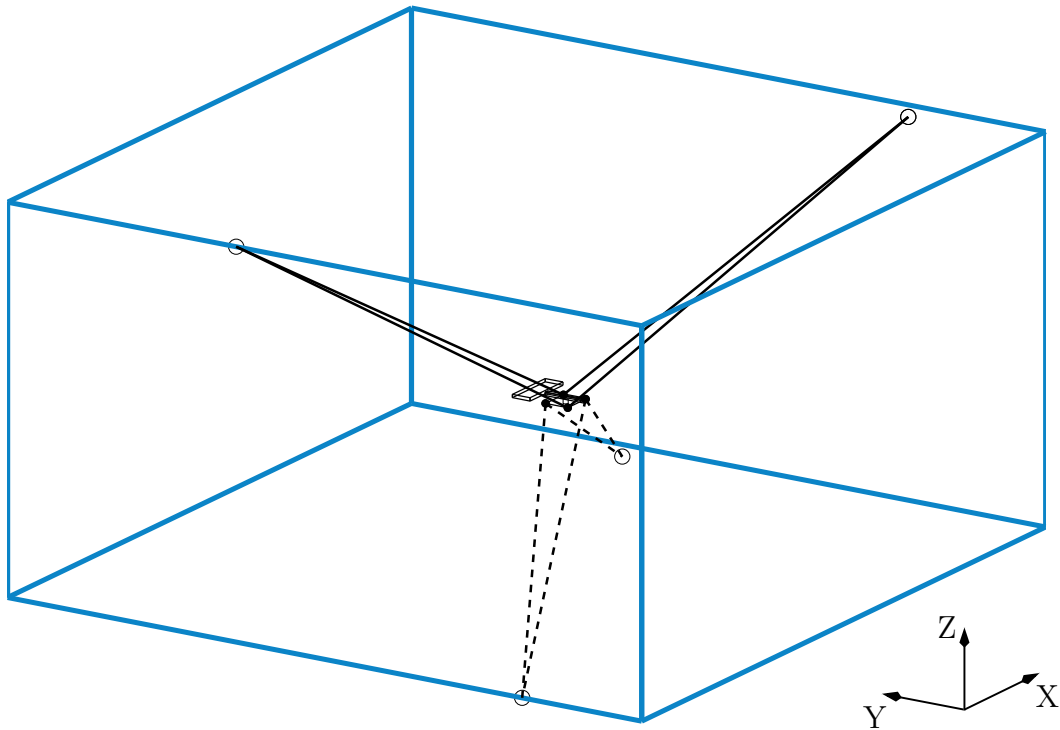


FIG. 3.7 – Solution 4 : vue tridimensionnelle du mécanisme.

Ainsi, cette méthode, plus complète pour optimiser les mécanismes, a mené à la géométrie illustrée à l'aide des figures 3.7, 3.8 et 3.9 (mécanisme 4). Cette dernière a démontré des résultats sensiblement équivalents à ceux du mécanisme 3, autant au niveau de l'EPP (94,6 %) qu'au niveau du nombre de contacts lors des différentes trajectoires. Cependant, la nouvelle architecture a l'avantage de dégager plus adéquatement l'espace requis au maintien de la personne à l'intérieur de l'interface de locomotion, grâce au fait que les câbles orientés vers le haut des deux effecteurs sont plus éloignés des plaques de support des pieds que ceux de la solution précédente. Finalement, elle a obtenu un résultat de 94,7 % en ce qui a trait à la couverture de l'espace de travail par l'EPCG.

Ensuite, en conséquence des divers problèmes anticipés liés à la gestion des interférences (perte temporaire de l'actionnement d'un câble, augmentation du niveau de tension à l'intérieur des câbles supports restants et chocs possiblement ressentis à l'utilisateur lors du transfert de l'effort articulaire du câble relâché vers les autres), l'objectif principal du projet s'est alors dirigé vers l'évitement total des interférences, au détriment d'une légère perte de performance relativement à l'EPP et à l'EPCG. De plus, lors du relâchement d'un câble, même si la théorie dicte qu'il est possible de contrôler six ddl à l'aide de sept câbles, il n'en est pas toujours ainsi en pratique vu

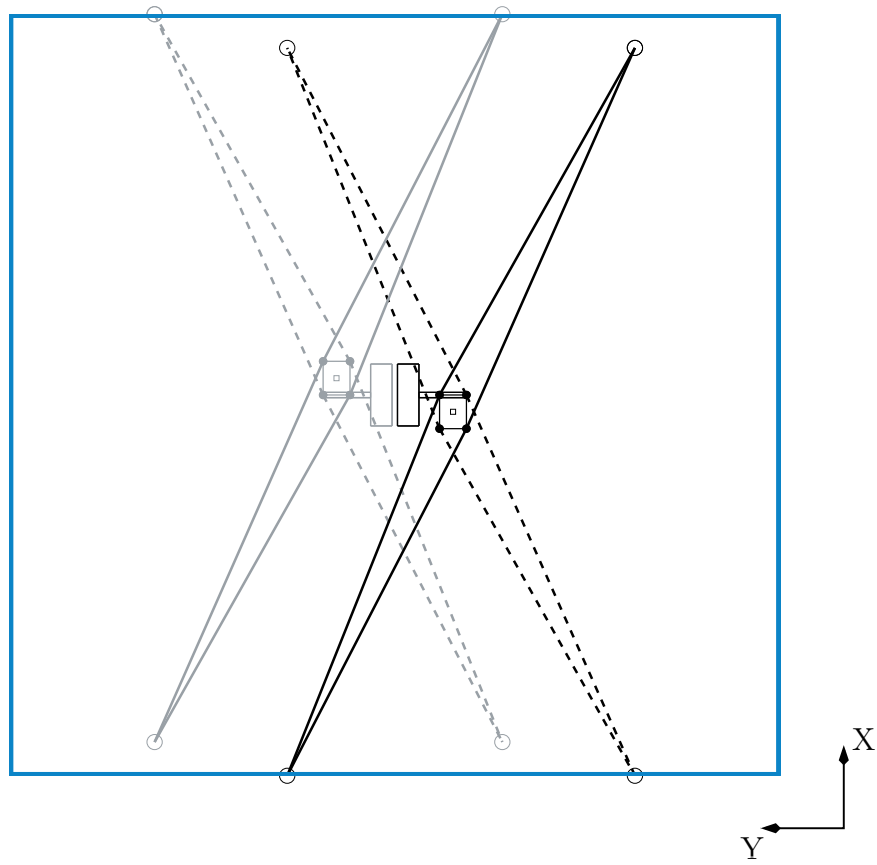


FIG. 3.8 – Solution 4 : vue de dessus du système global.

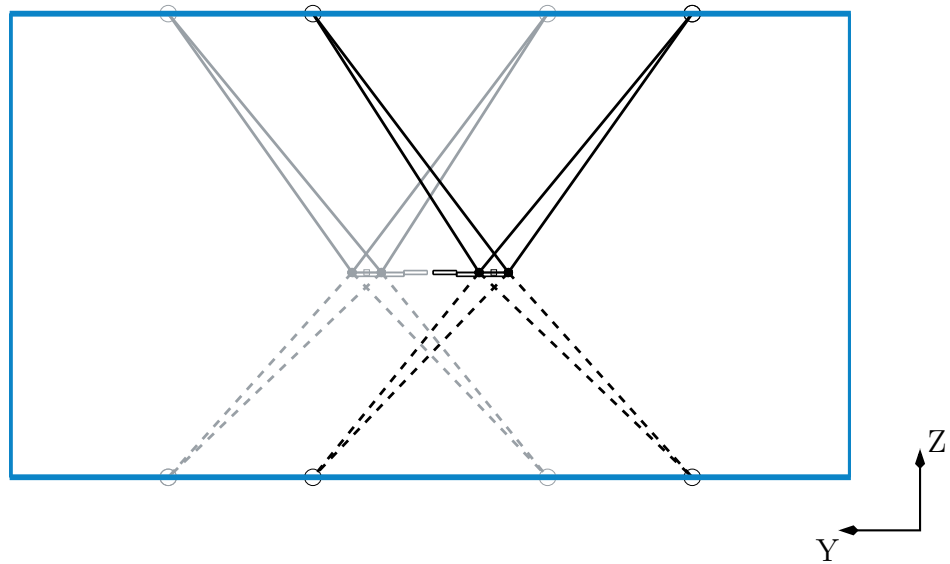


FIG. 3.9 – Solution 4 : vue de derrière du système global.

que le mécanisme est optimisé pour l'utilisation de huit câbles et qu'il se peut qu'il soit impossible de le contrôler à l'aide de seulement sept, tout dépendant de la pose, du câble relâché et du torseur à engendrer. Par conséquent, une nouvelle avenue de solution a été proposée. Cette dernière est fondée sur le même principe de conception que celui du robot Falcon (manipulateur parallèle entraîné par sept câbles réalisé par un groupe de recherche de l'Université Ritsumeikan au Japon [28]). Cette idée permet alors de séparer complètement les deux mécanismes de chaque côté de l'utilisateur. De cette manière, la quasi-totalité des risques de contact mécanique entre les deux sous-ensembles de câbles est éliminée. Finalement, les outils de détection des interférences ont été améliorés, en ajoutant la vérification des contacts entre les câbles et les arêtes de la tige formant une partie de l'effecteur.

Ainsi, suite à de nombreuses optimisations à l'aide de l'algorithme mixte, toutes ces modifications ont mené au cinquième mécanisme solution. L'architecture résultante est illustrée aux figures 3.10, 3.11 et 3.12. Il est remarqué à l'aide de la figure 3.10 que cette nouvelle géométrie est très différente des précédentes. Les points d'attache des câbles sur la plate-forme sont plus distants et ils sont majoritairement liés ensemble par le biais d'une structure sous forme de tige. En observant les figures 3.11 et 3.12, il est facile de confirmer le fait que tous les câbles attachés à l'effecteur droit (noir) sont distribués vers la droite de l'éventuelle position de l'utilisateur et il en est ainsi pour les câbles de l'effecteur gauche (gris) qui sont placés du côté gauche du système. Par conséquent, le risque d'interférence entre les câbles du sous-ensemble gauche et ceux du sous-ensemble droit est quasiment éliminé.

Du côté des résultats, cette solution propose une couverture de l'EPP évaluée à 97,6 % et à 100 % pour ce qui est de l'EPCG. Ces dernières valeurs sont celles maximales ayant été obtenues au cours de ce travail. Aucun autre mécanisme n'a atteint ces performances mis à part la solution 5 elle-même. De plus, elle présentait très peu de contacts lors des trois différentes trajectoires testées. Cependant, cette nouvelle direction de recherche a obligé l'augmentation des dimensions du cadre externe passant d'environ $4 \times 4 \times 3$ mètres pour les mécanismes précédents à environ $7,5 \times 4,5 \times 2,5$ mètres et ceci pour engendrer des résultats performants par rapport à l'EPP et à l'EPCG.

Enfin, le mécanisme précédent a l'inconvénient de présenter des dimensions hors tout quelque peu élevées. Dans le but de diminuer ces dimensions, du moins en ce qui concerne celle selon l'axe X (7,5 mètres), une nouvelle série d'optimisations a été

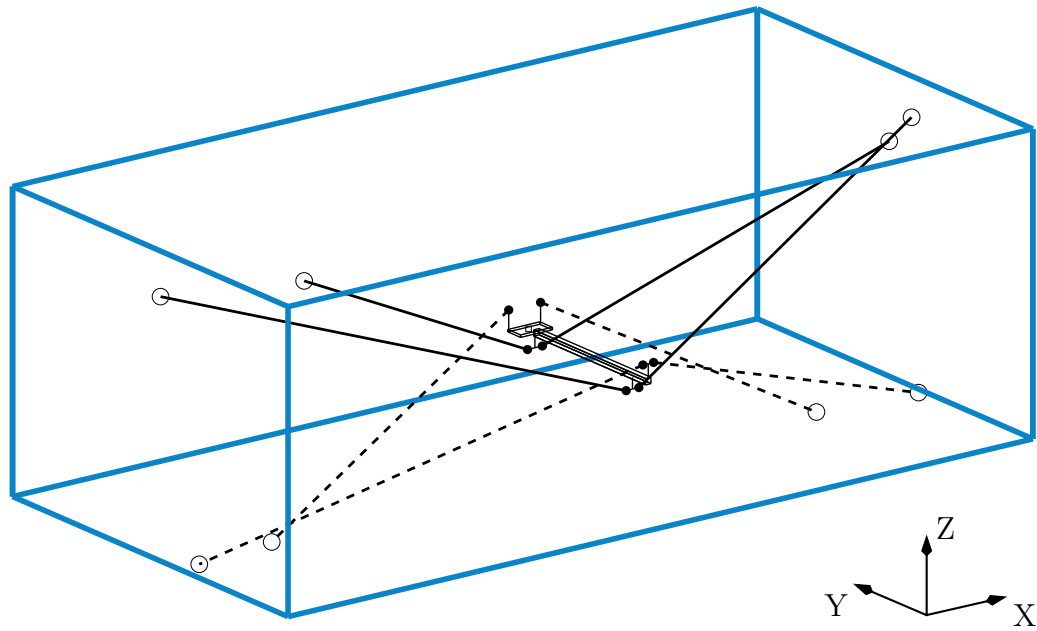


FIG. 3.10 – Solution 5 : vue tridimensionnelle du mécanisme.

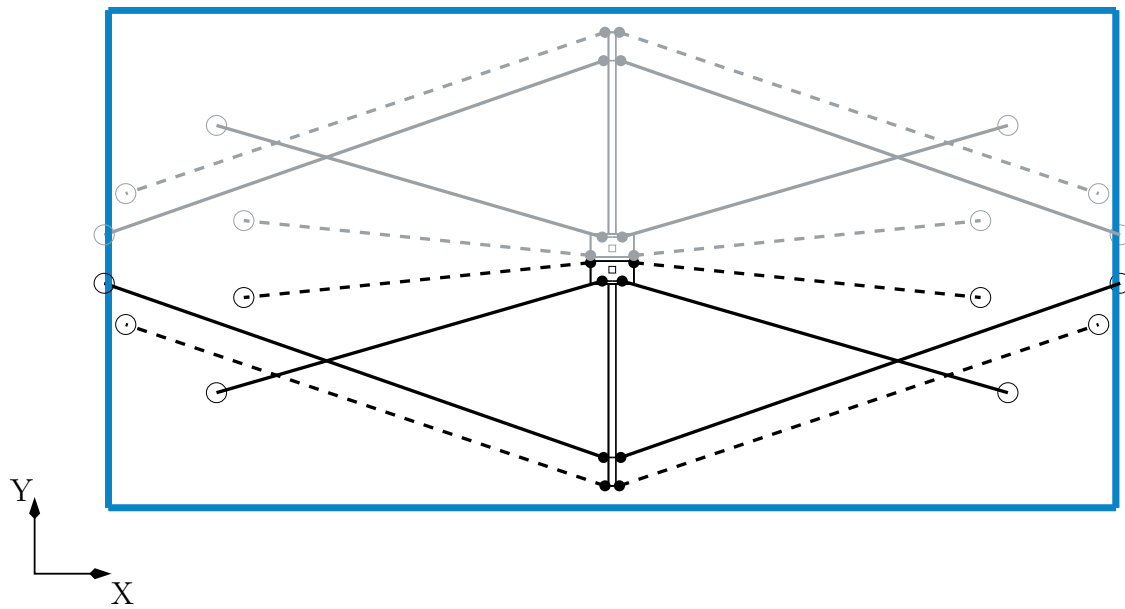


FIG. 3.11 – Solution 5 : vue de dessus du système global.

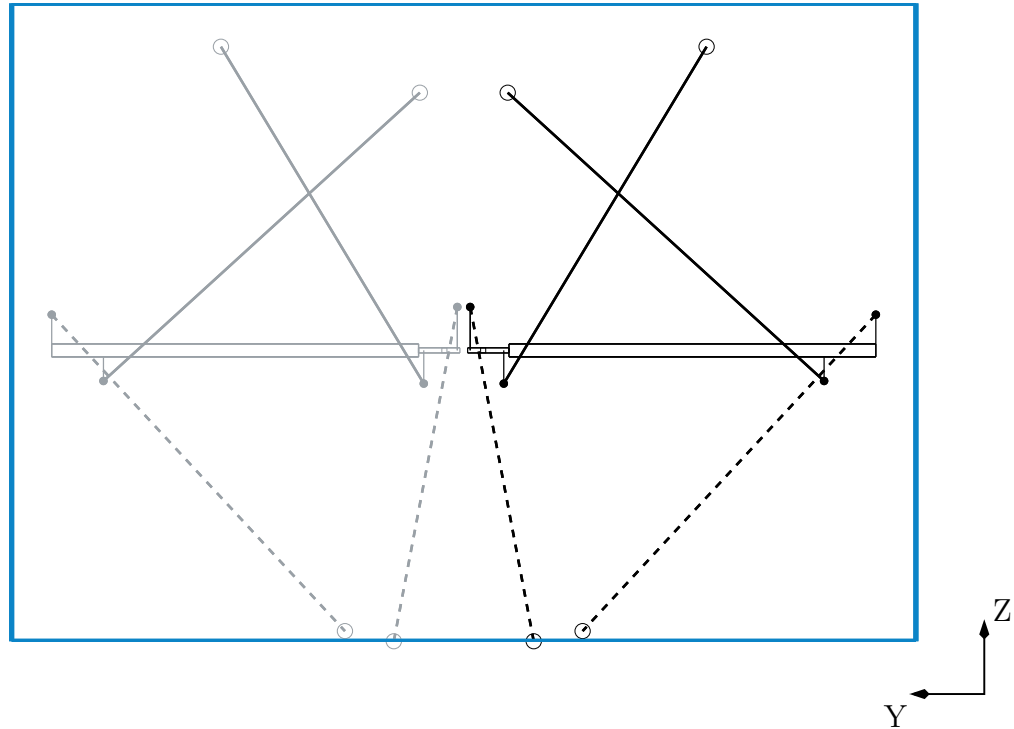


FIG. 3.12 – Solution 5 : vue de derrière du système global.

lancée en fixant cette valeur à 6 mètres. Cette dernière valeur semblait raisonnable pour effectuer un compromis entre les résultats de l'ancien mécanisme et la diminution de ces dimensions hors tout. Ensuite, il a été décidé d'augmenter la distance entre les points d'attache situés sur la plate-forme et à proximité des pieds de l'utilisateur pour libérer convenablement cet espace dans l'objectif de faciliter l'ajout d'un mode de fixation pour les pieds à cet endroit. Au niveau des outils d'optimisation, l'ajout de la vérification des contacts entre les câbles et les arêtes des supports au pied, formant la continuité des tiges, est effectué lors des test de détection des interférences. De plus, la création d'une trajectoire supplémentaire (trajectoire *exigeante* de la section 2.2.2.2) permettant de minimiser davantage les lieux de croisements à l'intérieur de l'espace de travail prescrit termine les améliorations apportées au niveau des algorithmes d'optimisation. De cette manière, la sixième architecture a été optimisée à partir de la série complète des outils d'évaluation présentés au sein du chapitre 2.

Finalement, à la suite de plusieurs cycles d'optimisation, la dernière géométrie (mécanisme 6) a été obtenue et elle est présentée à l'aide des figures 3.13, 3.14 et 3.15. La figure 3.13 démontre que ce dernier mécanisme est à priori très similaire à son prédécesseur. Cependant, les figures 3.14 et 3.15 aident à visualiser les différences majeures

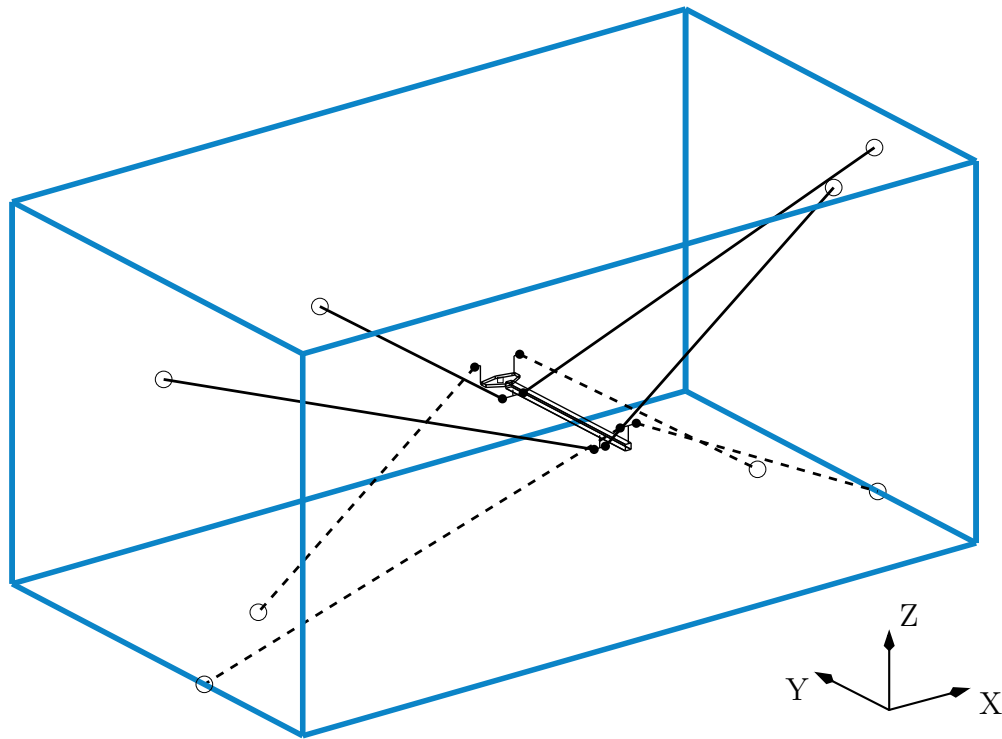


FIG. 3.13 – Solution 6 : vue tridimensionnelle du mécanisme.

caractérisant cette solution par rapport à la solution 5. Premièrement, la distance entre les points d'attache situés au niveau du support au pied selon l'axe X est augmentée de 0,3 mètre à 0,4 mètre. Ensuite, la dimension hors tout du système selon ce même axe est diminuée à 6 mètres tel que discuté ci-haut tandis que la hauteur est augmentée à 3 mètres. Donc, les dimensions hors tout du nouveau mécanisme sont de $6 \times 3,5 \times 3$ mètres.

En ce qui a trait aux résultats engendrés par cette solution, ils ont légèrement diminué à une couverture évaluée à 84,2 % par rapport à l'EPP et à 97,4 % pour l'EPCG. Cette légère baisse de performance est évidemment due au compromis effectué entre la diminution des dimensions hors tout du système versus les pourcentages de couverture de l'espace de travail par l'EPP et l'EPCG. Par contre, au niveau de la détection des interférences, cette architecture est de loin celle qui présente les résultats les plus avantageux et ceci est sans aucun doute lié à l'utilisation d'outils d'analyse plus exigeants dans le cadre de sa création. Ces divers résultats seront illustrés à l'aide du tableau 3.2 et ils seront commentés plus en détail à la prochaine section.

Alors, maintenant que les six mécanismes solutions obtenus chronologiquement lors

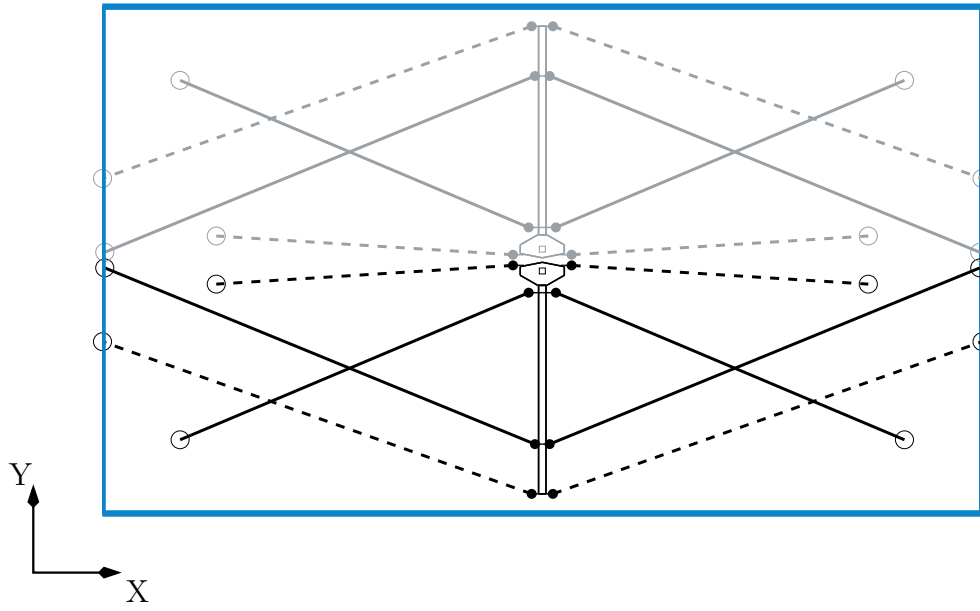


FIG. 3.14 – Solution 6 : vue de dessus du système global.

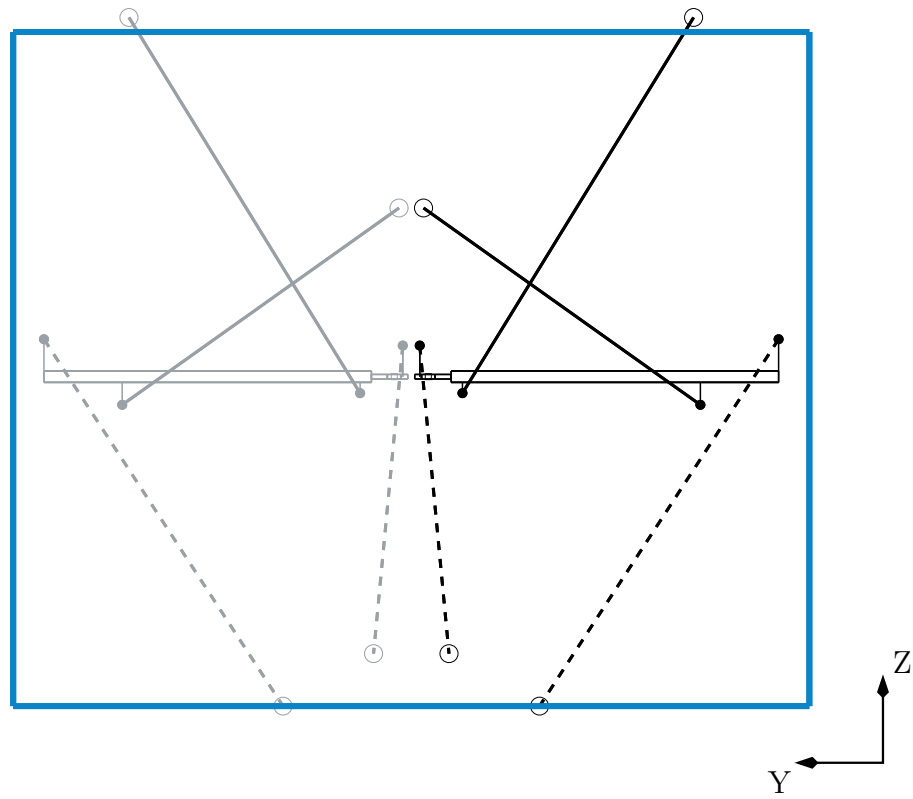


FIG. 3.15 – Solution 6 : vue de derrière du système global.

TAB. 3.2 – Comparaison des résultats pour les mécanismes obtenus.

Mécanisme	EPP	T1	T3	T2	EPCG	T4	Outil +
1	0,0 %	111	272	106	16,1 %	4 402	0,1 %
2	55,0 %	157	929	135	66,2 %	5 466	0,1 %
3	94,8 %	1 376	1 276	1 383	96,3 %	25 173	0,0 %
4	94,6 %	1 394	1 261	1 536	94,7 %	23 764	0,0 %
5	97,6 %	28	0	24	100,0 %	509	49,4 %
6	84,2 %	4	0	0	97,4 %	57	91,3 %

de ce travail ont été présentés, il est permis de comparer les résultats qu'ils ont engendrés. Ce résumé est obtenu à la suite de l'analyse de toutes les solutions à l'aide de l'ensemble des outils proposés dans ce mémoire. Alors, le tableau 3.2 contient les résultats représentant les performances de ces différentes architectures par rapport aux tests les plus complets de ce travail. Par conséquent, les valeurs liées à la détection des interférences n'indiquent pas les résultats observés lors de leur obtention au cours du projet, mais plutôt ceux qu'ils auraient engendrés à la suite de la même panoplie de tests qui a été imposée au mécanisme 6. Cette manière de comparer les diverses géométries à l'avantage de démontrer les lacunes présentes dans les premières méthodes d'optimisation et ainsi de constater que les derniers algorithmes sont beaucoup plus exigeants que les précédents. Néanmoins, ces valeurs devraient illustrer le parcours qui a été franchi par cette étude en ce qui a trait aux performances liées à l'EPP et à l'EPCG, car ces critères sont demeurés inchangés tout au long du déroulement de cette étude.

Tout d'abord, le tableau 3.2 est construit suivant la même présentation que celle du tableau 3.1. Contrairement à ce qui a été présenté dans les exemples du chapitre 2, les résultats relatifs à la détection des interférences pour le projet sont engendrés en utilisant une valeur de $\epsilon = 0,003$ mètre (voir les équations (2.19) et (2.20)). Cette valeur permet de valider les concepts pour des diamètres de câble allant jusqu'à trois millimètres pour les contacts entre deux câbles (une distance de trois millimètres entre les centres du câble 1 et du câble 2) et jusqu'à six millimètres pour les contacts entre un câble et une arête d'une partie de la structure de l'effecteur (une distance de trois millimètres entre le centre du câble et l'arête). Pour ce qui est des critères de performance tels que l'EPP et l'EPCG, les résultats présentés sont obtenus pour des plages de rotation de $\phi = \pm 45^\circ$, $\theta = \pm 45^\circ$ et $\psi = \pm 20^\circ$ en discrétisant l'espace de travail en

1 000 positions tel que décrit à la section 2.2.1.

Donc, ce tableau démontre une évolution quasi constante de la solution 1 jusqu'à la solution 5 par rapport aux pourcentages de couverture de l'EPP et de l'EPCG sur l'espace de travail prescrit. Ensuite, la solution 6 régresse légèrement, ceci étant attribuable au compromis effectué (discuté ci-haut) entre les dimensions hors tout et ses performances. À titre d'information, la solution initiale (mécanisme 1) présente un résultat pour l'EPP de 0 % contrairement à 66,8 % tel que présenté à la figure 2.7. Cette différence est expliquée par le fait que le résultat illustré à la figure 2.7 a été déterminé en imposant des plages de débattement angulaire de $\phi = \pm 20^\circ$, $\theta = \pm 20^\circ$ et $\psi = \pm 20^\circ$ au lieu de $\phi = \pm 45^\circ$, $\theta = \pm 45^\circ$ et $\psi = \pm 20^\circ$. Alors, cette solution de base ne présentait pas une réelle solution envisageable. Par contre, elle fut quand même un bon point de départ pour les analyses de cette étude. Au niveau de la détection des contacts, les quatre premières solutions ne présentent pas des résultats souhaitables et ceci est explicable à partir du fait qu'elles n'ont pas été optimisées en considérant les interférences possibles entre les câbles et les arêtes de la structure de leurs effecteurs. Ainsi, il y a une nette amélioration dès le mécanisme 5 et elle se poursuit jusqu'à l'obtention de la dernière architecture. D'ailleurs, cette dernière se démarque par ces résultats : elle ne contient que quatre contacts lors de la trajectoire de la marche (T1) et seulement 57 lors de la trajectoire *exigeante* (T4). À l'intérieur des deux autres parcours (T3 et T2), les différents croisements sont totalement évités. Finalement, le tableau propose les résultats liés à l'utilisation de l'outil supplémentaire «Outil +». Ces dernières valeurs suivent directement l'évolution des résultats de la trajectoire (T4). Ceci s'explique par le fait que ce dernier outil utilise cette même trajectoire et vérifie les différentes combinaisons de plages de rotation avec lesquelles il est possible de compléter le parcours en évitant complètement les interférences. Donc, le mécanisme 6 présente la meilleure efficacité au niveau de l'évitement des contacts lors de ce test soit une possibilité d'utiliser 91,3 % de toutes les combinaisons de plages de rotation possibles pour parcourir cette trajectoire sans encombre.

Suite à tous ces résultats, il est légitime de poser le choix de la géométrie *gagnante* sur l'architecture ayant été optimisée à l'aide des outils les plus complets soit le mécanisme 6. Par ailleurs, ce dernier propose une série de résultats qui sont supérieurs aux autres mécanismes pour ce qui est de la détection des interférences et un compromis adéquat entre les dimensions hors tout de l'architecture versus ses performances liées à l'EPP et l'EPCG. De plus, cette géométrie est une solution optimale pour ce

type de problème, en fixant la longueur hors tout du système à six mètres. En effet, à la suite de quelques séries d'analyses cascades (algorithme mixte), il n'était plus possible d'améliorer les résultats du mécanisme à l'aide de l'algorithme séquentiel et l'algorithme génétique n'a pas été en mesure d'augmenter les performances après environ 17 jours de calculs (312 générations) sur un processeur Intel® Pentium® 4 de 2,4 GHz. Par conséquent, il peut être tentant de dire que cette solution optimale en est une globale, mais il n'est pas possible d'en être certain donc il est plus juste de se limiter à dire que cette solution est du moins un optimum local. Enfin, devant ces évidences, le mécanisme sélectionné pour répondre aux exigences propres à la conception d'une interface de locomotion est celui de la solution 6.

Dorénavant, à l'intérieur des chapitres suivants, lorsqu'il sera question du mécanisme de l'interface de locomotion, il s'agira de la géométrie illustrée par le mécanisme solution 6. Ensuite, avant de poursuivre cette étude, il est requis d'effectuer quelques vérifications et d'établir les particularités de l'architecture choisie. Ainsi, la section suivante propose une description plus détaillée de la géométrie qui est sélectionnée pour concevoir la plate-forme de marche entraînée à l'aide de câbles.

3.3 Présentation du mécanisme sélectionné

La présente section décrit de manière exhaustive la géométrie du mécanisme final ainsi que les différents résultats qui lui sont attribués. Tout d'abord, une description complète de l'architecture permettra de bien visualiser les particularités liées à l'utilisation de ce concept lors du développement d'une interface de locomotion et ainsi la mécanique de cette solution sera expliquée. Ensuite, un retour sur les résultats engendrés par cette géométrie sera effectué. Celui-ci permettra entre autres d'analyser plus en détail les zones couvertes par l'EPP et l'EPCG ainsi que les lieux propices à l'apparition de contacts physiques entre les diverses entités du système.

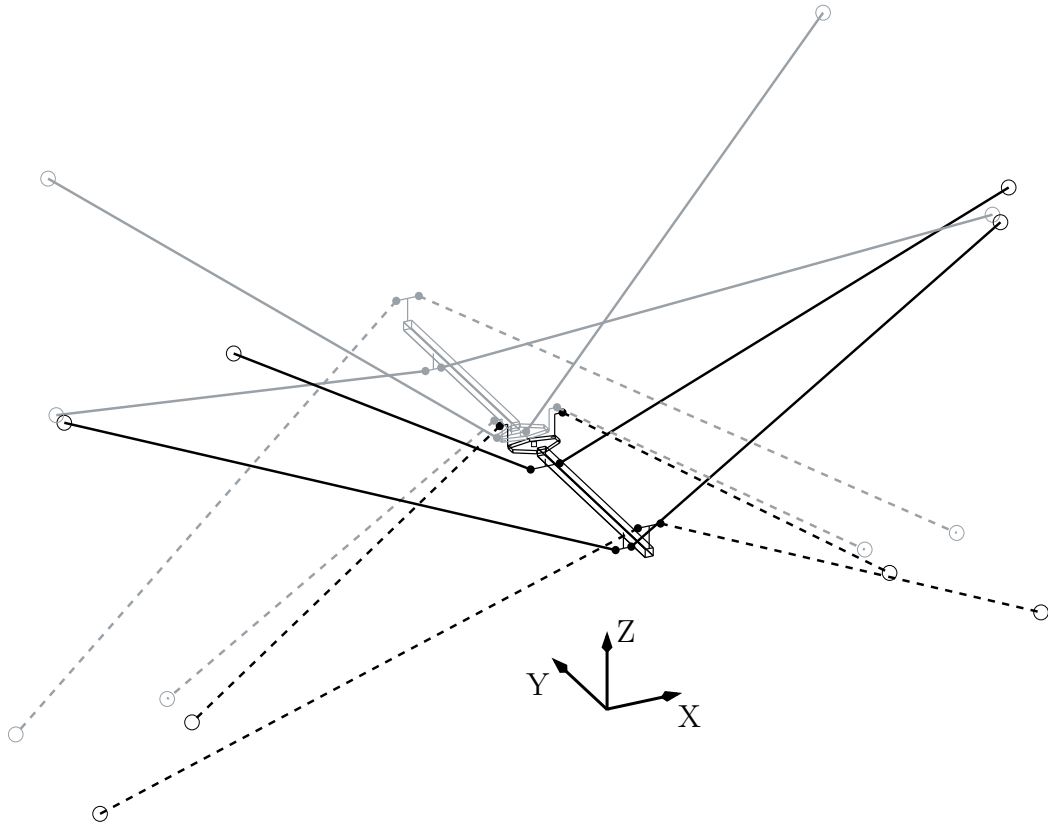


FIG. 3.16 – Vue tridimensionnelle des deux plates-formes de marche.

3.3.1 Description approfondie du mécanisme

En premier lieu, il est explicite, en se basant sur la figure 3.16, que le système complet, sur lequel le concept d'interface de locomotion est appuyé, comporte deux mécanismes solutions. Il y en a un qui est relié au pied droit de l'utilisateur (couleur foncé) et un autre pour le pied gauche (couleur pâle). Ces deux architectures parallèles sont entraînées à l'aide de huit câbles et leur effecteur est représenté par une plaque de support reliée à une tige de section carrée. L'espace au-dessus des supports de pied est très bien dégagé permettant une grande liberté de mouvements de la part de l'utilisateur. De plus, il est important de réaliser que la plate-forme de gauche est équivalente à une image miroir de celle de droite. Enfin, cette figure illustre la complexité d'une représentation tridimensionnelle d'un tel système par le fait d'un nombre élevé de câbles. Par conséquent, les images suivantes ne dévoileront qu'une vue à deux dimensions.

La figure 3.17 présente une vue suivant le plan YZ du système complet avec une illustration simple d'un usager. Cet utilisateur mesure approximativement 1,76 mètres

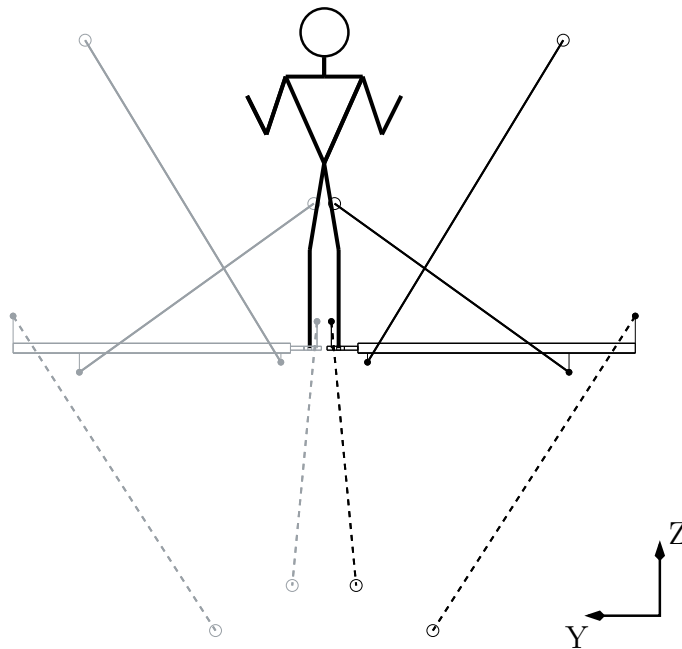


FIG. 3.17 – Schéma du système incluant un utilisateur à l'aide d'une vue YZ.

tandis que chacune des plates-formes comporte une longueur d'environ 1,60 mètres. Cette figure démontre que deux câbles (orientés vers le haut) semblent toucher l'individu. Cependant, la figure 3.16 confirme qu'ils sont très éloignés suivant l'axe X. Finalement, il est clair que les deux sous-ensembles de câbles (gauche et droit) ne risquent pas d'entrer en contact l'un envers l'autre lors d'une trajectoire de marche typique.

Ensuite, avant de regarder en profondeur les résultats obtenus pour la solution finale vis-à-vis l'ensemble des outils d'analyse, il est requis de définir une certaine identification de chacun des câbles. Cet exercice permettra de se rapporter précisément à chacun des câbles lors de l'analyse exhaustive des interférences. De plus, il sera utile à l'intérieur du chapitre suivant.

Par conséquent, la figure 3.18 illustre les deux plates-formes de marche selon une vue XY, démontrant la symétrie du système entre le mécanisme droit et gauche. Ce fait sera utilisé pour simplifier l'identification des câbles. Ainsi, il y a huit câbles par sous-ensemble et chacun des câbles sera numéroté de 1 à 8. Donc, cette figure montre la disposition de la numérotation des câbles qui est la même pour le mécanisme droit et gauche. Le fait que chacune des architectures est l'image miroir de l'autre est ainsi mis à profit.

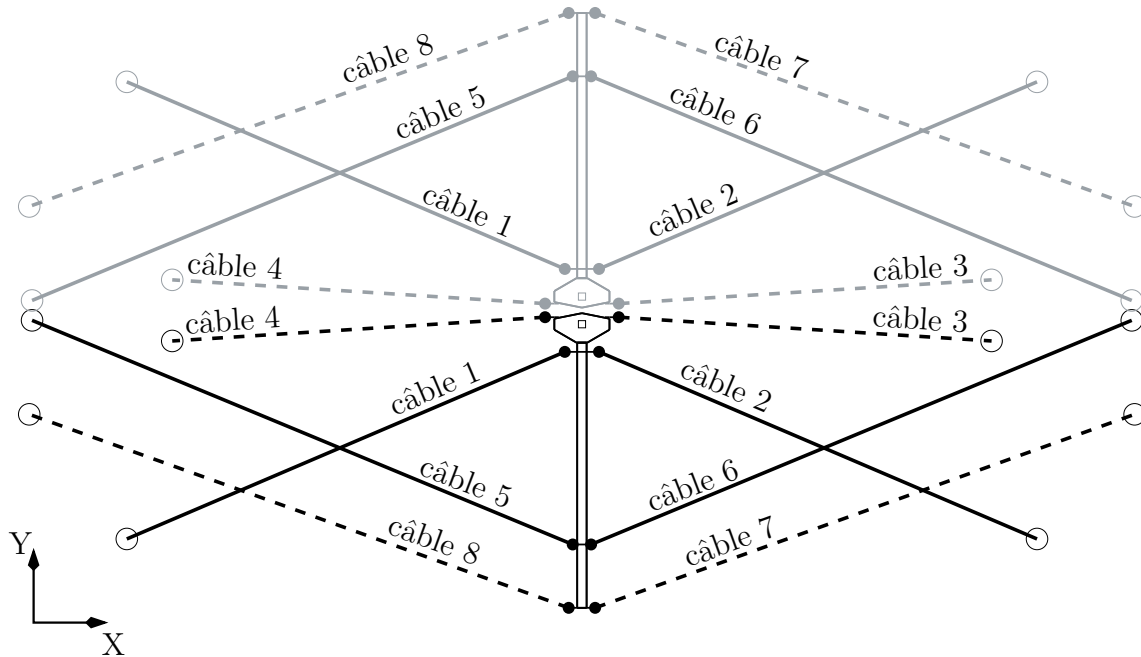


FIG. 3.18 – Identification des câbles : vue de dessus des deux plates-formes de marche.

Maintenant que le mécanisme solution a été incorporé à l'intérieur de l'interface de locomotion et que ces principales composantes ont été identifiées, il est permis d'explorer plus en détail la représentation physique des divers résultats du tableau 3.2 associés à cette solution.

3.3.2 Analyse exhaustive des résultats liés au mécanisme

Même si les avantages que la solution finale détient envers les autres géométries présentées au cours de ce chapitre sont connus, grâce entre autres à la comparaison montrée à l'aide du tableau 3.2, il est important de vérifier en profondeur les phénomènes physiques reliés à chacun de ses résultats. Donc, la présente section contient un retour complet sur ces derniers dans le but de saisir leur sens physique.

Tout d'abord, le pourcentage de couverture de l'EPP de ce mécanisme par rapport à l'espace de travail prescrit est évalué à 84,2 % pour une discrétisation de ce volume en 1 000 positions. Maintenant, l'accentuation de la précision de ce résultat en discrétisant ce même espace à l'aide de 8 000 points permet d'obtenir une valeur de 88,0 %. De plus, cet exercice peut être fait avec le résultat de l'EPCG ; celui-ci passe alors de

97,4 % (1 000 points) à 98,5 % (8 000 points). Il faut spécifier que ces données sont toujours approximatives, tout en étant plus précises que leurs précédentes. D'ailleurs, en utilisant une discrétisation infiniment fine, des valeurs exactes, qui seraient légèrement plus élevées que celles présentées, seraient obtenues. Enfin, dans l'objectif de connaître la zone physique de l'espace de travail qui est couverte et qui correspond à ces valeurs, les figures 3.19(a) et 3.20(a) sont produites. De plus, à l'intérieur des algorithmes d'optimisation, un artifice implanté a été de minimiser le complémentaire de l'EPP ou de l'EPCG au lieu de maximiser leurs valeurs directes (voir section 2.2.3). Par conséquent, les figures 3.19(b) et 3.20(b) sont ajoutées et elles illustrent les zones qui ne sont pas couvertes par les deux critères de performance. Il faut ajouter que ces résultats correspondent à ceux du mécanisme de droite. Par contre, de manière similaire à leur géométrie, l'utilisation de l'image miroir de ces résultats permet d'obtenir ceux liés au mécanisme de gauche.

Ainsi, en observant les figures 3.19(a) et 3.19(b), il est possible de visualiser les espaces qui ne sont pas accessibles par l'effecteur selon l'EPP défini au chapitre 2 en considérant des plages de rotation de $\phi = \pm 45^\circ$, $\theta = \pm 45^\circ$ et $\psi = \pm 20^\circ$. Il faut préciser que ce n'est pas parce que l'EPP ne couvre pas une partie de l'espace de travail que le mécanisme ne pourra pas s'y aventurer. En effet, tel que dicté à la section 2.2.1, ce résultat indique qu'à l'intérieur de cette zone, le mécanisme ne sera pas en mesure d'équilibrer tous les torseurs possibles en tendant une combinaison ou tous ses câbles. Il est facile de prouver cette affirmation en regardant cette fois-ci les figures 3.20(a) et 3.20(b). Celles-ci montrent que la plate-forme de marche pourra parcourir une plus grande zone. Cependant, plus la zone de travail est augmentée autour de l'EPP, plus le niveau de sécurité est réduit. C'est-à-dire qu'il n'est pas assuré que la plate-forme pourra équilibrer le torseur appliqué par l'utilisateur. Dans ce sens, les figures 3.20(a) et 3.20(b) permettent d'affirmer qu'il est au moins possible d'équilibrer le torseur lié au poids de l'utilisateur, peu importe l'orientation de l'effecteur à l'intérieur de 10,5 % (EPCG - EPP) du 12 % (100 % - EPP) non couvert par l'EPP. De plus, la zone restante ne représente guère une zone à l'intérieur de laquelle le mécanisme devrait avoir l'habitude d'évoluer. En effet, le système de contrôle devrait imposer un rappel sur la position de l'utilisateur pour qu'elle se situe constamment aux alentours de la position centrale de l'espace de travail soit loin des positions non couvertes (voir la figure 2.14 pour observer la disposition des deux espaces de travail l'un par rapport à l'autre). Finalement, à titre informatif, il est évident que l'EPP et l'EPCG couvrent certaines zones supplémentaires au-delà de l'espace de travail prescrit, mais dans le cadre de ce

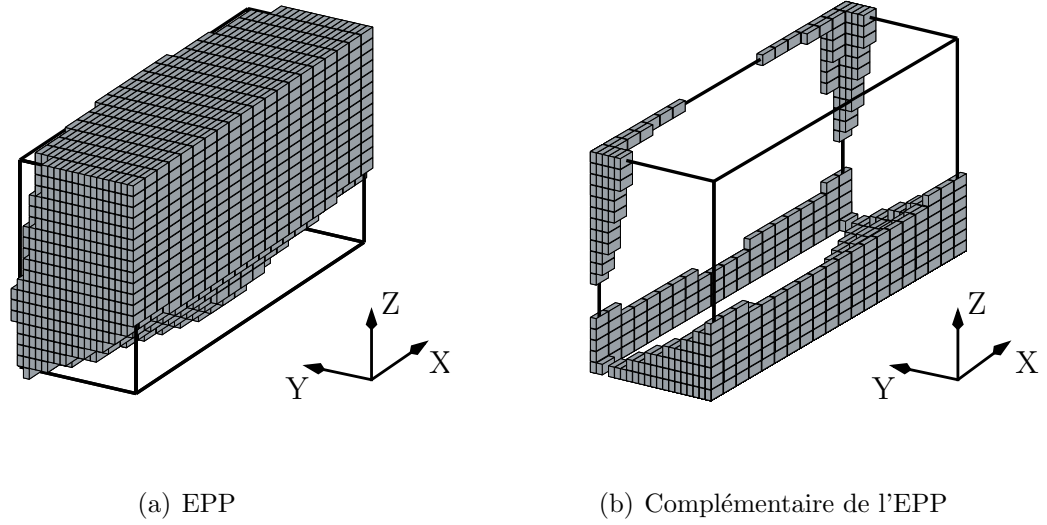


FIG. 3.19 – Illustration des résultats du mécanisme solution envers l'EPP.

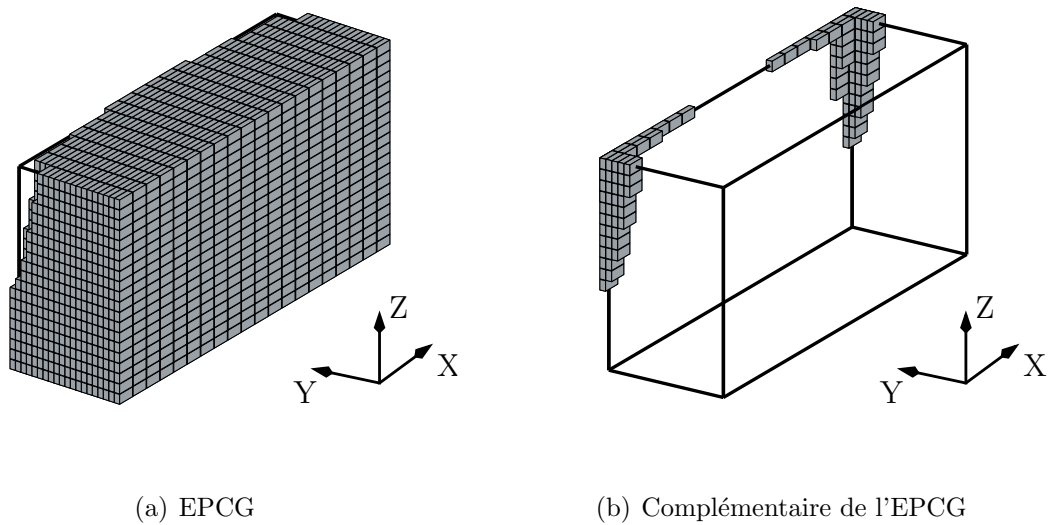


FIG. 3.20 – Illustration des résultats du mécanisme solution envers l'EPCG.

travail, seulement cet espace de travail défini est considéré en vertu des applications reliées au concept de simulateur de marche.

Par ailleurs, ces zones, paraissant à première vue non accessibles, font quand même partie de l'espace de travail potentiel du mécanisme. Il est vrai d'affirmer que le système pourrait avoir la possibilité d'y équilibrer au moins le torseur lié au poids de l'utilisateur à condition que les amplitudes des plages de rotation soient diminuées. Par conséquent, les figures 3.21 et 3.22 montrent l'évolution des résultats de l'EPP et de l'EPCG en fonction de la variation de la plage de rotation pour l'angle ϕ et pour l'angle ψ . Pour ce qui est de l'angle θ , celui-ci correspond à la rotation la plus sollicitée lors de la démarche humaine typique et donc sa plage de rotation n'est pas diminuée pour conserver la possibilité de marcher en tout temps.

Tout d'abord, les résultats démontrés par le biais de ces graphiques sont obtenus en effectuant une discrétisation en 1 000 points de l'espace de travail prescrit. Alors, chacune des différentes courbes représente une plage de rotation spécifique pour l'angle ψ et ces courbes évoluent en fonction de l'amplitude de la plage de rotation de l'angle ϕ . Donc, il est démontré à l'aide de ces graphiques que les résultats demeurent sensiblement les mêmes, peu importe la plage de ψ (jusqu'à $\pm 20^\circ$), tant et aussi longtemps qu'est imposée une plage de rotation de ϕ sous la barre de $\pm 45^\circ$. Au-dessus de cette valeur, les résultats descendent en flèche jusqu'à une couverture inexistante pour l'EPP ainsi que pour l'EPCG. Ce fait met en évidence les plages de rotation utilisées pour optimiser cette géométrie soit celles du tableau 1.1. De plus, il est intéressant de noter que la valeur maximale de l'EPP est de 96,6 % et qu'elle est engendrée pour des valeurs de plages de rotation de $\phi = \pm 30^\circ$, $\theta = \pm 45^\circ$ et $\psi = 0^\circ$, de $\phi = \pm 25^\circ$, $\theta = \pm 45^\circ$ et $\psi = 0^\circ$ et de $\phi = 0^\circ$, $\theta = \pm 45^\circ$ et $\psi = 0^\circ$. En ce qui a trait à l'EPCG, le résultat optimal est de 100 % et il est obtenu, peu importe la plage de l'angle ψ , pour des valeurs de la plage de ϕ allant jusqu'à approximativement $\pm 40^\circ$. Par conséquent, il serait vrai de dire que pour des orientations de l'effecteur demeurant limitées aux valeurs $\phi = \pm 40^\circ$, $\theta = \pm 45^\circ$ et $\psi = \pm 20^\circ$, il est possible d'équilibrer le torseur lié au poids de l'utilisateur à l'intérieur de la totalité de l'espace de travail prescrit. En supplément, il a été vérifié que si le mécanisme conserve constamment une orientation de référence ($\phi = 0^\circ$, $\theta = 0^\circ$ et $\psi = 0^\circ$), l'EPP est en mesure de couvrir environ 99 % de l'espace désiré tandis que l'EPCG présente évidemment une couverture complète soit de 100 %. Finalement, il faut comprendre que même si ces résultats proposent que le mécanisme peut prendre des poses comportant des orientations plus élevées que celles prescrites

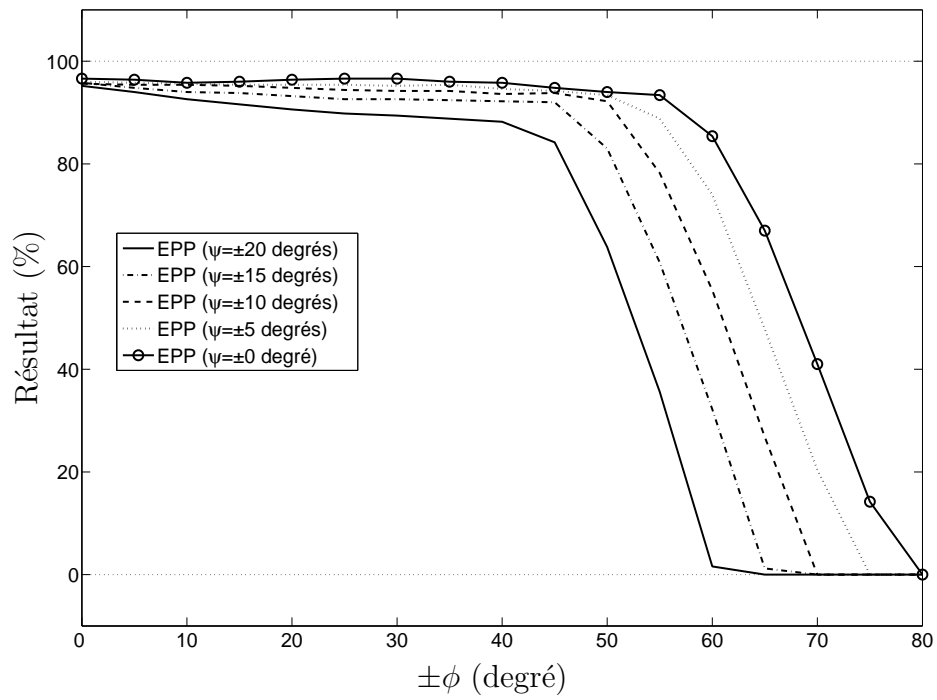


FIG. 3.21 – Évolution des résultats de l'EPP en fonction de la plage de rotation choisie pour l'angle ϕ versus différentes plages à l'angle ψ ($\theta = \pm 45^\circ$).

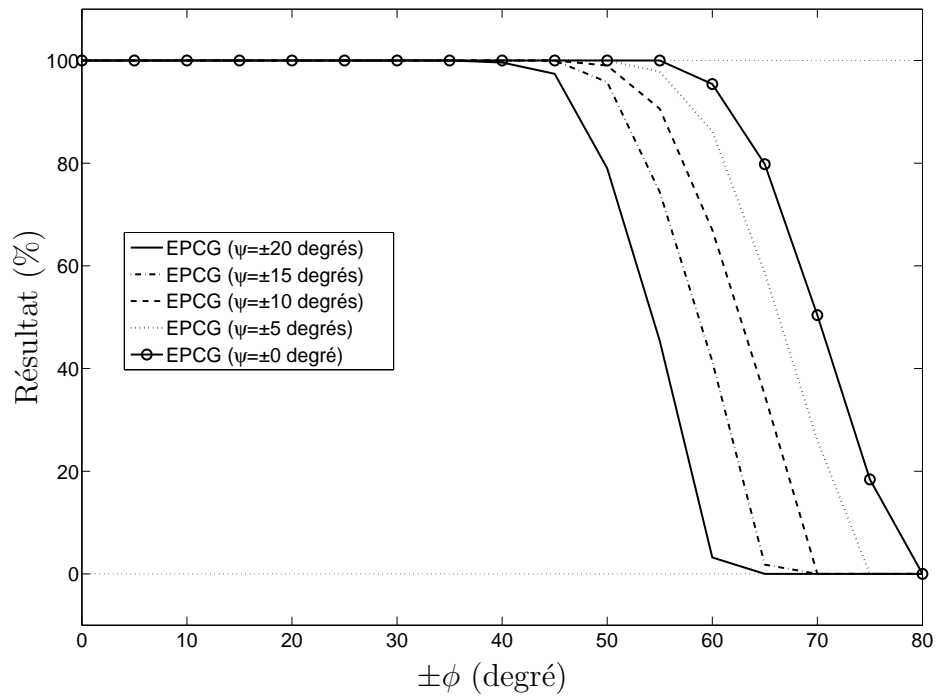


FIG. 3.22 – Évolution des résultats de l'EPCG en fonction de la plage de rotation choisie pour l'angle ϕ versus différentes plages à l'angle ψ ($\theta = \pm 45^\circ$).

TAB. 3.3 – Contacts décelés pour la plate-forme gauche lors de la trajectoire T1.

	x (m)	y (m)	z (m)	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)	entité 1	entité 2	temps
1	-0,242	0,032	0,189	16,59	67,70	-0,90	4	20	22
2	-0,229	0,032	0,195	16,05	68,09	-0,06	4	20	23
3	-0,215	0,031	0,199	15,32	67,63	0,52	4	20	24
4	-0,239	-0,003	0,194	17,86	67,09	2,36	4	20	126

initialement, cela ne permet pas nécessairement d'en conclure que le mécanisme peut s'y rendre, car il n'y a aucune vérification d'incluse par rapport à la détection des éventuelles interférences.

D'ailleurs, maintenant que les résultats du mécanisme par rapport à l'EPP et à l'EPCG sont analysés, il serait logique de s'intéresser aux résultats liés à la détection des interférences du tableau 3.2. Il y était montré que le mécanisme final ne présente aucun contact lors de la trajectoire ellipsoïdale (T3) et de la trajectoire de la marche avec orientation inversée (T2). Cependant, quatre contacts mécaniques sont décelés lors de la trajectoire normale de la marche. Outre la quantité, il est nécessaire de vérifier les entités qui sont en jeu lors des interférences détectées dans le but de bien comprendre le phénomène physique. De plus, il est intéressant de connaître la position et l'orientation exactes de la plate-forme à l'intérieur de l'espace de travail ainsi que le moment auquel ces contacts ont lieu au cours de la trajectoire. Par conséquent, le tableau 3.3 contient l'ensemble de ces informations et il est important de préciser que les positions sont exprimées par rapport au centre de l'espace de travail respectif à chacune des plates-formes. Il faut ajouter que les quatre contacts détectés appartiennent tous à la plate-forme gauche. Ainsi, pour cette trajectoire, la plate-forme droite est libre de toutes interférences et ce, même si le mécanisme est parfaitement symétrique. Ce résultat est aisément explicable par le fait que, lors d'une trajectoire de marche réelle, les deux pieds d'une personne ne parcourent pas nécessairement une trajectoire (position et orientation) identique. Dans le cas présent, les contacts sont strictement observés au sein de la plate-forme gauche, car le pied gauche atteint des orientations légèrement plus prononcées que celles du pied droit. Ainsi, à l'aide du tableau 3.3, il est spécifié que les contacts se produisent entre le câble 4 et l'entité 20. Grâce à l'identification complétée à la figure 3.18, le câble en question est précisément connu. D'ailleurs, il faut ajouter que les quatre arêtes principales de la tige de l'effecteur ainsi que les douze arêtes de la plaque support ont été numérotées de la même manière que les câbles. En somme,

les câbles sont numérotés de 1 à 8, les arêtes de la tige de 9 à 12 et celles de la plaque support de 13 à 24. Alors, il est déterminé que les quatre contacts montrés dans ce tableau ont lieu entre le câble 4 fixé sur la plate-forme près de la plaque support et une arête de cette dernière. De plus, en vérifiant le moment auquel a eu lieu ces contacts, il est remarqué que les trois premiers forment un croisement et que le dernier constitue le début d'un second croisement. Il est possible de le vérifier en observant le graphique de l'évolution de la distance n_r entre les deux entités (voir la section 2.2.2.1) au cours de cette trajectoire. Ce graphique est disponible à l'annexe C, ainsi que tous les autres qui seront rattachés aux interférences de la trajectoire *exigeante*. Donc, il y sera constaté que ces deux interférences sont de type *léger*. Ensuite, il peut être noté que ces contacts apparaissent lorsque la position de l'angle θ atteint des valeurs au dessus de 67° . Par conséquent, il est permis d'affirmer que ces deux interférences (quatre contacts) ne devraient pas causer de problème, car la plaque support pourrait être conçue de manière à les éviter et aussi la plate-forme est limitée à des débattements angulaires selon ce même angle de $\pm 45^\circ$. Il faut cependant ajouter qu'un artifice sera utilisé, tel que précisé au chapitre 2, pour permettre à l'utilisateur d'atteindre des amplitudes plus élevées lors des exercices de simulation et ceci sera abordé plus en détail au chapitre 5.

Par la suite, il était montré au tableau 3.2 que l'architecture finale présente 57 contacts lors de la trajectoire *exigeante* (T4). Après vérification des données, il a été déterminé que 30 contacts ont lieu dans le sous-ensemble de la plate-forme droite et 27 dans celui de la plate-forme gauche. Donc, pour le cas de la plate-forme droite, les informations obtenues sont montrées à l'aide du tableau 3.4. Ces données indiquent qu'il y a quatre paires d'entités causant les 30 contacts soient le câble 2 avec le câble 6, le câble 6 avec le câble 7, le câble 4 avec le corps 20 (une arête de la plaque support) et le câble 1 avec l'entité 10 (une arête de la tige de l'effecteur). Ensuite, il faut regarder le moment auquel chacune des quatre combinaisons d'entités entre en contact. Ceci permet de connaître le nombre exact d'interférences apparaissant lors de cette trajectoire pour le sous-ensemble de la plate-forme droite. Il est conseillé aussi de vérifier ces conclusions à l'aide des graphiques correspondants compris à l'annexe C. Donc, sept croisements sont ainsi déterminés en relation à la paire 2-6, une interférence pour la paire 6-7, une pour la paire 4-10 et aussi un seul croisement pour la paire 4-20. Ces croisements sont décrits à l'annexe C et il est noté que plusieurs croisements sont de type *léger* tandis que certains atteignent des distances d'interférence allant jusqu'à 5,6 centimètres. De plus, il peut être ajouté que les contacts compris dans le tableau 3.4 se produisent toujours lorsque la plate-forme atteint une position ou une orientation comportant des

TAB. 3.4 – Contacts décelés pour la plate-forme droite lors de la trajectoire T4.

	x (m)	y (m)	z (m)	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)	entité 1	entité 2	temps
1	0,920	-0,298	0,360	-44,97	3,39	-19,99	2	6	93
2	0,947	-0,204	0,304	-43,44	-22,66	-19,31	2	6	99
3	0,951	-0,176	0,294	-42,80	-26,45	-19,02	2	6	100
4	0,391	0,234	-0,360	-44,97	3,39	-19,99	2	6	218
5	0,333	0,299	-0,314	-43,98	-18,65	-19,55	2	6	223
6	0,321	0,300	-0,304	-43,44	-22,66	-19,31	2	6	224
7	-0,838	0,300	0,458	-33,19	44,83	-14,75	4	20	329
8	-0,844	0,298	0,452	-34,67	44,20	-15,41	4	20	330
9	-0,851	0,291	0,447	-36,07	43,13	-16,03	4	20	331
10	-0,403	-0,215	-0,369	-44,83	7,88	-19,92	2	6	467
11	-0,391	-0,188	-0,360	-44,97	3,39	-19,99	2	6	468
12	-0,321	0,011	-0,304	-43,44	-22,66	-19,31	2	6	474
13	0,750	-0,251	-0,331	-39,16	-38,59	-17,40	6	7	854
14	0,760	-0,272	0,325	-37,99	-40,72	-16,89	6	7	855
15	0,780	-0,297	0,313	-35,38	-43,72	-15,73	6	7	857
16	0,790	-0,300	0,307	-33,94	-44,57	-15,09	6	7	858
17	0,496	0,252	-0,434	-44,83	7,88	-19,92	2	6	967
18	0,324	-0,214	-0,473	-39,16	-38,59	-17,40	2	6	979
19	-1,000	-0,056	0,004	-41,19	-33,19	-18,30	1	10	1102
20	-1,000	-0,084	0,006	-40,22	-36,07	-17,88	1	10	1103
21	-0,999	-0,110	0,008	-39,16	-38,59	-17,40	1	10	1104
22	-0,999	-0,136	0,011	-37,99	-40,72	-16,89	1	10	1105
23	-0,998	-0,161	0,013	-36,74	-42,43	-16,33	1	10	1106
24	0,865	-0,014	0,000	-44,83	7,88	-19,92	2	6	1467
25	0,818	-0,300	0,000	-40,22	-36,07	-17,88	2	6	1478
26	0,231	0,299	-0,319	-45,00	-1,13	-20,00	2	6	1844
27	0,228	0,299	-0,325	-44,91	-5,64	-19,96	2	6	1845
28	0,212	0,212	-0,354	-42,80	-26,45	-19,02	2	6	1850
29	0,000	-0,110	-0,241	-44,97	3,39	-19,99	2	6	1968
30	0,000	-0,212	-0,191	-42,80	-26,45	-19,02	2	6	1975

TAB. 3.5 – Contacts décelés pour la plate-forme gauche lors de la trajectoire T4.

	x (m)	y (m)	z (m)	ϕ (°)	θ (°)	ψ (°)	entité 1	entité 2	temps
1	0,939	-0,166	-0,324	44,40	14,44	19,73	2	6	153
2	0,858	0,280	-0,441	37,38	-41,63	16,61	2	6	168
3	0,309	0,296	-0,294	-42,80	-26,45	-19,02	1	4	225
4	-0,894	-0,265	-0,401	43,13	-24,59	19,17	1	10	412
5	-0,844	-0,038	-0,452	34,67	-44,20	15,41	1	10	420
6	-0,838	-0,002	-0,458	33,19	-44,83	14,75	1	10	421
7	-0,958	-0,070	0,000	42,44	-28,25	18,86	1	10	663
8	-0,978	-0,256	0,000	29,97	-44,71	13,32	1	10	673
9	0,997	-0,220	-0,039	44,91	5,64	19,96	2	6	905
10	0,996	-0,188	-0,047	45,00	1,13	20,00	2	6	906
11	0,965	0,247	-0,132	38,59	-39,70	17,15	2	6	917
12	0,956	0,286	-0,147	36,07	-43,13	16,03	6	7	919
13	-0,482	-0,198	-0,438	44,97	-3,39	19,99	2	6	1032
14	-0,496	-0,163	-0,434	44,83	-7,88	19,92	2	6	1033
15	-0,549	0,007	-0,418	43,13	-24,59	19,17	2	6	1037
16	0,319	0,293	0,190	45,00	1,13	20,00	2	6	1281
17	0,329	0,298	0,189	44,97	-3,39	19,99	2	6	1282
18	0,378	0,282	0,185	43,13	-24,59	19,17	2	6	1287
19	0,876	0,295	0,096	-41,19	-33,19	-18,31	1	4	1352
20	0,881	0,288	0,095	-40,22	-36,07	-17,88	1	4	1353
21	1,000	0,124	0,000	44,40	14,44	19,73	2	6	1403
22	0,992	0,231	0,000	39,70	-37,38	17,65	2	6	1416
23	0,509	-0,056	0,000	44,97	-3,39	19,99	2	6	1532
24	0,468	0,184	0,000	42,44	-28,25	18,86	2	6	1538
25	0,461	0,215	0,000	41,63	-31,62	18,50	2	6	1539
26	0,000	-0,298	-0,498	45,00	1,13	20,00	2	6	1906
27	0,000	0,295	-0,484	39,70	-37,38	17,65	2	6	1916

valeurs approchant les extrêmes.

Pour ce qui est des 27 contacts décelés lors de la trajectoire *exigeante* en ce qui a trait à la plate-forme gauche, toutes les informations requises à leur analyse sont présentées au tableau 3.5. En premier lieu, il y est observé qu'il y a, comme pour la plate-forme droite, quatre paires d'entités à analyser. Ces combinaisons sont formées par le câble 2 avec le câble 6, le câble 1 avec le câble 4, le câble 6 avec le câble 7 et le câble 1 avec l'entité 10 soit une arête de la tige. En vérifiant les temps associés à chacun des contacts et les graphiques de l'annexe C, il en est conclu qu'il y a sept croisements produits par la paire 2-6, deux par la paire 1-4, deux par la paire 1-10 et seulement un par la paire 6-7. Ensuite, il est constaté que les interférences sont de type *léger* ou que les croisements se limitent à une distance maximale d'environ 8,5 centimètres. Tout comme ceux de la plate-forme droite, ces contacts ont lieu lorsque la position, l'orientation ou les deux ensemble présentent des valeurs s'approchant des valeurs limites de l'espace de travail prédéterminé à six ddl.

Ainsi, l'ensemble des contacts contenus à l'intérieur du tableau 3.2 en lien au mécanisme final (mécanisme 6) a été analysé. Le dernier résultat restant à être décortiqué est celui engendré à l'aide de l'outil supplémentaire. Donc, ce résultat indique que 91,3 % de la totalité des combinaisons de plages de rotation peuvent être utilisés pour compléter la trajectoire *exigeante* sans créer la moindre interférence au sein du mécanisme. Ce résultat est illustré à l'aide de la figure 3.23 et il est présenté sous la même apparence que celui de la figure 3.1 de la section 3.1. Il y est facilement observé que seules les combinaisons comportant un mélange de deux ou trois plages de rotation, dont les amplitudes sont près des valeurs extrêmes, produisent au moins un contact lors de la trajectoire. En effet, ce graphique permet de conclure que la trajectoire imposée peut être complétée sans interférence avec la majorité des combinaisons de plages de rotation. Enfin, il est possible d'affirmer que le mécanisme final sera libre d'interférences la plupart du temps et ce, en parcourant la presque totalité de son espace de travail prédéterminé à six ddl.

En complément à l'analyse détaillée du mécanisme final, il est légitime de vouloir vérifier les zones pouvant démontrer la présence de singularité, c'est-à-dire la présence d'une dégénérescence de la relation entre les vitesses articulaires et les vitesses cartésiennes à l'effecteur. Cette situation risque de se produire lorsque la plate-forme se trouve dans une pose à laquelle il est impossible de la contraindre complètement à

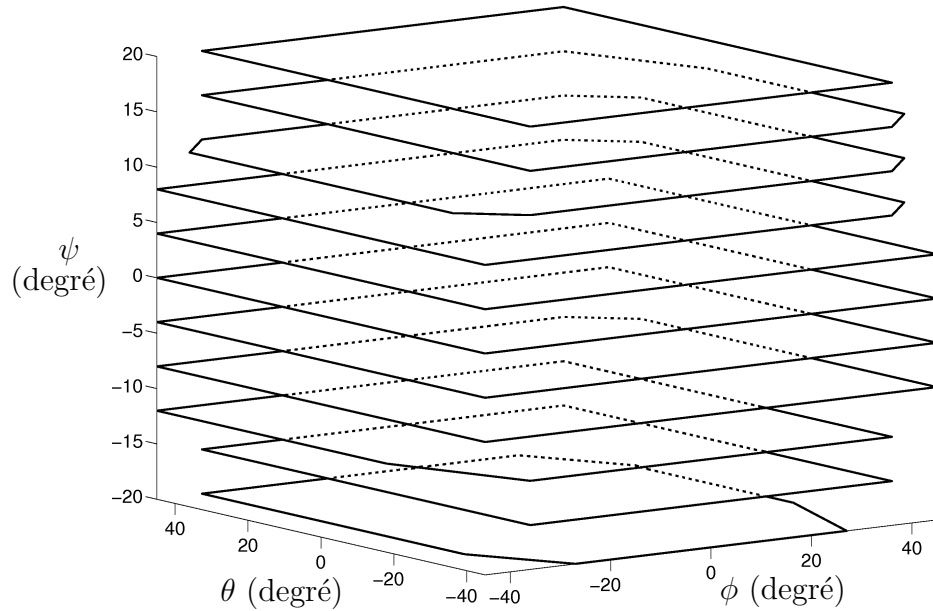


FIG. 3.23 – Combinaisons de plages de rotation permettant d'éviter tous les contacts lors de la trajectoire *exigeante*.

l'aide de ses câbles. Cette situation engendre nécessairement des directions de vitesse impossible à produire à l'effecteur à l'aide de ses câbles. Par contre, les singularités possibles lorsque le nombre de câbles est au minimum (n câbles pour n ddl) sont évitées grâce à la redondance d'actionnement ($n + 1$ câbles ou plus pour n ddl). En effet, il est intéressant de savoir qu'un mécanisme parallèle entraîné à l'aide d'un nombre plus élevé de câbles que son nombre de ddl a la possibilité d'éliminer les lieux de singularité à l'intérieur de son espace de travail [43]. De plus, l'EPP est libre de toutes singularités [24]. C'est-à-dire qu'en respectant les limites des déplacements angulaires prescrits, il est possible de contraindre complètement l'effecteur du mécanisme à l'intérieur de cette zone. Par conséquent, la figure 3.19(a) montre un espace de travail qui est sans singularité si les exigences initiales du projet relatives aux débattements angulaires sont respectées. Cependant, des singularités de frontière peuvent être observées, c'est-à-dire qu'à l'approche de la frontière de l'EPP du mécanisme, il peut arriver que l'équilibrage d'un torseur précis puisse engendrer une importante hausse dans la tension requise d'un ou de plusieurs câbles. Ce mécanisme approche alors une zone de singularité pour cette pose précise. Ce phénomène dépend grandement de l'orientation du mécanisme et du torseur demandé. De plus, il est logique d'affirmer qu'une singularité de frontière apparaîtra lorsque le mécanisme approchera l'enveloppe convexe formée à partir de la position des actionneurs du système. Par contre, pour les applications du sys-

tème, le mécanisme demeurera à l'intérieur de l'espace de travail prédéterminé et par conséquent, il sera loin de ce dernier type de singularité.

3.4 Conclusion

Le but de ce chapitre était de démontrer le parcours chronologique qui a mené à l'obtention du mécanisme parallèle entraîné par câbles qui est proposé pour servir de solution finale. Cette architecture est vouée à servir de base mécanique à la conception d'une interface de locomotion. Celle-ci comportera bien entendu deux mécanismes similaires dont l'un est l'image miroir de l'autre selon l'axe X du système de repère global \mathcal{O} .

Plus spécifiquement, cette partie du mémoire a premièrement défini la création d'un nouvel outil d'évaluation de la capacité des mécanismes à éviter les interférences de tous types (câble/câble et câble/structure) lors d'une trajectoire cartésienne *exigeante*. Ce parcours est complété en imposant différentes combinaisons de plages de rotation au niveau de l'effecteur pour utiliser la majorité du volume de l'espace de travail à six dimensions de ce type de système (3 axes en translation et 3 axes en rotation). Il a été montré aussi que ce test comporte une représentation de ces résultats sous deux niveaux soient de manière graphique et de manière quantitative. La première laisse entrevoir les combinaisons des plages de rotation à l'aide d'un espace tridimensionnel pour lesquelles il est possible d'effectuer la trajectoire sans apparition de contacts physiques. La seconde donne une approximation du pourcentage de la couverture du volume des combinaisons ainsi obtenu par rapport à l'ensemble des combinaisons de plages de rotation possibles.

Ensuite, divers mécanismes ont été brièvement présentés et leurs résultats vis-à-vis les différents tests ont été comparés. La présentation de ces architectures s'est vue respecter l'ordre chronologique de leur obtention au cours de cette étude. Il va de soi que le dernier mécanisme propose des performances théoriques qui dépassent généralement ses prédécesseurs et ceci est aisément explicable par le fait que la méthode d'optimisation s'est améliorée et renforcée au fur et à mesure que les problèmes liés au projet se manifestaient. Elle est passée graduellement d'une analyse seule de l'EPP vers une méthode complète vérifiant deux critères de performance (EPP et EPCG) et la détection d'interférences lors de quatre trajectoires différentes.

À la suite de la présentation des différentes avenues de solution qui ont été abordées lors de cette maîtrise, la solution finale a été décrite exhaustivement dans le but de saisir les particularités que ce type de mécanisme arbore. De plus, quelques résultats complémentaires à ceux des différents tests d'optimisation ont été illustrés et ceux-ci ont permis de saisir l'évolution de l'espace atteignable de la solution choisie. En somme, cette solution propose une couverture évaluée à 88,0 % pour l'EPP et à 98,5 % pour l'EPCG. De plus, elle comporte deux interférences lors de la trajectoire relative à une démarche humaine typique qui sont formées de quatre contacts ayant tous lieu lorsque les débattements angulaires de la plate-forme dépassent les prescriptions initiales. Enfin, ce mécanisme présente 57 contacts lors de la trajectoire *exigeante* et ceux-ci apparaissent lorsqu'il y a une combinaison d'événements telle que l'atteinte de valeurs extrêmes pour au moins deux des six ddl du système. Il faut ajouter que ce mécanisme ne présente aucune interférence entre les éléments des deux sous-ensembles soit celui de la plate-forme droite et celui de gauche. Finalement, cette solution ne comporte aucune interférence pour les trajectoire T2 ainsi que T3 et elle permet de couvrir environ 91,3 % de toutes les combinaisons de plages de rotation possibles pour compléter la trajectoire *exigeante* en évitant les contacts.

À la lumière de ce chapitre, il est clair que le choix du mécanisme solution, en se fiant aux critères de sélection présentés ci-haut, doit être orienté vers la dernière architecture proposée. Cependant, la faisabilité de cette sélection doit être confirmée par la détermination des tensions dans les câbles (forces articulaires) qui seront nécessaires pour équilibrer et reproduire le mouvement de la marche humaine. Dans cet ordre d'idées, le chapitre suivant propose l'élaboration des équations qui mèneront vers la résolution du problème dynamique inverse de ce mécanisme parallèle entraîné à l'aide de câbles.

Chapitre 4

Vérification des forces articulaires lors d'une simulation numérique

Ce chapitre contient les équations cinématiques et dynamiques caractérisant les mécanismes parallèles entraînés à l'aide de câbles. De plus, une méthode permettant de déterminer la distribution des tensions dans les câbles lors de la simulation de trajectoires connues est présentée. Cette dernière sera entre autres nécessaire pour évaluer les tensions lors d'une trajectoire typique de la démarche humaine tirée de données expérimentales.

Dans l'objectif d'évaluer les efforts articulaires requis pour être en mesure de reproduire des trajectoires de marche à l'aide du mécanisme parallèle à câbles choisi au chapitre précédent, il est tout d'abord nécessaire d'élaborer les expressions décrivant la cinématique et la dynamique de ce type de système. La section suivante présente le premier volet de ces équations.

4.1 Équations cinématiques d'un mécanisme parallèle à câbles

La cinématique se définit par la partie de la mécanique qui étudie les mouvements des corps, en faisant abstraction des forces qui les produisent. Ainsi, cette première section du chapitre va permettre de définir les équations de vitesse et d'accélération reliées aux mécanismes parallèles entraînés par câbles. Pour ce faire, il est nécessaire de revoir l'équation (2.8) :

$$\rho_i = \|\mathbf{u}_i\| = \sqrt{(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)^T(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)} \quad (4.1)$$

Cette équation démontre la relation du problème géométrique inverse (PGI) du manipulateur solution de cette étude. Par conséquent, elle représente la norme des vecteurs longeant les divers câbles lorsque la pose exacte de l'effecteur du mécanisme est connue.

Donc, pour approfondir le développement des équations décrivant le comportement du système, il est logique de poursuivre en élaborant les équations de vitesse et d'accélération. De cette manière, le comportement cinématique du mécanisme sera bien cerné. Il est important de préciser que ces relations dépendent strictement de la géométrie de l'architecture.

Tout d'abord, les équations de vitesse se résument en la dérivée par rapport au temps des équations de position obtenues à la suite de la résolution du PGI. Ainsi, les expressions suivantes résument les principales étapes de la détermination de ces relations de vitesse. Par ailleurs, il faut noter que la dérivée par rapport au temps d'un radical est souvent plus ardue qu'un élément similaire élevé à une puissance. Par conséquent, au lieu d'utiliser l'équation (4.1) comme point de départ, c'est plutôt l'équation

de contrainte correspondante qui est sélectionnée soit celle résultant de l'élevation au carré de l'expression (4.1) :

$$\rho_i^2 = (\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)^T (\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i) \quad (4.2)$$

Ensuite, de cette dernière, la dérivation par rapport au temps est appliquée de chaque côté de l'équation :

$$2\rho_i\dot{\rho}_i = 2(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)^T (-\dot{\mathbf{p}} - \dot{\mathbf{Q}}\mathbf{b}'_i) \quad (4.3)$$

Il est évidemment possible d'éliminer le facteur identique de multiplication devant chacun des termes (droit et gauche) de l'expression précédente. De plus, vu qu'il n'est généralement pas pratique de conserver une relation contenant la dérivée d'une matrice de rotation, l'astuce entreprise est d'utiliser les équivalences suivantes :

$$\dot{\mathbf{Q}}\mathbf{b}'_i = \dot{\mathbf{Q}}\mathbf{Q}^T\mathbf{Q}\mathbf{b}'_i \quad \text{car} \quad \mathbf{Q}^T\mathbf{Q} = \mathbf{1} \quad (4.4)$$

où la matrice $\mathbf{1}$ est la matrice identité. Il faut aussi savoir que

$$\dot{\mathbf{Q}}\mathbf{Q}^T = \boldsymbol{\Omega} \quad (4.5)$$

où $\boldsymbol{\Omega}$ est communément connu sous le nom du tenseur de vitesse angulaire. Ce dernier est d'ailleurs défini par ce qui suit :

$$\boldsymbol{\Omega} = \mathbf{1} \times \boldsymbol{\omega} \quad (4.6)$$

où $\boldsymbol{\omega}$ est le vecteur des vitesses angulaires de l'effecteur dans le repère fixe \mathcal{O} .

Ainsi, les relations équivalentes suivantes sont obtenues :

$$\dot{\mathbf{Q}}\mathbf{b}'_i = \boldsymbol{\Omega}\mathbf{Q}\mathbf{b}'_i = \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i \quad (4.7)$$

Enfin, la relation de vitesse peut s'écrire tel que ci-dessous :

$$\rho_i\dot{\rho}_i = -(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)^T (\dot{\mathbf{p}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i) \quad (4.8)$$

Finalement, il est généralement plus pratique d'isoler les composantes de vitesse de l'équation précédente. Alors, l'équation vectorielle de vitesse des mécanismes parallèles à câbles est ainsi obtenue :

$$\rho_i\dot{\rho}_i = -(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)^T \dot{\mathbf{p}} - [(\mathbf{Q}\mathbf{b}'_i) \times (\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i)]^T \boldsymbol{\omega} \quad (4.9)$$

Il est possible d'exprimer cette relation sous une forme plus concise soit celle matricielle :

$$\mathbf{J}\mathbf{t} = \mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\rho}} \quad (4.10)$$

où \mathbf{J} et \mathbf{K} sont les matrices jacobiniennes du manipulateur. La matrice \mathbf{J} est une matrice de dimensions $n \times 6$ dont la $i^{\text{ième}}$ ligne est exprimée par ce qui suit :

$$\mathbf{j}_i = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_i^T & \mathbf{d}_i^T \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (4.11)$$

où

$$\mathbf{c}_i = -(\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i) \quad (4.12)$$

$$\mathbf{d}_i = -\mathbf{Q}\mathbf{b}'_i \times (\mathbf{a}_i - \mathbf{p} - \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i) \quad (4.13)$$

tandis que la matrice \mathbf{K} est donnée par

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \rho_n \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (4.14)$$

et \mathbf{t} et $\dot{\boldsymbol{\rho}}$ sont respectivement le vecteur de vitesse cartésienne (visseur) et celui des vitesses articulaires. Ces derniers peuvent être exprimés comme suit :

$$\mathbf{t} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{p}}^T & \boldsymbol{\omega}^T \end{bmatrix}^T, \quad \dot{\boldsymbol{\rho}} = \begin{bmatrix} \dot{\rho}_1 & \dots & \dot{\rho}_n \end{bmatrix}^T \quad (4.15)$$

où la variable n représente le nombre de câbles dans le manipulateur parallèle ($n = 8$ dans le cas de cette étude).

En somme, l'équation (4.10) représente la relation entre les vitesses cartésiennes et articulaires. De cette manière, il est permis de déterminer facilement la vitesse articulaire des câbles lorsque la longueur des câbles à cet instant précis, la pose de l'effecteur ainsi que ses vitesses cartésiennes et angulaires sont connues. En effet, l'expression suivante le démontre bien :

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{J}\mathbf{t} \quad (4.16)$$

Maintenant que les équations de vitesse des mécanismes parallèles à câbles sont adéquatement définies, il est possible de déterminer celles correspondant aux accélérations. Donc, pour obtenir ces expressions, il suffit de dériver par rapport au temps les équations de vitesse. En premier lieu, la dérivation est appliquée aux équations matricielles de vitesse (4.10), ce qui conduit à :

$$\dot{\mathbf{J}}\mathbf{t} + \mathbf{J}\dot{\mathbf{t}} = \mathbf{K}\dot{\boldsymbol{\rho}} + \dot{\mathbf{K}}\boldsymbol{\rho} \quad (4.17)$$

où la nouvelle variable matricielle $\dot{\mathbf{J}}$ est une matrice de dimensions $n \times 6$ dont la $i^{\text{ième}}$ ligne est exprimée comme suit :

$$\dot{\mathbf{j}}_i = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{c}}_i^T & \dot{\mathbf{d}}_i^T \end{bmatrix} \quad i = 1, \dots, n \quad (4.18)$$

où

$$\dot{\mathbf{c}}_i = \dot{\mathbf{p}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i \quad (4.19)$$

$$\dot{\mathbf{d}}_i = \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i \times (\dot{\mathbf{p}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i) - (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}\mathbf{b}'_i) \times (\mathbf{a}_i - \dot{\mathbf{p}} - \mathbf{Q}\dot{\mathbf{b}}'_i) \quad (4.20)$$

tandis que la matrice $\dot{\mathbf{K}}$ est donnée par

$$\dot{\mathbf{K}} = \begin{bmatrix} \dot{\rho}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\rho}_n \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (4.21)$$

et $\dot{\mathbf{t}}$ et $\dot{\boldsymbol{\rho}}$ sont respectivement le vecteur d'accélération cartésienne et articulaire. Ces derniers sont exprimés ainsi :

$$\dot{\mathbf{t}} = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{p}}^T & \dot{\boldsymbol{\omega}}^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{p}}^T & \boldsymbol{\alpha}^T \end{bmatrix}^T \quad (4.22)$$

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \begin{bmatrix} \ddot{\rho}_1 & \dots & \ddot{\rho}_n \end{bmatrix}^T \quad (4.23)$$

En somme, l'équation (4.17) représente la relation entre les accélérations cartésiennes et articulaires. De cette manière, il est aisé de déterminer l'accélération articulaire des câbles lorsque la longueur et la vitesse des câbles à cet instant précis, la pose de l'effecteur ainsi que ses vitesses et accélérations cartésiennes et angulaires sont connues. D'ailleurs, l'expression suivante le démontre bien :

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{J}\dot{\mathbf{t}} + \dot{\mathbf{J}}\mathbf{t} - \dot{\mathbf{K}}\boldsymbol{\rho}) \quad (4.24)$$

Ainsi, les équations cinématiques de ce type de mécanisme sont élaborées. Dorénavant, grâce aux relations (4.1), (4.16) et (4.24), il est possible de déterminer la longueur des câbles, leur vitesse ainsi que leur accélération de déroulement ou d'enroulement autour de leur bobine respective. Bien entendu, il faut préalablement connaître toutes les informations cartésiennes liées à l'évolution de l'effecteur à l'intérieur de son espace de travail à six ddl.

Grâce aux relations précédentes, les expressions de la dynamique engendrées par ces mécanismes peuvent maintenant être abordées. Par conséquent, la section suivante y est consacrée.

4.2 Équations dynamiques d'un mécanisme parallèle à câbles

La dynamique est la partie de la mécanique qui étudie les relations entre les forces et les mouvements. Les mouvements ont été étudiés à la section précédente et il est maintenant intéressant de vérifier les forces qui les engendrent.

Tout d'abord, les deux types d'effort pouvant être appliqués sur un corps sont la force et le moment. Les équations dynamiques se basent sur l'application de ces efforts pour engendrer le déplacement (en translation et/ou en rotation) d'un solide dans l'espace. Ainsi, les deux équations générales sont décrites ci-dessous :

$$\sum \mathbf{f} = m\mathbf{a}_{cm} \quad (4.25)$$

$$\sum \mathbf{m}_{cm} = \dot{\mathbf{h}}_{cm} \quad (4.26)$$

L'équation (4.25) correspond à la deuxième loi de Newton et elle dicte que la sommation des forces externes exercées sur un solide engendre une accélération de son centre de masse dans la direction de la force résultante et dont l'amplitude est inversement proportionnelle à la masse de ce corps. Donc, \mathbf{f} est un vecteur de force externe appliqué sur le solide, m est la masse de ce corps et \mathbf{a}_{cm} est le vecteur d'accélération de son centre de masse. D'ailleurs, ce vecteur d'accélération est généralement défini comme suit :

$$\mathbf{a}_{cm} = \mathbf{a}_{\mathcal{X}} + \dot{\boldsymbol{\Omega}} \times \mathbf{r}_{cm/\mathcal{X}} + \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}_{cm/\mathcal{X}}) + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{v}_{rel} + \mathbf{a}_{rel} \quad (4.27)$$

où

- \mathbf{a}_{cm} est le vecteur de l'accélération du centre de masse de l'objet par rapport à un repère inertiel et exprimé dans un repère quelconque \mathcal{X} ;
- $\mathbf{a}_{\mathcal{X}}$ est le vecteur de l'accélération de l'origine du système de coordonnées \mathcal{X} par rapport au repère inertiel et exprimé dans le repère \mathcal{X} ;
- $\boldsymbol{\Omega}$ est le vecteur de vitesse angulaire du système de coordonnées \mathcal{X} par rapport au repère inertiel et exprimé dans le repère \mathcal{X} ;
- $\dot{\boldsymbol{\Omega}}$ est le vecteur d'accélération angulaire du système de coordonnées \mathcal{X} par rapport au repère inertiel et exprimé dans le repère \mathcal{X} ;
- $\mathbf{r}_{cm/\mathcal{X}}$ est le vecteur reliant l'origine du système de coordonnées \mathcal{X} au centre de masse de l'objet et exprimé dans ce même repère \mathcal{X} ;

- \mathbf{v}_{rel} est le vecteur de la vitesse relative du centre de masse de l'objet par rapport à l'origine du système de coordonnées \mathcal{X} et exprimé dans le repère \mathcal{X} ;
- \mathbf{a}_{rel} est le vecteur de l'accélération relative du centre de masse de l'objet par rapport à l'origine du système de coordonnées \mathcal{X} et exprimé dans le repère \mathcal{X} .

Enfin, il faut spécifier que l'équation (4.25) doit être exprimée dans un seul et même repère pour être utilisée correctement. Alors, comme décrit ci-haut, elle est entièrement exprimée à l'aide d'un système de coordonnées quelconque soit \mathcal{X} .

Ensuite, la seconde expression, soit l'équation (4.26), dicte que la sommation des moments autour du centre de masse d'un objet engendre un mouvement angulaire défini par le taux de variation du vecteur du moment cinétique de ce corps par rapport à ce même point. De manière similaire à la deuxième loi de Newton, cette relation doit être entièrement exprimée selon le même repère. Par conséquent, \mathbf{m}_{cm} est un couple appliqué à un solide par rapport à son centre de masse et il est exprimé à l'aide d'un repère quelconque \mathcal{X} et $\dot{\mathbf{h}}_{cm}$ est la dérivée par rapport au temps du vecteur du moment cinétique exprimé dans le même système de coordonnées.

De manière générale, le moment cinétique (ou la quantité de mouvement en rotation) lié à un corps est défini comme suit :

$$\mathbf{h}_{cm} = \mathbf{I}_{cm}\boldsymbol{\Omega} \quad (4.28)$$

où

- \mathbf{h}_{cm} est le vecteur du moment cinétique lié au centre de masse de l'objet par rapport à un repère inertiel et exprimé dans un repère quelconque \mathcal{X} ;
- \mathbf{I}_{cm} est la matrice d'inertie du solide par rapport à son centre de masse et exprimée dans le repère \mathcal{X} ;
- $\boldsymbol{\Omega}$ est le vecteur de vitesse angulaire du système de coordonnées \mathcal{X} par rapport au repère inertiel et exprimé dans le repère \mathcal{X} .

Ainsi, pour obtenir le vecteur $\dot{\mathbf{h}}_{cm}$, il faut dériver par rapport au temps l'équation (4.28) :

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{h}_{cm}) = \dot{\mathbf{I}}_{cm}\boldsymbol{\Omega} + \mathbf{I}_{cm}\dot{\boldsymbol{\Omega}} \quad (4.29)$$

À l'intérieur de cette équation, la première moitié de la partie de droite apparaît

seulement si le repère \mathcal{X} n'est pas attaché au solide. En effet, si la matrice d'inertie est constante, cette formulation disparaît puisque la dérivée d'une constante est nulle.

D'ailleurs, en appliquant ces équations générales de la dynamique des solides au mécanisme solution de la présente étude, plusieurs simplifications peuvent être apportées. Tout d'abord, il faut rappeler qu'il y a deux repères qui sont considérés dans le cadre de ce travail soient celui inertiel \mathcal{O} (repère global) et celui attaché au solide \mathcal{O}' (repère mobile). Donc, dans ce cas particulier, le repère quelconque \mathcal{X} correspond au repère mobile \mathcal{O}' . Cependant, l'ensemble des équations de dynamique est exprimé à partir du repère inertiel. Par conséquent, l'équation (4.27) devient :

$$\mathbf{a}_{cm} = \mathbf{a}_{\mathcal{O}'} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_{cm/\mathcal{O}'} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{cm/\mathcal{O}'}) \quad (4.30)$$

où

- \mathbf{a}_{cm} est le vecteur de l'accélération du centre de masse de l'objet par rapport au repère inertiel \mathcal{O} et exprimé dans ce dernier ;
- $\mathbf{a}_{\mathcal{O}'}$ est le vecteur de l'accélération de l'origine du système de coordonnées \mathcal{O}' par rapport au repère inertiel et aussi exprimé dans \mathcal{O} ;
- $\boldsymbol{\omega}$ est le vecteur de vitesse angulaire du système de coordonnées \mathcal{O}' par rapport au repère inertiel et exprimé dans le repère \mathcal{O} ;
- $\dot{\boldsymbol{\omega}}$ est le vecteur d'accélération angulaire du système de coordonnées \mathcal{O}' par rapport au repère inertiel et exprimé dans le repère \mathcal{O} ;
- $\mathbf{r}_{cm/\mathcal{O}'}$ est le vecteur reliant l'origine du système de coordonnées \mathcal{O}' au centre de masse de l'objet et exprimé dans \mathcal{O} .

L'équation (4.30) propose une application de l'équation générale (4.27) à un cas particulier. Il est remarqué, grâce au fait que le repère mobile est attaché au solide, que les composantes \mathbf{v}_{rel} et \mathbf{a}_{rel} sont maintenant nulles, car le solide est considéré indéformable. De plus, le vecteur de vitesse angulaire $\boldsymbol{\Omega}$ du repère quelconque \mathcal{X} est remplacé par le vecteur de vitesse angulaire du solide soit $\boldsymbol{\omega}$.

En ce qui concerne l'équation du moment cinétique (4.28), elle devient :

$$\mathbf{h}_{cm} = \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'} \mathbf{Q}^T \boldsymbol{\omega} \quad (4.31)$$

où

- \mathbf{h}_{cm} est le vecteur du moment cinétique lié au centre de masse du solide par rapport au repère inertiel \mathcal{O} et exprimé dans ce dernier ;
- $[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}$ est la matrice d'inertie du solide par rapport à son centre de masse et exprimée dans le repère \mathcal{O}' (matrice constante vu que \mathcal{O}' est attaché au solide) ;
- \mathbf{Q} est la matrice de changement de repère appliquée à la matrice d'inertie permettant de passer du repère mobile au repère inertiel ;
- $\boldsymbol{\omega}$ est le vecteur de vitesse angulaire du solide par rapport au repère inertiel et exprimé dans le repère \mathcal{O} ;

En appliquant la dérivée par rapport au temps tel qu'à l'équation (4.29), la relation suivante est obtenue :

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{h}_{cm}) = \dot{\mathbf{Q}}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\boldsymbol{\omega} + \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\dot{\mathbf{Q}}^T\boldsymbol{\omega} + \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\dot{\boldsymbol{\omega}} \quad (4.32)$$

Ensuite, les mêmes manipulations proposées aux équations (4.4) à (4.7) peuvent être utilisées. Par conséquent, la dérivée du moment cinétique par rapport au temps s'écrit alors comme suit :

$$\dot{\mathbf{h}}_{cm} = \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\boldsymbol{\omega} + \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\boldsymbol{\Omega}^T\boldsymbol{\omega} \quad (4.33)$$

où il est supposé que le vect($\boldsymbol{\Omega}^T$) = $-\boldsymbol{\omega}$ depuis l'équation (4.6). De plus, à partir de l'équation (4.7), il est déduit que $\boldsymbol{\Omega}^T\boldsymbol{\omega} = -\boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{\omega}$ et donc que cette partie de l'équation (4.33) est nulle. Par conséquent, la formulation finale de la dérivée du moment cinétique par rapport au temps est la suivante :

$$\dot{\mathbf{h}}_{cm} = \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\boldsymbol{\omega} \quad (4.34)$$

Ainsi, à l'aide de la description détaillée des relations précédentes, les expressions de la dynamique associées au mouvement du mécanisme final présenté au chapitre 3 sont maintenant connues. Ces équations sont complètement exprimées à partir du repère global du système soit \mathcal{O} et elles se résument comme suit :

$$\sum \mathbf{f} = m[\mathbf{a}_{\mathcal{O}'} + \dot{\boldsymbol{\omega}} \times \mathbf{r}_{cm/\mathcal{O}'} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_{cm/\mathcal{O}'})] \quad (4.35)$$

et

$$\sum \mathbf{m}_{cm} = \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{Q}[\mathbf{I}_{cm}]_{\mathcal{O}'}\mathbf{Q}^T\boldsymbol{\omega} \quad (4.36)$$

Finalement, lorsque tous les paramètres à l'intérieur de la partie de droite de ces deux relations sont connus, il ne reste plus qu'à déterminer la sommation des efforts et

des moments appliquée à l'effecteur du manipulateur pour compléter ces deux expressions d'équivalence. En ce sens, la section suivante propose la définition de l'ensemble des efforts et des couples qui permettent d'engendrer un mouvement de marche à la plate-forme. Ceci mènera à la nécessité de résoudre le problème dynamique inverse (PDI) du mécanisme parallèle à câbles pour ainsi déterminer les tensions requises dans les câbles.

4.3 Détermination des tensions dans les câbles

Maintenant que la dynamique liée au mécanisme parallèle entraîné à l'aide de câbles est connue, il est justifié de s'interroger à propos de la méthode à utiliser pour déterminer la tension requise dans chacun des câbles pour équilibrer les efforts appliqués à l'effecteur lors d'une trajectoire précise. En ce sens, il faut tout d'abord choisir une trajectoire et définir les différentes composantes de force agissant sur la plate-forme. C'est-à-dire qu'il faut établir la composition de la partie de gauche des équations (4.35) et (4.36) de la dynamique.

Le choix de la trajectoire est fixé au parcours reproduisant une démarche typiquement humaine définie à la section 2.2.2.2 du mémoire. Ainsi, au chapitre 2, les déplacements et rotations des deux pieds ont été présentés et illustrés. Dans l'objectif de compléter les informations élaborant cette trajectoire, les vitesses, les accélérations et les efforts cartésiens liés à ce parcours sont montrés à l'annexe B. Il faut spécifier que dans l'optique de respecter les limitations prescrites au chapitre 1, la trajectoire simulée correspond à celle de la marche lorsque l'angle θ est limité à ± 45 degrés. Ainsi, l'annexe B contient aussi une description des méthodes utilisées pour modifier, de manière adéquate, les courbes de la trajectoire expérimentale. Par conséquent, l'ensemble des données nécessaires à définir le mouvement complet d'un point de la plate-forme de marche lors de ce parcours est connu. Plus précisément, la pose du repère mobile \mathcal{O}' de chaque plate-forme est considérée équivalente à celle du centre de masse du pied leur étant respectivement attaché.

Il est nécessaire d'ouvrir une parenthèse dans le but de préciser la justification de la limitation de la valeur atteignable de l'angle θ . L'objectif de cette étude étant entre autres de maximiser la couverture de l'EPP à l'intérieur de l'espace de travail

prescrit pour assurer le maintien d'un niveau de sécurité par rapport à l'équilibre de tous les torseurs possibles, cette limitation est imposée pour garder l'évolution de la plate-forme aussi loin que possible de la frontière de l'EPP. De cette manière, il est généralement possible d'atténuer les augmentations brusques au niveau des tensions requises dans un ou plusieurs câbles pour équilibrer un torseur précis selon une pose précise de l'effecteur. En limitant la plage de rotation en tangage à $\pm 45^\circ$, l'EPP est naturellement plus volumineux et donc la plate-forme peut parcourir un plus grand espace avant de s'approcher de sa frontière. En d'autres mots, cette frontière constitue une pose de l'effecteur à laquelle les câbles du mécanisme sont sur le point de ne plus pouvoir équilibrer tous les torseurs et donc, il est possible d'observer des variations brusques de tensions lorsque la plate-forme s'en approche. Cependant, la reproduction de la marche ne doit pas être limitée à cette plage et le chapitre 5 proposera une solution simple pour rendre les futurs essais expérimentaux réalistes vis-à-vis une simulation complète de la marche humaine.

Ensuite, l'analyse du phénomène physique lié à cette trajectoire démontre que les efforts appliqués à l'effecteur du mécanisme correspondent au poids de la personne, au poids la plate-forme et au torseur résultant des tensions dans les câbles. Par conséquent, ces trois éléments composent la partie de gauche des équations de la dynamique comme suit :

$$\sum \mathbf{f} = \mathbf{f}_{(\text{usager})} + \mathbf{f}_{(\text{plate-forme})} + \mathbf{f}_{(\text{câbles})} = m\mathbf{a}_{cm} \quad (4.37)$$

et

$$\sum \mathbf{m}_{cm} = \mathbf{m}_{cm(\text{usager})} + \mathbf{m}_{cm(\text{plate-forme})} + \mathbf{m}_{cm(\text{câbles})} = \dot{\mathbf{h}}_{cm} \quad (4.38)$$

En observant ces équations, les seules inconnues rencontrées sont la résultante des forces appliquées sur la plate-forme par les câbles $\mathbf{f}_{(\text{câbles})}$ et la résultante des moments qu'ils engendrent par rapport au centre de masse de cette même plate-forme $\mathbf{m}_{cm(\text{câbles})}$. En effet, les données de la démarche humaine permettent d'obtenir exactement les valeurs correspondantes aux variables $\mathbf{f}_{(\text{usager})}$ et $\mathbf{m}_{cm(\text{usager})}$. Ensuite, en établissant un modèle approximatif de la conception d'une plate-forme de marche à l'aide du logiciel Pro/ENGINEER^{®1} (voir figure 4.1), la matrice d'inertie \mathbf{I} exprimée dans le repère mobile \mathcal{O}' , la masse de la plate-forme (environ 15 kg) et le vecteur reliant le point d'application des efforts au centre de masse de cet effecteur sont connus. Ainsi, les variables $m\mathbf{a}_{cm}$, $\dot{\mathbf{h}}_{cm}$, $\mathbf{f}_{(\text{plate-forme})}$ et $\mathbf{m}_{cm(\text{plate-forme})}$ sont aisément déterminées. Par

¹Le site web de la compagnie PTC est <http://www.ptc.com/>.

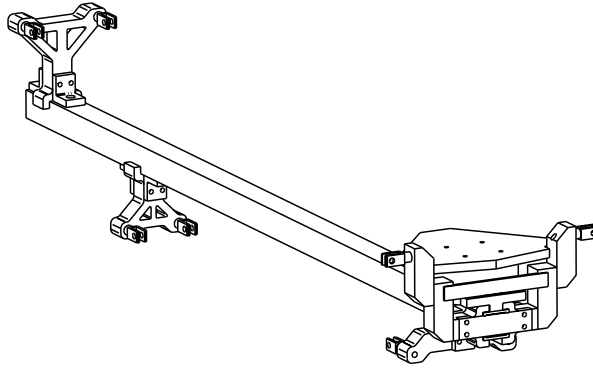


FIG. 4.1 – Modèle CAO préliminaire d'une plate-forme de marche.

ailleurs, les deux variables inconnues serviront à déterminer la distribution de tension dans les câbles pour accomplir la trajectoire désirée. En fait, le torseur devant être annulé par les câbles de la plate-forme est défini comme suit :

$$\mathbf{w} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{(\text{câbles})} \\ \mathbf{m}_{cm(\text{câbles})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m\mathbf{a}_{cm} - \mathbf{f}_{(\text{usager})} - \mathbf{f}_{(\text{plate-forme})} \\ \dot{\mathbf{h}}_{cm} - \mathbf{m}_{cm(\text{usager})} - \mathbf{m}_{cm(\text{plate-forme})} \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

L'évolution de ce dernier est illustrée à l'aide de la figure 4.2 dans le cas du pied droit et à l'aide de la figure 4.3 pour le pied gauche. Ces courbes démontrent les efforts étant appliqués aux plates-formes de marche selon les six ddl lors de la simulation de la démarche humaine. Il faut ajouter que ces efforts correspondent à une évolution de l'angle θ étant limité à une plage couvrant ± 45 degrés tel que discuté ci-haut.

Par la suite, dans l'objectif de déterminer les tensions dans les câbles, selon le principe du travail virtuel, il est permis d'écrire :

$$\boldsymbol{\tau}^T d\boldsymbol{\rho} = -\mathbf{w}^T d\mathbf{x} \quad (4.40)$$

tel que

$$\boldsymbol{\tau} = \left[\tau_1 \quad \tau_2 \quad \dots \quad \tau_n \right]^T \quad (4.41)$$

où τ_i est la tension dans le $i^{\text{ième}}$ câble et où $d\boldsymbol{\rho}$ et $d\mathbf{x}$ sont respectivement les variations infinitésimales du vecteur de la longueur des câbles et du vecteur des coordonnées cartésiennes de la pose de l'effecteur.

De plus, le signe négatif devant le vecteur \mathbf{w} s'explique par le fait que ce vecteur est défini comme étant la sommation des efforts externes appliqués sur la plate-forme,

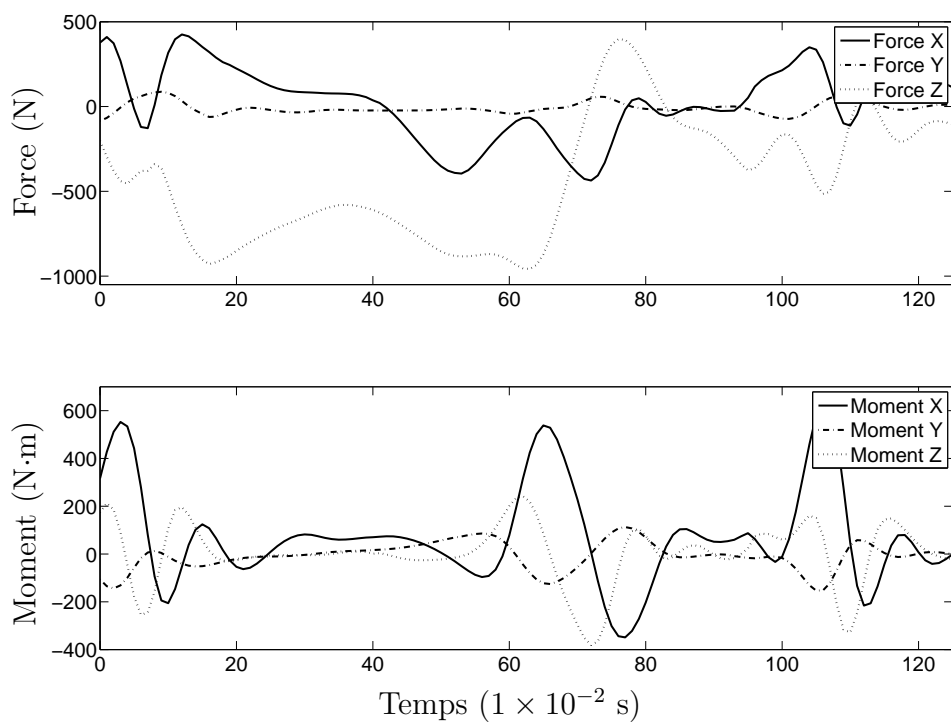


FIG. 4.2 – Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme droite.

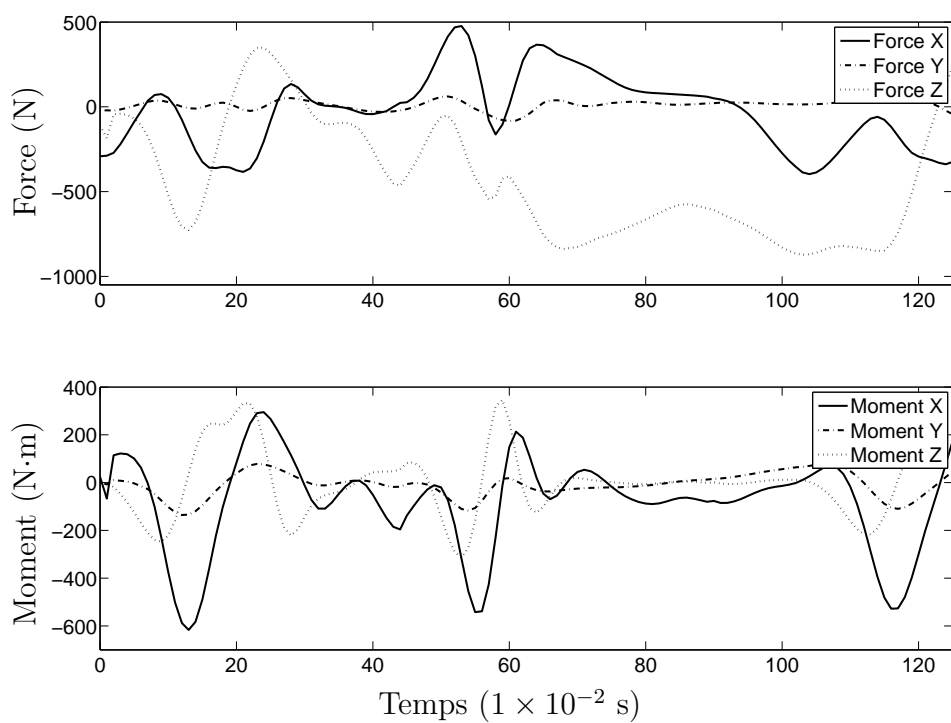


FIG. 4.3 – Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme gauche.

laquelle doit être annulée par la résultante des tensions dans les câbles. Par conséquent, la résultante des tensions dans les câbles doit être équivalente au torseur inverse du vecteur \mathbf{w} soit le torseur \mathbf{e} . L'équation (4.40) devient alors :

$$\boldsymbol{\tau}^T d\boldsymbol{\rho} = \mathbf{e}^T d\mathbf{x} \quad (4.42)$$

où

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} -\mathbf{f}_{(\text{câbles})} \\ -\mathbf{m}_{cm(\text{câbles})} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{(\text{usager})} + \mathbf{f}_{(\text{plate-forme})} - m\mathbf{a}_{cm} \\ \mathbf{m}_{cm(\text{usager})} + \mathbf{m}_{cm(\text{plate-forme})} - \dot{\mathbf{h}}_{cm} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

Par ailleurs, en se basant sur l'équation (4.16), la relation suivante peut être établie :

$$d\boldsymbol{\rho} = \mathbf{K}^{-1} \mathbf{J} d\mathbf{x} \quad (4.44)$$

En substituant l'équation (4.44) dans l'équation (4.42), l'expression suivante est obtenue :

$$\boldsymbol{\tau}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{J} d\mathbf{x} = \mathbf{e}^T d\mathbf{x} \quad (4.45)$$

Puisque cette relation doit être vérifiée pour toute valeur du vecteur $d\mathbf{x}$, la relation recherchée est exprimée comme suit :

$$\mathbf{W} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{e} \quad (4.46)$$

où \mathbf{W} est une matrice rectangulaire de dimensions $m \times n$ définie comme suit :

$$\mathbf{W} = (\mathbf{K}^{-1} \mathbf{J})^T = \mathbf{J}^T \mathbf{K}^{-T} \quad (4.47)$$

Enfin, l'équation (4.46) montre un système d'équations linéaires qui est, dans le cas présent, sous-déterminé, car les dimensions du tenseur \mathbf{W} sont telles que $m < n$ soit $m = 6$ (nombre de ddl) et $n = 8$ (nombre de câbles). Par conséquent, ce système admet une infinité de solutions pouvant respecter l'ensemble de ses équations.

Donc, dans l'objectif de déterminer une distribution adéquate de tensions dans les câbles, il va de soi qu'il est nécessaire de choisir une procédure permettant de solutionner ce problème tout en respectant les exigences liées à l'utilisation de câbles pour contrôler les plates-formes. Ainsi, la solution sélectionnée devrait au minimum contenir des tensions strictement positives pour respecter la contrainte de l'unilatéralité de l'actionnement propre à l'utilisation des câbles et de plus, elle devrait idéalement minimiser la valeur des tensions dans ces câbles. En somme, ces critères mènent à l'utilisation d'une méthode qui doit permettre de respecter des conditions d'égalité

ou d'inégalité tout en résolvant le système d'équations. Dans la littérature, plusieurs travaux suggèrent des algorithmes élaborés pour optimiser la distribution des tensions dans les câbles pour une trajectoire donnée [17, 41]. Cependant, dans le cadre de ce mémoire, une méthode simple et rapide est choisie comme technique de résolution soit l'utilisation de la programmation quadratique [34].

Pour ce faire, un algorithme préalablement programmé et accessible dans les outils du logiciel MATLAB® (l'outil *quadprog*) est utilisé pour déterminer la distribution des tensions. Celui-ci est défini, en utilisant les variables de cette présente étude, comme suit :

$$\min_{\boldsymbol{\tau}} \quad \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{H} \boldsymbol{\tau} + \mathbf{k}^T \boldsymbol{\tau} \quad \text{tel que} \quad \mathbf{W} \boldsymbol{\tau} = \mathbf{e} \quad (4.48)$$

$$b_{inf} \leq \boldsymbol{\tau} \leq b_{sup}$$

où \mathbf{H} et \mathbf{k} sont respectivement une matrice et un vecteur de pondération et ils servent dans le cas où il serait requis de minimiser majoritairement une valeur ou des valeurs en particulier. Dans le cas présent, ces variables sont équivalentes pour l'ensemble des valeurs et elles sont donc définies comme suit :

$$\mathbf{H} = \mathbf{1} \quad \text{et} \quad \mathbf{k} = \mathbf{0} \quad (4.49)$$

De plus, les valeurs b_{inf} (10 N) et b_{sup} (2 000 N) sont respectivement les bornes inférieures et supérieures dans lesquelles les valeurs des tensions dans les câbles de la solution doivent se trouver.

Finalement, en résolvant le système d'équations à l'aide de la programmation quadratique, une distribution de la tension dans les câbles de chacune des plates-formes est obtenue. Ces combinaisons d'efforts articulaires permettent d'engendrer un torseur, évoluant dans le temps, aux plates-formes de marche de manière à compenser celui provenant des efforts externes appliqués à ces mêmes plates-formes lors d'une trajectoire typique de la démarche humaine.

Les résultats relatifs aux longueurs, aux vitesses et aux accélérations articulaires sont présentés à l'annexe D, tandis que ceux relatifs aux forces articulaires sont présentés à l'aide de la figure 4.4 dans le cas de la plate-forme droite et à l'aide de la figure 4.5 dans le cas de la plate-forme gauche. Il est possible d'y observer que les tensions maximales calculées pour chacun des deux effecteurs se trouvent généralement au niveau de leurs câbles respectifs 1-2-5-6 soient ceux orientés vers le haut ou leurs câbles 1-2-3-4 étant

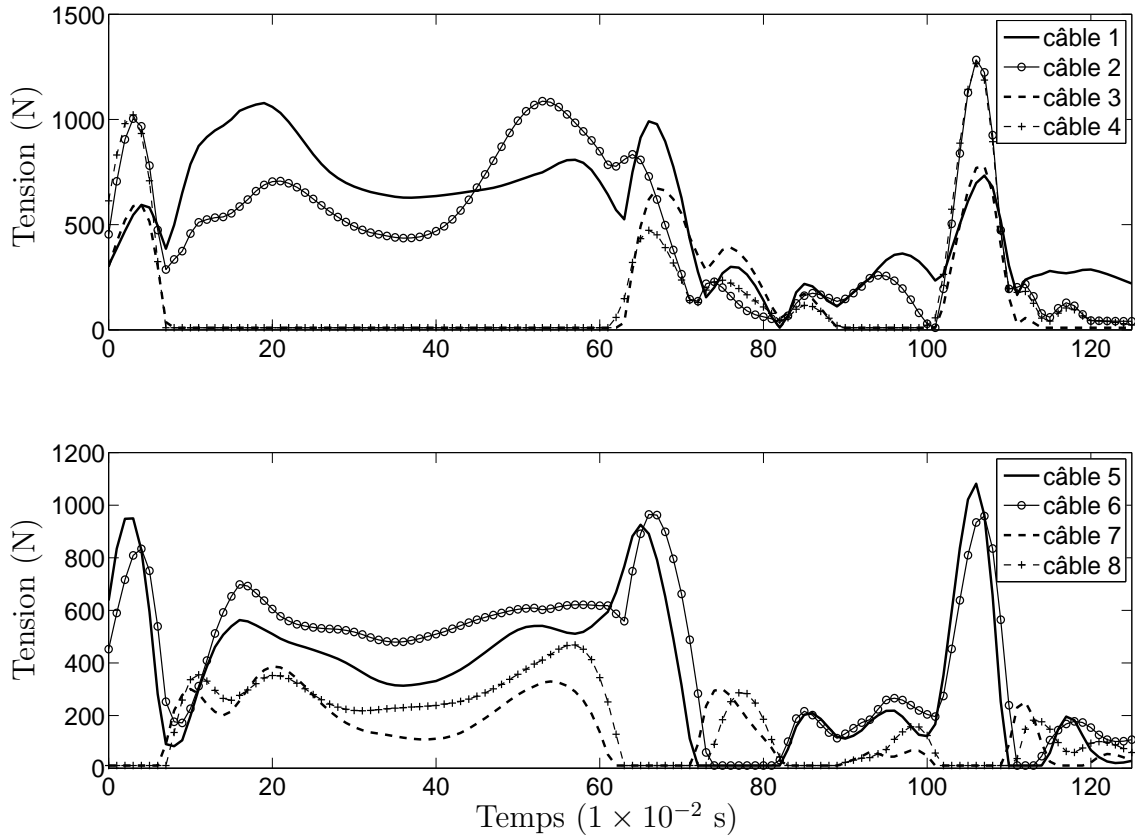


FIG. 4.4 – Évolution des forces articulaires de la plate-forme droite.

ceux attachés à proximité du pied de l'utilisateur (voir figure 3.18). Plus précisément, les forces articulaires maximales pour la plate-forme droite sont d'environ 1 078 N pour le câble 1, 1 283 N pour le câble 2, 777 N pour le câble 3, 1 265 N pour le câble 4, 1 082 N pour le câble 5 et 965 N pour le câble 6. En ce qui a trait à l'effecteur gauche, des valeurs similaires sont observées soient d'environ 1 326 N pour le câble 1, 1 070 N pour le câble 2, 1 021 N pour le câble 3, 999 N pour le câble 4, 1 010 N pour le câble 5 et 1 156 N pour le câble 6. Ces observations s'avèrent prévisibles puisque les câbles 1-2-3-4-5-6 de chacune des plates-formes sont ceux attachés à des endroits propices pour être plus fortement sollicités (proximité des pieds de l'utilisateur et/ou orientation vers le haut). Ainsi, ils font partie des câbles les plus sollicités pour l'équilibrage des efforts lors de la marche. Enfin, l'ensemble des autres câbles (7 et 8) présentent des tensions ne dépassant pas la barrière des 468 N. De plus, il peut être remarqué que les sous-groupes de câbles les plus souvent sollicités sont ceux orientés vers le haut (lignes continues (1-2-5-6)) et ceci s'explique par le fait que ces câbles sont plus fortement destinés à supporter le poids de l'utilisateur et des plates-formes que ceux orientés vers le bas (lignes discontinues (3-4-7-8)).

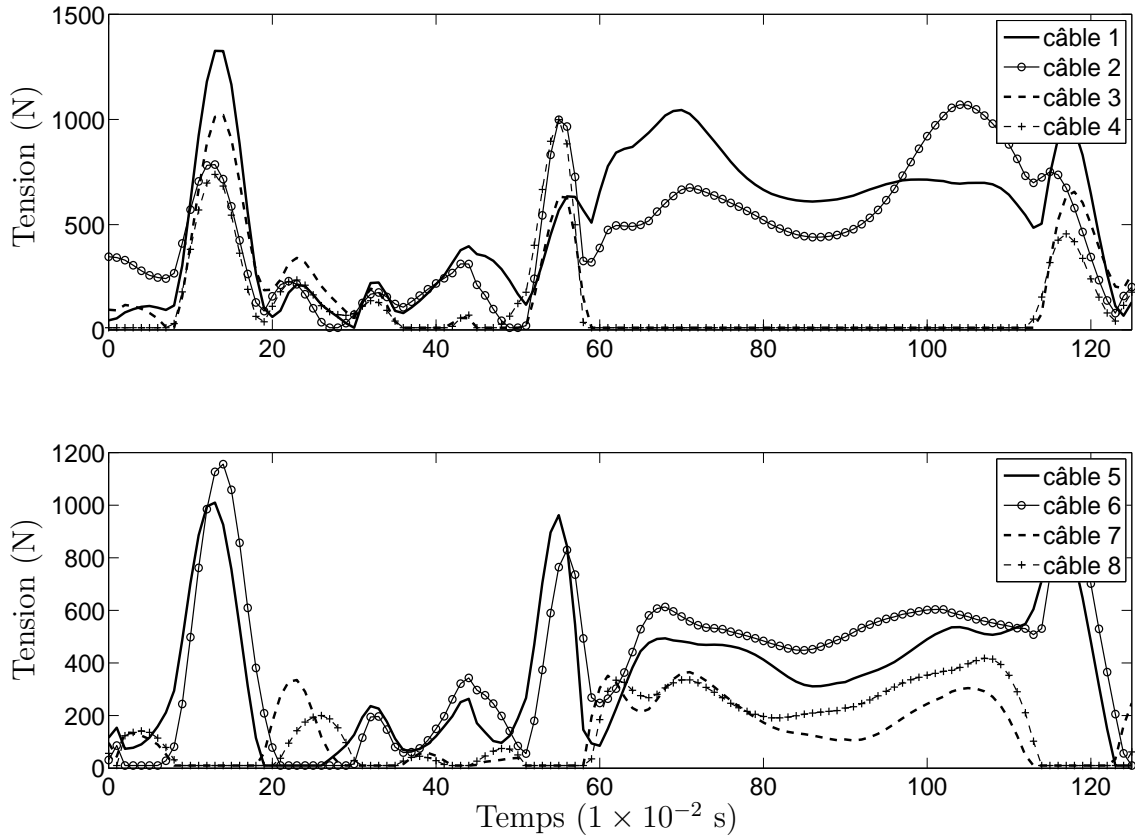


FIG. 4.5 – Évolution des forces articulaires de la plate-forme gauche.

Finalement, il y a deux parties distinctes lors de la marche soient celle où le pied est au sol et celle constituant son déplacement aérien. Chacune de ces zones présente des tensions atteignant des valeurs similaires tout en correspondant à l'équilibre de différents efforts. La zone d'appui au sol comporte majoritairement l'équilibre du poids de l'utilisateur tandis que la zone aérienne du pied comporte principalement l'équilibre des effets inertiels de la plate-forme pour suivre le mouvement imposé par le pied de l'utilisateur. Cette dernière zone présente d'importants changements d'orientation de la pose de la plate-forme combinant des efforts externes plus faibles. Pour cette raison, les tensions dans les câbles fluctuent énormément et en général, plus les accélérations angulaires sont élevées, plus les tensions requises de quelques câbles sont élevées pour mouvoir la plate-forme plus rapidement. Du côté de la zone d'appui au sol, la pose du pied est quasiment constante et elle est combinée à des efforts externes importants et soutenus. Par conséquent, les variations des tensions dans cette région sont habituellement moins prononcées. En somme, il peut être constaté qu'en observant les résultats engendrés à l'aide de la programmation quadratique, la physique du phénomène de l'évolution de la démarche humaine peut être facilement retrouvée.

Suite à l'analyse des tensions dans les câbles générées pour effectuer la trajectoire de marche, il est maintenant évident que ce type d'application peut être exécuté sans problème à l'aide du mécanisme solution de cette étude vu une tension maximale relativement faible de 1 326 N. D'ailleurs, la plupart des câbles tressés en acier d'aujourd'hui peuvent résister à des tensions dépassant aisément cette valeur en utilisant des diamètres de l'ordre de trois millimètres. Par conséquent, il est possible d'affirmer que ce type d'architecture de mécanisme parallèle entraîné par câbles présente des propriétés intéressantes vis-à-vis sa future utilisation envers la conception d'une interface de locomotion.

4.4 Conclusion

Ce chapitre a complété le dernier niveau de validation du mécanisme solution. Cette étape a permis de vérifier les tensions dans les câbles nécessaires pour équilibrer les efforts appliqués aux plates-formes lors d'une simulation numérique de la démarche humaine. Les différentes étapes permettant d'atteindre l'objectif de ce chapitre ont été présentées clairement.

Tout d'abord, les équations générales de la cinématique des mécanismes parallèles entraînés par câbles ont été élaborées dans le but de comprendre les relations liées au mouvement de ce type de système. Ensuite, la dynamique d'un tel mécanisme a été présentée par l'énumération des principales expressions et elle a permis de cerner la relation entre les efforts et l'exécution d'un mouvement à l'effecteur.

Par la suite, dans l'objectif de déterminer l'évolution des tensions dans les câbles permettant de générer une trajectoire connue telle que la marche humaine, le principe du travail virtuel a été utilisé pour élaborer un système d'équations permettant d'exprimer les forces articulaires en fonction des matrices jacobiniennes et des efforts externes appliqués aux plates-formes. Ces derniers efforts étant la sommation du torseur lié au poids de l'utilisateur, au poids des plates-formes et à leurs effets inertiels lors de cette trajectoire.

De plus, il a été montré que ce système d'équations est qualifié de sous-déterminé, car le tenseur résultant \mathbf{W} est de dimensions $m \times n$ dont $m > n$. Alors, cela implique

qu'il y a une infinité de solutions résolvant ce système d'équations. Par conséquent, une technique a été utilisée pour sélectionner une des multiples solutions possibles permettant de minimiser la norme de chacune des composantes du vecteur solution tout en respectant le système d'équations et les contraintes liées à l'unilatéralité d'actionnement des mécanismes à câbles. Dans le cadre de cette étude, la programmation quadratique a été choisie pour résoudre ce système tout en s'assurant que les valeurs des tensions soient positives et que cette distribution mène à l'atteinte de l'objectif principal qui est d'équilibrer les efforts ressentis à la plate-forme lors de la trajectoire de marche. Ainsi, les résultats ont démontré que les tensions maximales se situent soit au niveau des câbles situés près du pied de l'utilisateur et/ou au niveau des câbles orientés vers le haut. Enfin, la valeur maximale des tensions dans les câbles pour la plate-forme droite est d'environ 1 283 N et de 1 326 N pour celle de gauche.

En somme, ce chapitre a permis de réaliser que le concept choisi pour la solution finale de ce projet est adéquat et qu'il permet d'équilibrer les efforts appliqués aux plates-formes lors d'une simulation numérique grandement représentative d'une application typique d'un simulateur de marche. Cependant, même si cette solution paraît très adéquate de manière théorique, il reste encore à prouver qu'il en est ainsi lors d'essais expérimentaux. C'est pour cette raison que le chapitre suivant énumérera les étapes suggérées devant être accomplies dans l'objectif d'effectuer ces futurs essais expérimentaux à l'aide entre autres d'un prototype à échelle réduite.

Chapitre 5

Proposition de travaux futurs

Ce chapitre contient les idées envisagées face à l'avenir proche et lointain de ce projet. Ces affirmations représentent une série de lignes directrices pouvant être envisagées dans l'optique d'atteindre l'objectif ultime de ce projet soit la conception d'une interface de locomotion relativement simple, entraînée à l'aide de câbles et fonctionnelle à l'échelle humaine.

Dans l'objectif de s'assurer que les idées liées à la suite de ce projet ne soient pas perdues, le chapitre présent les résume. Il constitue donc une liste générale de suggestions relatives aux étapes qui pourraient être franchies pour mener à bien la suite du projet. Pour ce faire, le corps de ce chapitre se divise en deux thèmes soient une description des travaux de conception pouvant être réalisés et une énumération du fonctionnement envisagé du système et des diverses idées d'application imaginées.

5.1 Travaux de conception à venir

Tout d'abord, il va de soi que la future étape pour ce projet est la fabrication d'un prototype à échelle réduite d'une seule plate-forme de marche. Cette démarche est présentement amorcée et elle sera facilitée par le fait que le Laboratoire de robotique possède déjà quelques équipements nécessaires à sa réalisation.

Entre autres, le laboratoire possède une charpente aux dimensions tel un cube dont chacune des arêtes mesurent deux mètres. Cette structure sera idéale comme cadre externe pour réaliser le montage de ce premier prototype vu que l'échelle du prototype est fixée à $1/3$ des dimensions du système réel (basées sur les paramètres géométriques de la solution finale présentés au tableau A.6) et que les dimensions hors tout du système complet sont approximées à $6,0 \times 3,5 \times 3,0$ mètres. De plus, un capteur d'effort à six ddl, huit moteurs et huit systèmes d'enrouleur pour les câbles (comportant chacun une jauge de déformation pour vérifier la tension dans les câbles) sont disponibles afin de concrétiser le montage (voir référence [38] pour une description détaillée).

Ainsi, le travail devant être accompli dans un avenir proche pour compléter ce prototype se résume en les différents points suivants :

- définir, de manière précise, les emplacements des huit enrouleurs à l'intérieur de la structure cubique en se basant sur les paramètres géométriques A_i donnés au tableau A.6 ;
- sélectionner le type de câble à utiliser pour entraîner le mécanisme et les longueurs maximales nécessaires ;
- concevoir une plate-forme de marche comportant des points d'attache des câbles suivant les données B'_i du tableau A.6 et remises à l'échelle voulue ;

- concevoir un socle d’ancrage au sol permettant de calibrer la longueur des câbles de l’effecteur lors d’une phase d’initialisation ;
- inclure tous les éléments électroniques et informatiques requis pour contrôler le mécanisme et fournis par le Laboratoire de Vision et Systèmes Numérique de l’Université Laval.

Il est à remarquer que cette énumération laisse entrevoir la conception d’une plate-forme de marche à échelle réduite. D’ailleurs, il est requis de préciser les exigences par rapport à cette tâche.

Premièrement, cette plate-forme devra être fabriquée principalement d’aluminium pour conserver un certain niveau de légèreté du mécanisme mobile. Ensuite, vu les dimensions réduites, le pied de l’usager sera remplacé par une imposition du déplacement de l’effecteur à l’aide de la main de l’évaluateur. Pour ce faire, un capteur d’effort mesurant les efforts selon les six ddl (trois en force et trois en moment) devra être fixé entre la plaque de support de la plate-forme et la plaque de support de la main. Enfin, en respectant les conditions de conception du mécanisme parallèle entraîné à l’aide de câbles de cette étude, qui ont été définies au chapitre 1, un système de fixation de la plaque de support de la main devra contenir un joint passif permettant d’atteindre approximativement les 25 degrés manquants (selon l’angle θ) pour exécuter complètement une trajectoire de marche humaine. En somme, la figure 5.1 illustre les différents éléments énumérés précédemment à l’aide d’une vue de côté d’un modèle simpliste d’une plate-forme à échelle réduite et elle démontre aussi les déplacements angulaires permis par l’addition de l’artifice mécanique. En effet, il y est montré la plage de rotation associée à l’angle θ soit de $\pm 45^\circ$ (θ^+ pour la partie positive et θ^- pour la partie négative) et aussi le débattement angulaire supplémentaire permis par le dispositif est illustré (θ^*). Suite à l’addition de ce système, la plage de rotation en tangage est dorénavant de $-45^\circ \leq \theta_{total} \leq 70^\circ$. Il est intéressant de noter que cet ajout pourrait être réalisé en utilisant un système de fixation pour les bottes de ski de fond dans le cas de l’interface de locomotion à grandeur réelle. Finalement, il est nécessaire d’ajouter que les points d’attache des câbles sur l’effecteur devront agir tel des joints sphériques pour éviter toutes courbures ponctuelles des câbles au niveau de la plate-forme et pour éviter une accumulation d’efforts en torsion au sein de ces mêmes câbles. De cette manière, les risques d’usure prématurée sont éliminés et il est donc possible d’augmenter leur durée de vie.

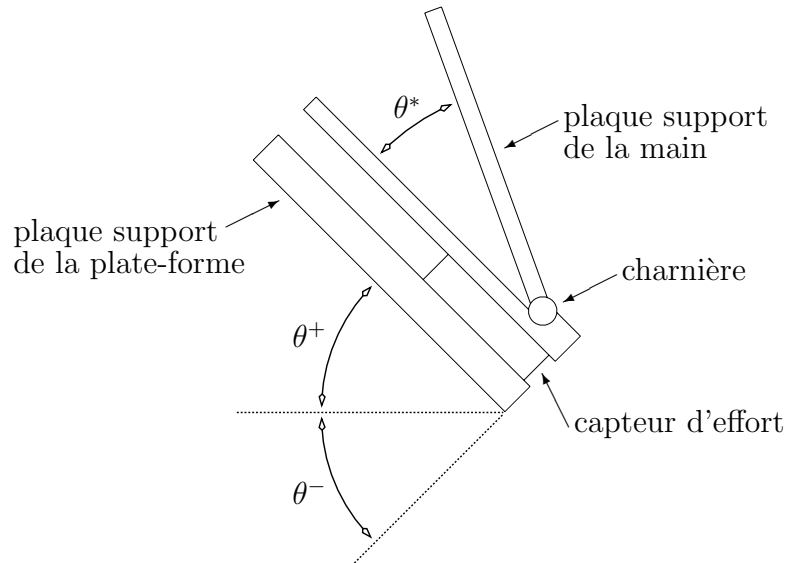


FIG. 5.1 – Représentation de l’artifice mécanique.

Par la suite, une fois que la première série d’essais expérimentaux avec une seule plate-forme sera exécutée, le deuxième mécanisme pourra alors être incorporé dans la charpente pour compléter cette portion du système de l’interface de locomotion. D’autres tests pourront alors être effectués pour assurer que le contrôle et la présence des deux plates-formes simultanément dans un environnement commun ne cause pas de problème imprévu.

Enfin, dans un avenir plus lointain, un prototype à échelle humaine devra être considéré dans l’objectif de s’approcher de la réalisation d’une interface de locomotion complète et fonctionnelle. Cette étape requerra un travail considérable tant au niveau de la conception mécanique qu’au niveau de la sélection des diverses composantes électromécaniques. En fait, tel que le prototype à échelle réduite, de nombreuses tâches devront être accomplies :

- concevoir ou sélectionner une charpente externe comportant des dimensions hors tout d’environ $6,0 \times 3,5 \times 3,0$ mètres ;
- Sélectionner des moteurs électriques performants pour assurer la possibilité de fournir des variations de couples fréquentes ;
- concevoir des enrouleurs robustes comportant la possibilité de mesurer précisément la tension dans les câbles ;
- choisir les câbles appropriés pour exécuter les essais expérimentaux ;
- concevoir de manière optimale deux plates-formes de marche incluant chacune un

- capteur d’effort à six ddl ;
- concevoir ou sélectionner un système de fixation des pieds de l’utilisateur aux plaques de support des plates-formes de marche contenant un joint passif permettant de couvrir au minimum les 25 degrés manquants pour atteindre environ 70 degrés en tangage ;
- concevoir un mécanisme parallèle entraîné par câbles contrôlant un dispositif fixé au niveau de la ceinture de l’utilisateur (harnais fixé approximativement au centre de masse de la personne). Ce mécanisme permettra d’effectuer un rappel au niveau du centre de masse de l’usager, évitant ainsi la possibilité de perte d’équilibre de la personne lors des manoeuvres de rappel sur la position de ces pieds (plates-formes) lors d’une séance de simulation ;
- concevoir un socle d’ancrage maintenant les effecteurs au sol pour permettre la calibration des longueurs des câbles lors de la phase d’initialisation des deux mécanismes ainsi qu’un système similaire pour le harnais précédemment discuté ;
- intégrer les différentes composantes électroniques complétant la portion contrôle et la portion réalité virtuelle de l’interface de locomotion ;
- prévoir différents niveaux de sécurité, autant mécaniques qu’électroniques, évitant ainsi tout risque de blessure à l’usager.
- compléter une série de tests expérimentaux prédéterminée, passant graduellement du contrôle des plates-formes jusqu’à la participation d’un volontaire, permettant ainsi d’effectuer une validation rigoureuse du concept.

Afin de donner une idée générale d’un prototype à échelle réelle, les figures 5.2 et 5.3 illustrent une modélisation effectuée à l’aide du logiciel Pro/ENGINEER® démontrant schématiquement un usager à l’intérieur du système complet conçu à partir des paramètres géométriques proposés au tableau A.6. Ainsi, le harnais et la charpente ne sont pas présentés au sein de ces figures, car ils seront le fruit de travaux futurs. En fait, la figure 5.2 montre le positionnement d’une personne au sein du système et la disposition des différents câbles (seize câbles) aux alentours. La figure 5.3 bonifie la visualisation du concept en proposant une vue de côté du système et en schématisant la position des actionneurs nécessaires à l’entraînement des câbles.

Maintenant que les travaux menant à la réalisation du prototype grandeur humaine de ce projet sont suggérés, il est important de prévoir les étapes à suivre lors de son utilisation. Par conséquent, la section suivante tentera de dicter les grandes lignes de la démarche à suivre lors d’une séance de simulation et elle proposera quelques applications

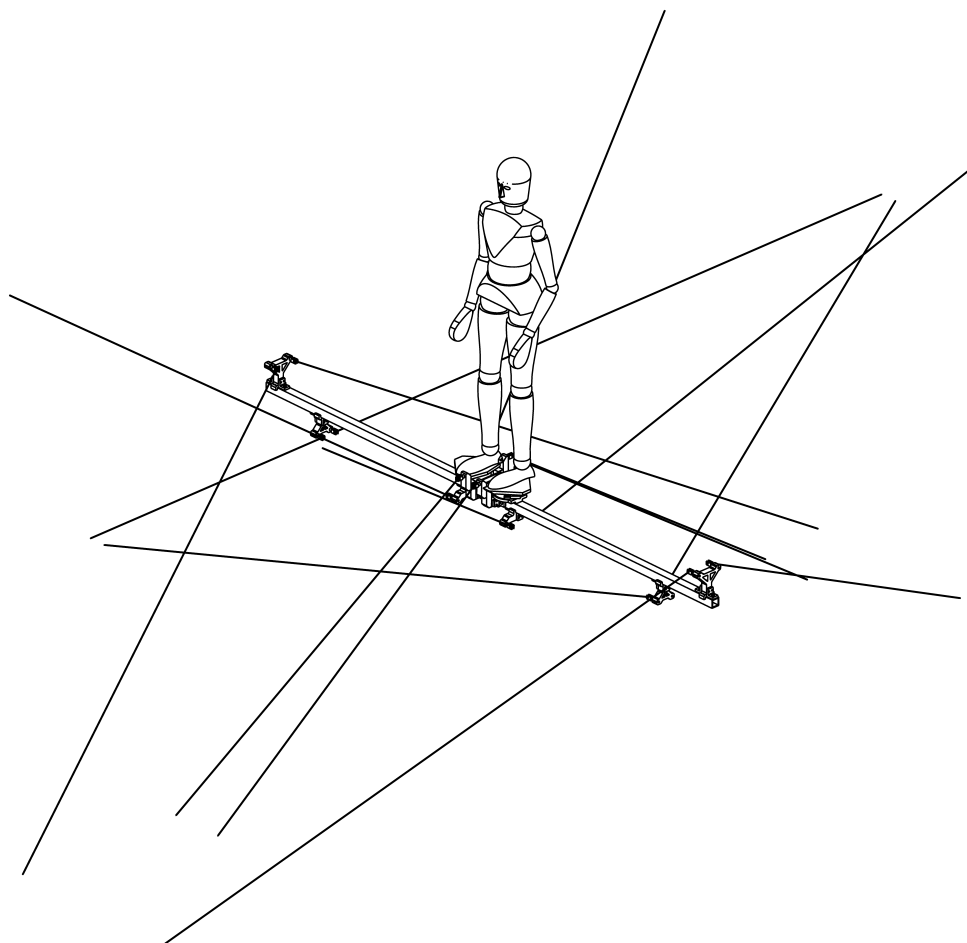


FIG. 5.2 – Modèle CAO simplifié du système complet.

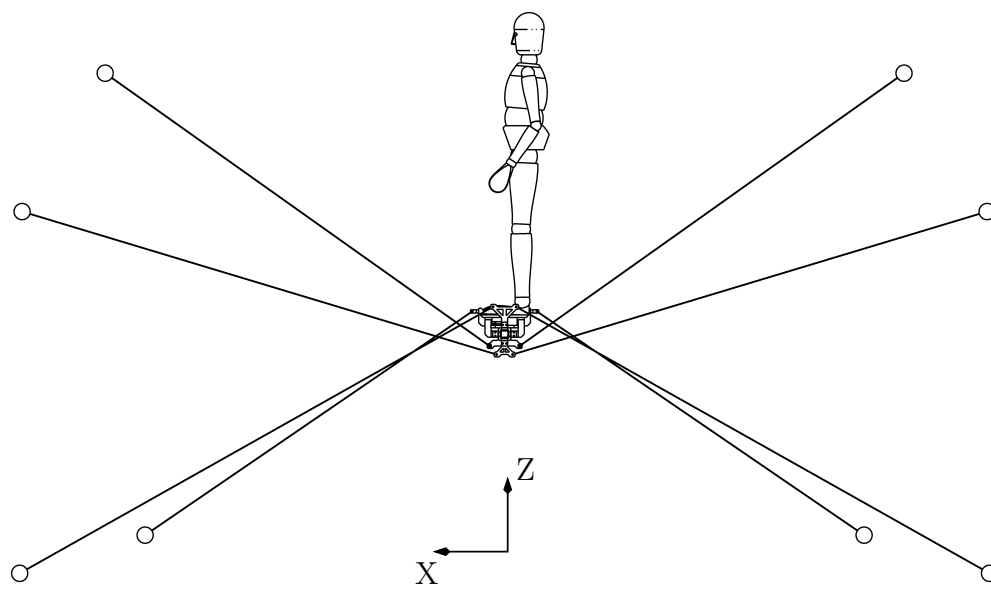


FIG. 5.3 – Vue de côté du modèle CAO simplifié du système complet.

optionnelles pouvant être exécutées par ce type de mécanisme.

5.2 Fonctionnement général et applications possibles du système

Dans le cadre d'une utilisation générale du système conçu pour réaliser une interface de locomotion, quelques idées peuvent être suggérées permettant de définir une suite logique des étapes à franchir avant, pendant et après une séance de simulation. Ainsi, ces lignes directrices sont énumérées ci-dessous :

1. Vérifier que les plates-formes sont solidement ancrées au socle d'ancrage situé au sol et similairement pour le harnais.
2. Mettre en tension les différents modules d'entraînement du système.
3. Calibrer la longueur des câbles avant chacune des utilisations du système.
4. Relâcher les câbles et attacher les pieds de l'individu à leur plate-forme respective ainsi que positionner le harnais au niveau de la ceinture de la personne.
5. Commander au système de soulever l'utilisateur en pose de référence (au centre de l'espace de travail de chacune des plates-formes).
6. Débuter l'exploration du monde virtuel.
7. Contrôler les plates-formes de marche suivant les intentions de l'individu tout en imposant un rappel selon les différents ddl pour conserver la pose des effecteurs aux alentours du centre de leur espace de travail.
8. Une fois la simulation terminée, commander au système de descendre les mécanismes au niveau de leur socle d'ancrage respectif et les fixer solidement.
9. Relâcher la tension dans les câbles.
10. Dégager la personne des systèmes de fixation et la sortir de la charpente du système.
11. Finalement, soit éteindre le système ou calibrer de nouveau les câbles avant de débiter une nouvelle séance.

Bien entendu, ces étapes ne représentent que les grandes lignes directrices et elles sont énumérées ici dans un objectif de donner un aperçu au lecteur du fonctionnement

plausible de ce système. De plus, il peut être ajouté que lors de la séance de simulation, la pose de chaque effecteur devra être limitée aux spécifications établies à la phase initiale du projet. En fait, les mécanismes ont été optimisés et conçus en respectant ces valeurs et il serait préférable que les trajectoires de chaque effecteur demeurent à l'intérieur de leur EPP. Ce dernier point assurera un niveau de sécurité vis-à-vis l'équilibrage de tous les torseurs pouvant être perçus aux plates-formes. De plus, dans le cas d'une simulation de la démarche humaine, le joint passif présent au système de fixation des pieds sur les plates-formes permettra de laisser libre court aux débattements angulaires imposés par le mouvement naturel de l'utilisateur. Cependant, le système de contrôle devrait être en mesure de prévoir les moments où la pose de la plate-forme atteindra une limite et de modifier l'intensité de son rappel pour ainsi éviter de s'y aventurer. Cette exigence permettra de limiter les effets indésirables ressentis au niveau de l'utilisateur et, d'ailleurs, minimisera les perturbations qui pourraient diminuer la sensation d'immersion totale de l'utilisateur à l'intérieur de l'environnement virtuel.

Enfin, plusieurs types de simulations peuvent être recrées à partir du système tel que présenté dans ce mémoire. Cependant, une fois que la mécanique du système est conçue et bien comprise, c'est à la partie du contrôle que revient la tâche d'expérimenter les différentes trajectoires, les diverses sensations ressenties et la panoplie d'environnements pouvant être représentées à l'individu utilisant un appareil de la sorte. Ainsi, dans l'optique de donner un avant goût des possibilités que ce genre de système peut apporter, une brève description relative à quelques applications envisageables est proposée pour terminer ce chapitre.

Il est évident que la principale application d'un tel simulateur est la reproduction de la démarche humaine sur un terrain plat et cette affirmation est facilement confirmée par l'utilisation de ce type de trajectoire pour optimiser et vérifier la solution proposée à l'intérieur de ce travail. Cependant, il est possible d'imaginer que l'interface de locomotion pourrait éventuellement reproduire des trajectoires sur des surfaces inclinées (voir référence [38]), des marches d'escalier, des terrains cahoteux ou des surfaces présentant différentes propriétés tels que la boue, l'eau, la glace, le sable, etc.

De plus, la simulation de la marche peut être utilisée pour divers objectifs comme les entraînements militaires, les exercices de réhabilitation (imposition d'une trajectoire prédéfinie aux pieds en supportant la personne à l'aide du harnais) et le divertissement de haut niveau (jeux interactifs en immersion totale dans un environnement virtuel).

Ensuite, outre les applications directes de cette interface de locomotion, il y a plusieurs idées indirectes qui peuvent découler de la réalisation d'un tel système.

Tout d'abord, en conservant le fait que le système contient deux plates-formes, il serait possible de modifier légèrement le concept pour le rendre conforme à une simulation d'un entraînement sportif tel que la descente en skis alpins. En effet, en inclinant quelque peu les architectures des deux mécanismes parallèles, une pente inclinée d'une station de ski serait aisément reproduite. Aussi, après éloignement des deux mécanismes de support, il serait envisageable de fixer chacune des roues d'un vélo de montagne à chaque sous-système et de reproduire le parcours d'un sentier montagneux. Ce concept requerrait quelques réflexions supplémentaires, mais il n'en reste pas moins qu'il serait possible de le réaliser. Ensuite, au lieu de contrôler les deux plates-formes, une d'entre elles pourrait être mise de côté pour simuler maintenant des sports tels que la planche à neige et la planche à roulette (en évitant les figures acrobatiques bien entendu). Finalement, toutes ces nouvelles applications exigeraient une analyse exhaustive de faisabilité, cependant il n'en reste pas moins qu'elles pourraient toutes être réalisées dans un avenir relativement rapproché à partir du système proposé.

5.3 Conclusion

Ce court chapitre s'est vu être une discussion et une ouverture à propos des travaux à envisager pour mener à terme ce projet. Tout d'abord, une liste des travaux devant être complétés dans le but de réaliser un premier prototype à échelle réduite est élaborée. Celle-ci a laissé entrevoir la nécessité de concevoir une plate-forme de marche en aluminium basée sur les paramètres géométriques de la solution finale de ce projet. Cet effecteur devra contenir un capteur d'effort à six ddl ainsi qu'un système de fixation comportant un joint passif donnant l'accès à une plus grande plage de rotation selon l'angle θ . Par la suite, une seconde liste a été établie soit celle liée à la réalisation d'un prototype à grandeur réelle de l'interface de locomotion. Les différents points énumérés forment en quelque sorte des recommandations au niveau de la mécanique pour mener à terme ce montage.

Enfin, la seconde section de ce chapitre propose, de manière générale, les lignes directrices à respecter pour utiliser l'interface de locomotion. Ces suggestions ne sont

pas strictes, mais elles donnent un aperçu de l'ordre des étapes qui devra être suivi. Finalement, les applications envisageables d'un tel système dépasse énormément la seule simulation de la démarche humaine. Cette dernière présente évidemment une utilisation directe de la solution exacte présentée dans ce mémoire, cependant il existe une multitude d'applications (descente en skis alpins, planche à neige, etc) qui devraient être abordées lorsque le projet arrivera à terme.

Conclusion

En somme, le but ultime du projet global étant de concevoir une interface de locomotion regroupant une structure mécanique, un environnement virtuel et une reproduction fidèle de la démarche humaine, le sujet de ce travail a permis de se rapprocher du succès convoité. À la lumière des différentes étapes parcourues et présentées au coeur de ce mémoire, la principale partie de la conception d'une plate-forme de marche entraînée à l'aide de câbles est belle et bien achevée. Cette première étape était entre autres de déterminer les paramètres géométriques optimaux permettant de respecter les exigences préalablement déterminées et de maximiser les performances du mécanisme vis-à-vis différents critères de conception.

En fait, ce document a premièrement décrit la problématique du présent projet et le cahier des charges lui étant imposé. Ainsi, l'espace de travail d'une plate-forme de marche a été défini selon les six ddl soit selon les trois coordonnées en position et rotation. Ensuite, les particularités associées à l'utilisation des mécanismes parallèles entraînés par câbles ont été énumérées et expliquées. Entre autres, l'unilatéralité des efforts pouvant être transmis par un câble sur un objet et les interférences possibles entre les diverses entités du système ont été abordées. Enfin, la sélection d'une solution initiale servant de point de départ pour les cycles d'optimisation a été présentée. Celle-ci se résume en un mécanisme parallèle entraîné à l'aide de huit câbles dont ces derniers sont en grande partie croisés pour augmenter les amplitudes des rotations accessibles.

Le second chapitre a proposé une description exhaustive des différents outils qui ont été utilisés pour évaluer les mécanismes de cette étude. Tout d'abord, le problème géométrique inverse des mécanismes parallèles entraînés par câbles a été élaboré. Ensuite, les critères de performance tels que l'espace des poses polyvalentes et l'espace des poses de compensation gravitationnelle ont été présentés. Ceux-ci ont été illustrés comme étant des espaces à l'intérieur desquels il est respectivement possible d'équilibrer l'ensemble de tous les torseurs ou au minimum le torseur associé au poids de la partie mobile du manipulateur en tendant une combinaison ou tous ces câbles. La nature de ces critères mène à la volonté de maximiser ces espaces pour tendre vers une couverture complète de l'espace de travail prescrit en début de projet. Par la suite, la théorie associée à la détection des interférences entre les entités du système complet a été présentée ainsi que les quatre trajectoires avec lesquelles les mécanismes ont été évalués. Ces parcours se résument en celui d'une démarche typiquement humaine, de cette même trajectoire avec l'orientation inversée, d'une trajectoire ellipsoïdale atteignant les frontières translationnelles de l'espace de travail avec une orientation de référence et d'une dernière qualifiée d'*exigeante* évoluant à l'intérieur de la majorité de l'espace de travail selon les six ddl et couvrant l'ensemble des plages de débattement en position et en rotation. Enfin, trois techniques d'optimisation ont été proposées soient l'utilisation d'un algorithme séquentiel, d'un algorithme génétique et d'une alternance des deux algorithmes précédents. Donc, la dernière méthode d'optimisation est celle qui a été retenue pour évaluer les derniers mécanismes de cette étude vu qu'elle permet de rallier les avantages de l'algorithme séquentiel et de l'algorithme génétique soient respectivement une rapidité et une simplicité de l'analyse des résultats et une comparaison tenant compte d'une plus grande plage de solutions.

Le chapitre suivant a démontré les étapes chronologiques qui ont mené à l'obtention de l'architecture finale proposée au sein de ce mémoire pour réaliser une plate-forme de marche ainsi qu'une analyse exhaustive des divers résultats lui étant associés. Premièrement, un outil supplémentaire pour évaluer les mécanismes est proposé. Celui-ci permet de vérifier le niveau d'évitement des interférences pour une géométrie lors de la trajectoire *exigeante* en imposant différentes combinaisons de plages de rotation à l'effecteur. Ensuite, l'évolution chronologique des solutions débutant de la solution initiale jusqu'à la solution finale et des méthodes utilisées pour améliorer les mécanismes à chaque étape a été décrite. De plus, les résultats des six géométries ainsi présentées sont comparés par rapport à l'ensemble des outils d'optimisation pour valider le choix de la solution finale. Enfin, le mécanisme sélectionné a fait l'objet d'une description

approfondie et il a été démontré que cette architecture respecte les exigences liées à la conception d'une interface de locomotion. De plus, tous les résultats lui étant associés ont été analysés permettant de cette manière de visualiser le signification physique de ceux-ci. En résumé, l'architecture suggérée comporte une couverture de l'EPP par rapport à l'espace de travail évaluée à 88,0 % et à 98,5 % en ce qui concerne l'EPCG. Du côté des interférences, seulement deux croisements sont décelés lors de la trajectoire simulant la démarche humaine et 22 lors de la trajectoire *exigeante*. Il faut cependant ajouter que ces interférences ont lieu lorsque les plates-formes atteignent des valeurs extrêmes de leurs plages de débattement (position et orientation) pour au minimum deux des six ddl du système.

Par la suite, le quatrième chapitre a pour sa part permis de vérifier les tensions dans les câbles nécessaires à la réalisation d'une simulation de la marche humaine par l'interface de locomotion. Pour ce faire, les équations cinématiques et dynamiques des mécanismes parallèles entraînés à l'aide de câbles ont été élaborées. Suite à la modélisation d'une plate-forme de marche et à la connaissance des données associées à une marche typiquement humaine, le torseur devant être équilibré par les câbles lors de cette simulation a été établi. Enfin, en se basant sur le principe du travail virtuel et sur l'utilisation de la programmation quadratique vu la présence d'un système d'équations sous-déterminé, l'évolution des tensions dans les câbles reproduisant la trajectoire désirée a été déterminée. Finalement, des tensions maximales d'environ 1 300 N ont été observées et celles-ci laissent entrevoir la faisabilité du concept à la réalisation de l'interface de locomotion.

Finalement, le dernier chapitre a énuméré les suggestions vis-à-vis la direction à prendre en ce qui concerne les travaux futurs liés à ce projet. Ainsi, la conception d'une plate-forme de marche à échelle réduite étant déjà amorcée, les tâches restantes ont été décrites telle que, par exemple, la fabrication d'un effecteur présentant un système de fixation contenant un joint passif pour augmenter les débattements angulaires en tangage du mécanisme. De plus, la poursuite du projet vers un prototype à échelle réelle a aussi été commentée. Enfin, une énumération de la suite des opérations pouvant être suivie pour utiliser adéquatement un tel système est proposée. Finalement, quelques aperçus de la vaste gamme d'application, autre que celle de la simulation de la marche, pouvant être associée à ce type d'appareil sont présentés et ils permettent d'imaginer l'étendue des possibilités reliées à l'utilisation des mécanismes parallèles entraînés par câbles.

À la lumière de l'ensemble du travail effectué et présenté dans ce mémoire, il est évident que les mécanismes parallèles entraînés à l'aide de câbles formeront le sujet de plusieurs travaux vu la diversité des applications auxquelles ils peuvent être associés. Cette récente branche de la robotique représente une nouvelle source d'inspiration pour les chercheurs ainsi que les futurs chercheurs en quête de nouveaux concepts mécaniquement simples et performants.

Bibliographie

- [1] <http://asimo.honda.com/>
- [2] <http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/HAL/indexE.html>
- [3] <http://www.bipm.fr/fr/si/>
- [4] Alp, A. B., Agrawal, S. K., “Cable Suspended Robots : Design, Planning and Control”, *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 4, Washington, D.C., États-Unis, mai, 2002, pp. 4275-4280.
- [5] Barrette, G., *Analyse des mécanismes parallèles actionnés par câbles*, Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2000.
- [6] Barrette, G., Gosselin, C. M., “Kinematic Analysis and Design of Planar Parallel Mechanisms Actuated with Cables”, *Proceedings of DETC'00 ASME 2000 design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conferences, DETC2000/MECH-14091*, Baltimore, MD, États-Unis, septembre, 2000.
- [7] Barrette, G., Gosselin, C. M., “Determination of the Dynamic Workspace of Cable-Driven Planar Parallel Mechanisms”, *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, Vol. 127, N° 2, mars, 2005, pp. 242-248.
- [8] Bonivento, C., Eusebi, A., Melchiorri, C., Montanari, M., Vassura, G., “WireMan : A Portable Wire Manipulator for Touch-Rendering of Bas-Relief Virtual Surfaces”, *IEEE : Proceedings of the 1997 8th International Conference on Advanced Robotic (ICRA '97)*, Monterey, CA, États-Unis, juillet, 1997, pp. 13-18.

- [9] Bosscher, P., Williams II, R. L., Tummino, M., “A Concept for Rapidly-Deployable Cable Robot Search and Rescue Systems”, *Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference - DETC2005-84324 : 29th Mechanisms and Robotics Conference*, Long Beach, CA, États-Unis, septembre, 2005, pp. 589-598.
- [10] Bostelman, R. V., Albus, J. S., Graham, R. E., “Robocrane and Emma Applied to Waste Storage Tank Remediation”, *American Nuclear Society Seventh Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Augusta, GA, États-Unis, avril, 1997.
- [11] Bostelman, R., Jacoff, A., Bunch, R., “Delivery of an Advanced Double-Hull Ship Welding System Using Robocrane”, *Third International ICSC (International Computer Science Conventions) Symposia on Intelligent Industrial Automation and Soft Computing*, Gênes, Italie, juin, 1999.
- [12] Cantin, B., *Étude des Performances, Analyse et Optimisation d'un Mécanisme Parallèle Spatial à 6 Degrés de Liberté entraîné par Câbles*, Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2004.
- [13] Côté, G., *Analyse et conception de Mécanismes Parallèles Actionnés par Câbles*, Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2003.
- [14] Darken, R. P., Cockayne, W. R., Carmein, D., “The Omni-Directional Treadmill : A Locomotion Device for Virtual Worlds”, *UIST (User Interface Software and Technology) : proceedings of the ACM Symposium*, 1997, pp. 213-221.
- [15] Dyer, S. A., Dyer, J. S., “Cubic-Spline Interpolation : Part 1”, *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, Vol. 4, mars, 2001, pp. 44-46.
- [16] Dyer, S. A., He, X., “Cubic-Spline Interpolation : Part 2”, *IEEE Instrumentation and Measurement Magazine*, Vol. 4, N° 2, juin, 2001, pp. 34-36.
- [17] Fang, S., Franitza, D., Torlo, M., Bekes, F., Hiller, M., “Motion Control of a Tendon-Based Parallel Manipulator Using Optimal Tension Distribution”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 9, N° 3, septembre, 2004, pp. 561-568.
- [18] Fattah, A., Agrawal, S. K., “Design of Cable-Suspended Planar Parallel Robots for an Optimal Workspace”, *proceedings of the WORKSHOP on Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators*, Québec, QC, Canada, octobre, 2002, pp. 195-202.
- [19] Goldberg, D. A., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, Addison-Wesley Publishing Company, 17th Printing, mars, 1998.

- [20] Gosselin, C. M., *Mécanique des Manipulateurs GMC-64388* (Notes de cours), Département de Génie Mécanique, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2004.
- [21] Gouttefarde, M., Gosselin, C. M., “On the Properties and the Determination of the Wrench-Closure Workspace of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms”, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, Vol. 2 A, *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference and Computers and Information in Engineering Conference 2004*, Vol. 2, *28th Biennial Mechanisms and Robotics Conference*, Salt Lake City, UT, États-Unis, 2004, pp. 337-346.
- [22] Gouttefarde, M., Gosselin, C. M., “Wrench-Closure Workspace of Six-DOF Parallel Mechanisms Driven by 7 Cables”, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 29, N° 4, 2005, pp. 541-552.
- [23] Gouttefarde, M., *Analyse de l'Espace des Poses Polyvalentes des Mécanismes Parallèles entraînés par Câbles*, Thèse de Doctorat, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2005.
- [24] Gouttefarde, M., Gosselin, C. M., “Analysis of the Wrench-Closure Workspace of Planar Parallel Cable-Driven Mechanisms”, *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 22, N° 3, juin, 2006, pp. 434-445.
- [25] Huang, J.-Y., “An Omnidirectional Stroll-Based Virtual Reality Interface and Its Application on Overhead Crane Training”, *IEEE Transactions on Multimedia*, Vol. 5, N° 1, mars, 2003, pp. 39-51.
- [26] Iwata, H., “Walking About Virtual Environments on an Infinite Floor”, *IEEE : Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium*, 1999, pp. 286-393.
- [27] Kawamura, S., Ida, M., Wada, T., Wu, J.-L., “Development of A Virtual Sports Machine using A Wire Drive System : A Trial of Virtual Tennis”, *IEEE : Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 1, août, 1995, pp. 111-116.
- [28] Kawamura, S., Kino, H., Won, C., “High-speed manipulation by using parallel wire-driven robots”, *Robotica*, Vol. 18, N° 1, janvier, 2000, pp. 13-21.
- [29] Lafourcade, P., Verhoeven, R., “Une nouvelle architecture, fortement redondante, pour un manipulateur à câbles au volume de travail étendu”, *In 16ème Congrès Français de Mécanique*, Nice, France, septembre, 2003.
- [30] Le Coroller, H., Dejonghe, J., Arpesella, C., Vernet, D., Labeyrie, A., “Tests with a Carlina-Type Hypertelescope prototype I. Demonstration of Star Tracking and

- Fringe Acquisition with a Balloon-Suspended Focal Camera”, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 426, N° 2, novembre, 2004, pp. 721-728.
- [31] Maeda, K., Tadokoro, S., Takamori, T., Hiller, M., Verhoeven, R., “On Design of a redundant Wire-Driven Parallel robot WARP manipulator”, *IEEE : Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, Détroit, MI, États-Unis, mai, 1999, pp. 895-900.
- [32] McFadyen, B. J., Prince, F., “Avoidance and Accommodation of Surface Height Changes by Healthy, Community-Dwelling, Young, and Elderly Men”, *Journal of Gerontology : BIOLOGICAL SCIENCES*, Vol. 57A, N° 4, 2002, pp. B166-B174.
- [33] Merlet, J-P., “Analysis of the Influence of Wires Interference on the Workspace of Wire Robots”, *On Advances in Robot Kinematics*, Kluwer Academic Publishers, 2004, pp. 211-218.
- [34] Nahon, M., *Optimization of Force Distribution In Redundantly-Actuated Robotic Systems*, Thèse de Doctorat, Université McGill, Montréal, QC, Canada, 1991.
- [35] Ottaviano, E., Ceccarelli, M., Paone, A., Carbone, G., “A Low-Cost Easy Operation 4-Cable Driven Parallel Manipulator”, *IEEE : Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Barcelone, Espagne, avril, 2005, pp. 4019-4024.
- [36] Peng, B., Nan, R., Strom, R. G., Duan, B., Ren, G., Zhai, J., Qiu, Y., Wu, S., Su, Y., Zhu, L., Jin, C., “The Technical Scheme for FAST”, *Perspectives in Radio Astronomy : Technologies for Large Antenna Arrays*, A. B. Smolders and M. P. van Haarlem, Ed. Astrom, Pays-Bas, 1999.
- [37] Perreault, S., Gosselin, C. M., “Cable-Driven Parallel Mechanism : Application to a Locomotion Interface”, *IS2006 16th Annual Canadian Conference on Intelligent Systems*, Victoria, B.-C., Canada, 2006.
- [38] Poulin, R., *Architecture et Commande d’une Interface de Locomotion utilisant un Mécanisme Parallèle entraîné à l’aide de Câbles*, Mémoire de Maîtrise, Université Laval, Québec, QC, Canada, 2005.
- [39] Pusey, J., Fattah, A., Agrawal, S., Messina, E., “Design and Workspace Analysis of a 6-6 Cable-Suspended Parallel Robot”, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 39, N° 7, juillet, 2004, pp. 761-778.
- [40] Schmidt, H., Hesse, S., Bernhardt, R., Krüger, J., “HapticWalker - A Novel Haptic Foot Device”, *ACM Transactions on Applied Perception (TAP)*, Vol. 2, N° 2, avril, 2005, pp. 166-180.

- [41] Shiang, W.-J., Cannon, D., Gorman, J., “Optimal Force Distribution Applied to a Robotic Crane with Flexible Cables”, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, San Francisco, CA, États-Unis, avril, 2000, pp. 1948-1954.
- [42] Strang, G., *Linear Algebra and Its Applications*, Brooks/Cole, 3rd Edition, février, 1988.
- [43] Tadokoro, S., Nishioka, S., Kimura, T., Hattori, M., Takamori, T., Maeda, K., “On Fundamental Design of Wire Configurations of Wire-Driven Parallel Manipulators with Redundancy”, *Proceedings of the Japan/USA Symposium on Flexible Automation*, Vol. 1, 1996, pp. 151-158.
- [44] Tadokoro, S., Verhoeven, R., Hiller, M., Takamori, T., “A Portable Parallel Manipulator for Search and Rescue at Large-Scale Urban Earthquakes and an Identification Algorithm for the Installation in Understructured Environments”, *IEEE : Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, octobre, 1999, pp. 1222-1227.
- [45] Tadokoro, S., Matsushima, T., Murao, Y., Kohkawa, H., Hiller, M., “A Parallel Cable-Driven Motion for Virtual Acceleration”, *IEEE/RSJ : Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, Maui, HI, États-Unis, octobre, 2001, pp. 1700-1705.
- [46] Tadokoro, S., Murao, Y., Hiller, M., Murata, R., Kohkawa, H., Matsushima, T., “A Motion Base with 6-DOF by Parallel Cable Drive Architecture”, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, Vol. 7, N° 2, juin, 2002, pp. 115-123.
- [47] Trevelyan, J. P., “A Suspended Device for Humanitarian Demining”, *EUREL International Conference. The Detection of Abandoned Land Mines : A Humanitarian Imperative Seeking a Technical Solution*, Conference Publication N° 431, Édinburgh, Écosse, octobre, 1996, pp. 42-45.
- [48] Usher, K., Winstanley, G., Corke, P., Stauffacher, D., “Air Vehicle Simulator : an Application for a Cable Array Robot”, *IEEE : Proceedings of the International Conference on Robotics and Automation (ICRA05)*, Barcelone, Espagne, avril, 2005, pp. 2253-2258.
- [49] Williams II, R. L., “Planar Cable-Suspended Haptic Interface : Design for Wrench Exertion”, *Proceedings of the 1999 ASME Design Technical Conferences, 25th Design Automation Conference, DETC99/DAC-8639*, Las Vegas, NV, États-Unis, septembre, 1999.

- [50] Yoon, J., Ryu, J., Burdea, G., “Design and Analysis of a Novel Virtual Walking Machine”, *IEEE : Proceedings of the 11th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (HAPTICS'03)*, mars, 2003, pp. 374-381.
- [51] Yoon, J., Ryu, J., “A New Family of Hybrid 4-DOF Parallel Mechanisms with Two Platforms and Its Application to a Footpad Device”, *Journal of Robotic Systems*, Vol. 22, N° 5, mai, 2005, pp. 287-298.
- [52] Yoon, J., Ryu, J., “A Novel Locomotion Interface with Two 6-DOF Parallel Manipulators That Allows Human Walking on Various Virtual Terrains”, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 25, N° 7, juillet, 2006, pp. 689-708.

Annexe A

Géométrie des différents mécanismes analysés

Cette annexe présente les paramètres géométriques des divers mécanismes proposés au coeur de ce mémoire. La position exacte des enrouleurs et celle des points d'attache situés sur les plates-formes sont décrites en exprimant leurs coordonnées cartésiennes tridimensionnelles. Ces informations servent de base pour conceptualiser l'architecture des deux manipulateurs (droit et gauche) requis à l'intérieur de la charpente d'une interface de locomotion.

La position des enrouleurs montrée au sein de cette annexe correspond à la position exacte à laquelle le câble devrait sortir du système d'enroulement soit celle de l'oeillet. De plus, elle est exprimée dans le repère global \mathcal{O} à l'aide de la variable A_i tel que montré à la figure 2.1. Dans un même ordre d'idées, les points d'attache situés sur les effecteurs sont exprimés à l'aide de la variable B'_i suivant le repère mobile \mathcal{O}' . Enfin, il faut ajouter que l'unité de mesure utilisée est le mètre pour toutes les valeurs contenues à l'intérieur des tableaux et que les indices $_d$ et $_g$ signifient respectivement la plate-forme de droite et celle de gauche.

A.1 Solution des figures 1.5 et 1.7

Le mécanisme 1 illustre l'architecture de la solution initiale du projet et les paramètres géométriques de cette dernière sont décrits au tableau A.1. L'effecteur de ce mécanisme ne possédant que quatre points d'attache, les points B'_1 et B'_2 , B'_3 et B'_4 , B'_5 et B'_8 ainsi que B'_6 et B'_7 sont confondus.

TAB. A.1 – Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 1.5 et 1.7.

	A_{1d}	A_{2d}	A_{3d}	A_{4d}	A_{5d}	A_{6d}	A_{7d}	A_{8d}
x	2,028	-2,828	-2,428	2,828	-2,028	-2,828	2,428	2,828
y	-0,800	0,000	0,400	0,000	-0,800	0,000	0,400	0,000
z	3,000	3,000	3,000	3,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B'_{1d}	B'_{2d}	B'_{3d}	B'_{4d}	B'_{5d}	B'_{6d}	B'_{7d}	B'_{8d}
x'	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	-0,175	-0,175	0,175
y'	-0,075	-0,075	0,075	0,075	-0,075	0,075	0,075	-0,075
z'	-0,075	-0,075	-0,075	-0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
	A_{1g}	A_{2g}	A_{3g}	A_{4g}	A_{5g}	A_{6g}	A_{7g}	A_{8g}
x	2,028	-2,828	-2,428	2,828	-2,028	-2,828	2,428	2,828
y	0,800	0,000	-0,400	0,000	0,800	0,000	-0,400	0,000
z	3,000	3,000	3,000	3,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B'_{1g}	B'_{2g}	B'_{3g}	B'_{4g}	B'_{5g}	B'_{6g}	B'_{7g}	B'_{8g}
x'	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	-0,175	-0,175	0,175
y'	0,075	0,075	-0,075	-0,075	0,075	-0,075	-0,075	0,075
z'	-0,075	-0,075	-0,075	-0,075	0,075	0,075	0,075	0,075

A.2 Solution des figures 3.2 et 3.3

Le mécanisme 2 illustre l'architecture de la solution obtenue à la suite de la première série d'optimisations. Le seul outil d'analyse utilisé était la maximisation du degré de couverture de l'EPP sur l'espace de travail prescrit. De plus, seule la position des enrouleurs sur le cadre externe du système a été optimisée au cours de cette étude. Donc, le positionnement des points d'attache situés sur l'effecteur est identique à celui de la solution initiale. Par conséquent, la plate-forme de ce mécanisme ne possède que quatre points d'attache et ainsi les points B'_1 et B'_2 , B'_3 et B'_4 , B'_5 et B'_8 , B'_6 et B'_7 sont confondus. Enfin, les paramètres géométriques de cette solution sont décrits au tableau A.2. Finalement, il faut mentionner que le mécanisme de gauche est une copie miroir de celui de droite par rapport à l'axe X du repère global du système.

TAB. A.2 – Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.2 et 3.3.

	A_{1d}	A_{2d}	A_{3d}	A_{4d}	A_{5d}	A_{6d}	A_{7d}	A_{8d}
x	1,203	-2,228	-1,703	2,078	-1,203	-2,078	1,703	2,228
y	-1,625	0,600	1,125	-0,750	-1,625	-0,750	1,125	0,600
z	3,000	3,000	3,000	3,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B'_{1d}	B'_{2d}	B'_{3d}	B'_{4d}	B'_{5d}	B'_{6d}	B'_{7d}	B'_{8d}
x'	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	-0,175	-0,175	0,175
y'	-0,075	-0,075	0,075	0,075	-0,075	0,075	0,075	-0,075
z'	-0,075	-0,075	-0,075	-0,075	0,075	0,075	0,075	0,075
	A_{1g}	A_{2g}	A_{3g}	A_{4g}	A_{5g}	A_{6g}	A_{7g}	A_{8g}
x	1,203	-2,228	-1,703	2,078	-1,203	-2,078	1,703	2,228
y	1,625	-0,600	-1,125	0,750	1,625	0,750	-1,125	-0,600
z	3,000	3,000	3,000	3,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B'_{1g}	B'_{2g}	B'_{3g}	B'_{4g}	B'_{5g}	B'_{6g}	B'_{7g}	B'_{8g}
x'	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	-0,175	-0,175	0,175
y'	0,075	0,075	-0,075	-0,075	0,075	-0,075	-0,075	0,075
z'	-0,075	-0,075	-0,075	-0,075	0,075	0,075	0,075	0,075

A.3 Solution des figures 3.4, 3.5 et 3.6

Le mécanisme 3 illustre l'architecture de la solution obtenue à la suite de la deuxième série d'optimisations. Les trois outils d'analyse utilisés étaient la maximisation du degré de couverture de l'EPP sur l'espace de travail prescrit et la détection des interférences entre tous les câbles du système lors de la trajectoire 1 et la trajectoire 3 (voir les sections 2.2.2.2 et 2.2.3). En ce qui concerne cette étude, la position des enrouleurs sur le cadre externe du système et celle des points d'attache sur l'effecteur ont été optimisées. Par contre, la plate-forme de ce mécanisme ne possède quand même que quatre points d'attache et ainsi les points B'_1 et B'_2 , B'_3 et B'_4 , B'_5 et B'_8 , B'_6 et B'_7 sont toujours confondus. Enfin, il faut mentionner que le mécanisme de gauche est une image de celui de droite tournée de 180° autour de l'axe Z du repère global du système (excluant la partie de la structure de l'effecteur servant à supporter le pied de l'utilisateur). Finalement, les paramètres géométriques de cette solution sont décrits au tableau A.3.

TAB. A.3 – Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.4 à 3.6.

	A_{1d}	A_{2d}	A_{3d}	A_{4d}	A_{5d}	A_{6d}	A_{7d}	A_{8d}
x	2,000	-2,000	-2,000	2,000	-2,000	-2,000	2,000	2,000
y	-1,550	0,500	0,530	-0,900	-1,550	-0,900	0,530	0,500
z	3,000	3,000	3,000	3,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	B'_{1d}	B'_{2d}	B'_{3d}	B'_{4d}	B'_{5d}	B'_{6d}	B'_{7d}	B'_{8d}
x'	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	-0,175	-0,175	0,175
y'	-0,085	-0,085	0,085	0,085	-0,085	0,085	0,085	-0,085
z'	-0,015	-0,015	-0,015	-0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
	A_{1g}	A_{2g}	A_{3g}	A_{4g}	A_{5g}	A_{6g}	A_{7g}	A_{8g}
x	2,000	-2,000	-2,000	2,000	-2,000	-2,000	2,000	2,000
y	1,550	-0,500	-0,530	0,900	1,550	0,900	-0,530	-0,500
z	0,000	0,000	0,000	0,000	3,000	3,000	3,000	3,000
	B'_{1g}	B'_{2g}	B'_{3g}	B'_{4g}	B'_{5g}	B'_{6g}	B'_{7g}	B'_{8g}
x'	-0,175	-0,175	0,175	0,175	0,175	-0,175	-0,175	0,175
y'	0,085	0,085	-0,085	-0,085	0,085	-0,085	-0,085	0,085
z'	0,015	0,015	0,015	0,015	-0,015	-0,015	-0,015	-0,015

A.5 Solution des figures 3.10, 3.11 et 3.12

Le mécanisme 5 illustre l'architecture de la solution obtenue à la suite de la quatrième série d'optimisations. Les cinq outils d'analyse utilisés étaient les mêmes qui ont permis d'engendrer le mécanisme 4. De manière similaire, la position des enrouleurs sur le cadre externe et celle des points d'attache sur l'effecteur ont été optimisées au cours de cette étude. Par contre, la plate-forme de ce mécanisme ne comporte pas de points d'attache confondus et ainsi ils sont tous distincts les uns des autres. Enfin, les paramètres géométriques de cette solution sont décrits au tableau A.5 et il faut préciser que le mécanisme de gauche est une copie miroir de celui de droite par rapport à l'axe X du repère global du système.

TAB. A.5 – Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.10 à 3.12.

	A_{1d}	A_{2d}	A_{3d}	A_{4d}	A_{5d}	A_{6d}	A_{7d}	A_{8d}
x	-2,750	2,750	2,560	-2,560	-3,530	3,530	3,380	-3,380
y	-0,940	-0,940	-0,271	-0,271	-0,170	-0,170	-0,460	-0,460
z	2,330	2,330	0,000	0,000	2,150	2,150	0,040	0,040
	B'_{1d}	B'_{2d}	B'_{3d}	B'_{4d}	B'_{5d}	B'_{6d}	B'_{7d}	B'_{8d}
x'	-0,070	0,070	0,150	-0,150	-0,060	0,060	0,050	-0,050
y'	-0,080	-0,080	0,050	0,050	-1,320	-1,320	-1,520	-1,520
z'	-0,130	-0,130	0,170	0,170	-0,120	-0,120	0,140	0,140
	A_{1g}	A_{2g}	A_{3g}	A_{4g}	A_{5g}	A_{6g}	A_{7g}	A_{8g}
x	-2,750	2,750	2,560	-2,560	-3,530	3,530	3,380	-3,380
y	0,940	0,940	0,271	0,271	0,170	0,170	0,460	0,460
z	2,330	2,330	0,000	0,000	2,150	2,150	0,040	0,040
	B'_{1g}	B'_{2g}	B'_{3g}	B'_{4g}	B'_{5g}	B'_{6g}	B'_{7g}	B'_{8g}
x'	-0,070	0,070	0,150	-0,150	-0,060	0,060	0,050	-0,050
y'	0,080	0,080	-0,050	-0,050	1,320	1,320	1,520	1,520
z'	-0,130	-0,130	0,170	0,170	-0,120	-0,120	0,140	0,140

A.6 Solution des figures 3.13, 3.14 et 3.15

Le mécanisme 6 illustre l'architecture de la solution obtenue à la suite de la cinquième et dernière série d'optimisations. L'ensemble des outils d'analyse présentés à la section 2.2 est utilisé dans l'objectif de créer un mécanisme optimal. Au cours de cette étude, la position des enrouleurs sur le cadre externe et celle des points d'attache sur l'effecteur ont été optimisées et ainsi la plate-forme de ce mécanisme ne comporte aucun point d'attache confondu. Enfin, les paramètres géométriques de cette solution sont décrits au tableau A.6 et il faut préciser, tel que pour la solution 5, que le mécanisme de gauche est une copie miroir de celui de droite par rapport à l'axe X du repère global du système.

TAB. A.6 – Paramètres géométriques de la solution montrée aux figures 3.13 à 3.15.

	A_{1d}	A_{2d}	A_{3d}	A_{4d}	A_{5d}	A_{6d}	A_{7d}	A_{8d}
x	-2,471	2,471	2,224	-2,224	-2,985	2,985	3,000	-3,000
y	-1,241	-1,241	-0,166	-0,166	-0,054	-0,054	-0,564	-0,564
z	3,065	3,065	0,234	0,234	2,217	2,217	0,000	0,000
	B'_{1d}	B'_{2d}	B'_{3d}	B'_{4d}	B'_{5d}	B'_{6d}	B'_{7d}	B'_{8d}
x'	-0,093	0,093	0,200	-0,200	-0,050	0,050	0,072	-0,072
y'	-0,150	-0,150	0,038	0,038	-1,196	-1,196	-1,540	-1,540
z'	-0,073	-0,073	0,139	0,139	-0,125	-0,125	0,167	0,167
	A_{1g}	A_{2g}	A_{3g}	A_{4g}	A_{5g}	A_{6g}	A_{7g}	A_{8g}
x	-2,471	2,471	2,224	-2,224	-2,985	2,985	3,000	-3,000
y	1,241	1,241	0,166	0,166	0,054	0,054	0,564	0,564
z	3,065	3,065	0,234	0,234	2,217	2,217	0,000	0,000
	B'_{1g}	B'_{2g}	B'_{3g}	B'_{4g}	B'_{5g}	B'_{6g}	B'_{7g}	B'_{8g}
x'	-0,093	0,093	0,200	-0,200	-0,050	0,050	0,072	-0,072
y'	0,150	0,150	-0,038	-0,038	1,196	1,196	1,540	1,540
z'	-0,073	-0,073	0,139	0,139	-0,125	-0,125	0,167	0,167

Annexe B

Données expérimentales d'une démarche typiquement humaine

Cette annexe démontre les principales manipulations qui ont été effectuées aux données d'une démarche typiquement humaine. Une méthode servant à imposer un rappel au niveau de la position, la vitesse et l'accélération est proposée dans le but de contraindre les mouvements réels de la personne (et non ceux virtuels) aux alentours de la position de référence des plates-formes de marche. En somme, cette annexe prépare les données servant à simuler une trajectoire de marche humaine à l'effecteur des mécanismes parallèles à câbles.

Le CIRRIS¹ est le centre de recherche de l'IRDPO (Institut de Réadaptation en Déficience Physique de Québec) associé à l'Université Laval. Ses principales activités reposent sur des recherches visant une meilleure compréhension des différents mécanismes constituant l'être humain dans son ensemble et ses diverses interactions avec son environnement. Dans le cadre de la présente étude, leur expertise et leur collaboration a permis d'obtenir des données expérimentales représentant une démarche typique d'un être humain en santé [32].

Dans le but d'utiliser ces informations pour simuler la trajectoire leur étant associée au niveau des plates-formes de marche d'une interface de locomotion, il a été requis de manipuler quelque peu ces données. Tout d'abord, il faut savoir qu'à l'intérieur d'un simulateur de marche, le mouvement virtuel d'une personne est une marche continue, par contre en réalité, cette même personne évolue autour d'une position de référence préalablement définie. C'est-à-dire qu'il y a une correction qui est appliquée sur la position de la personne à l'intérieur même de l'appareil pour s'assurer que l'utilisateur demeure à l'intérieur des limites de l'espace de travail du système.

Dans le cadre de ce projet, cette position de référence est fixée au centre du système selon l'axe X ($x = 0$). Dans l'optique de simplifier la tâche associée à l'imposition du rappel, seulement les déplacements suivant la coordonnée x seront corrigés, car cette direction contient les déplacements présentant les plus grandes amplitudes. Alors, pour ce faire, la position cartésienne moyenne entre les deux pieds de l'utilisateur doit approximativement toujours concorder avec la position $x = 0$ dans le repère global \mathcal{O} . En ce sens, il est requis de soustraire la position de la moyenne entre les deux pieds à chaque pas de temps de la trajectoire continue de chacun des pieds pour former une nouvelle trajectoire comportant un rappel selon ce même ddl. L'équation suivante résume l'idée de cette méthode :

$$p_x (\text{rappel } j) = p_x (\text{continue } j) - \frac{1}{2}(p_x (\text{continue pied droit}) - p_x (\text{continue pied gauche})) \quad (\text{B.1})$$

où j signifie soit le pied droit ou le pied gauche.

En effectuant un rappel de la sorte, il est évident que les vitesses et les accélérations expérimentales ne correspondent plus au phénomène en cours. Elles représentent plutôt les valeurs liées à une marche continue contenant des moments où chacun des pieds, tour à tour, sont à l'arrêt (au sol). Avec un tel rappel sur la position selon l'axe X,

¹Site web du CIRRIS <http://www.ulaval.ca/cirris/accueil.html>.

ces moments d'arrêt n'existent plus, car en réalité le pied gauche recule lorsque le pied droit avance et vice-versa. Par contre, la personne doit avoir absolument l'impression de ces moments d'arrêt et ceci est assuré par le fait que le mouvement relatif entre les deux pieds demeure similaire à celui d'une marche continue en tout temps.

Alors, pour respecter cette condition, il est nécessaire de corriger les données liées aux vitesses et aux accélérations suivant le même ddl :

$$v_x (\text{rappel } j) = v_x (\text{continue } j) - \frac{1}{2}(v_x (\text{continue pied droit}) - v_x (\text{continue pied gauche})) \quad (\text{B.2})$$

$$a_x (\text{rappel } j) = a_x (\text{continue } j) - \frac{1}{2}(a_x (\text{continue pied droit}) - a_x (\text{continue pied gauche})) \quad (\text{B.3})$$

Ainsi, le rappel selon l'axe X est complété. Il faut noter que les déplacements selon les axes Y et Z ne nécessitent pas de telles modifications, car ils ne présentent pas des amplitudes de mouvement suffisantes pour s'aventurer à l'extérieur de l'espace de travail prescrit. De plus, les rotations ne sont pas modifiées par ce type de changement. Enfin, les graphiques représentant l'évolution des positions des deux pieds ont été présentés aux figures 2.15 et 2.17 et ceux des vitesses et accélérations sont montrés à l'aide des figures B.1 et B.2. À l'intérieur de ces graphiques, le lien physique entre ces courbes, soit que les accélérations sont directement dérivées des vitesses, est observé. C'est-à-dire que les extremums retrouvés aux courbes de vitesse concordent avec le passage à une valeur nulle des courbes d'accélération.

Ensuite, pour compléter les données nécessaires à la connaissance de la cinématique de cette trajectoire de marche, les graphiques représentant l'évolution des vitesses angulaires et des accélérations angulaires sont présentés aux figures B.3 et B.4. Ces graphiques sont liés à une évolution angulaire des pieds sans aucune limitation au niveau de l'angle θ tel que prélevé lors d'analyses expérimentales du mouvement par le CIR-RIS (voir courbe noire des figures 2.16 et 2.18 selon θ). Ces graphiques démontrent bien entendu les relations de correspondance physique devant être décelées entre ces deux types de courbe.

Par la suite, tel que montré aux figures 2.16 et 2.18 (courbe grise selon θ), l'évolution de l'angle en tangage doit être limitée à $\pm 45^\circ$ pour respecter les spécifications préétablies en début de projet (voir tableau 1.1). Par conséquent, cette nouvelle trajectoire angulaire a été calculée en utilisant une méthodologie basée sur les splines cubiques [15, 16].

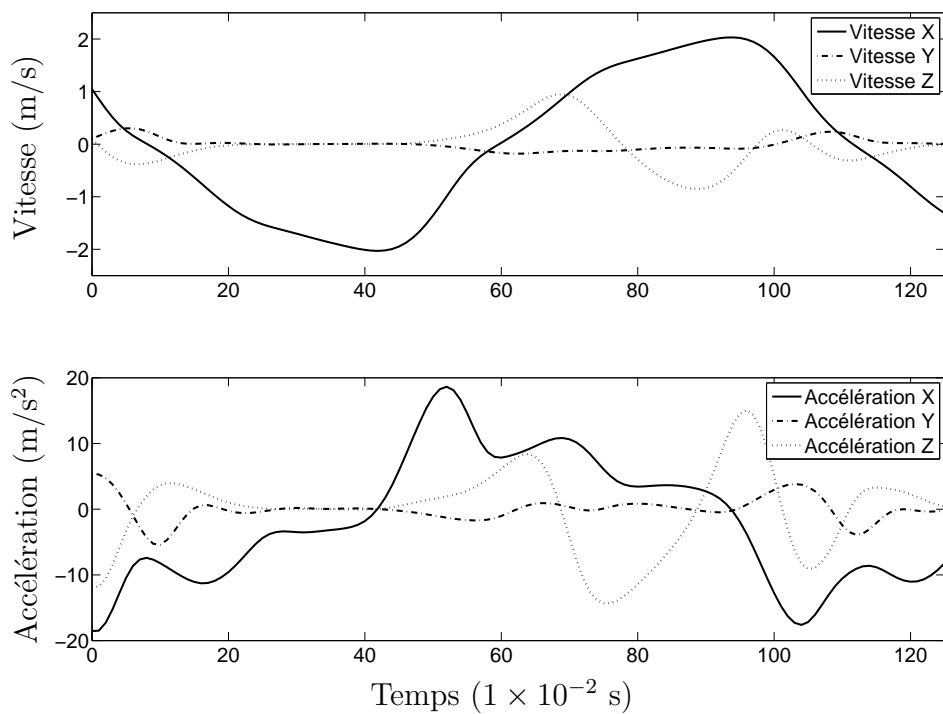


FIG. B.1 – Évolution des vitesses et accélérations de la plate-forme droite.

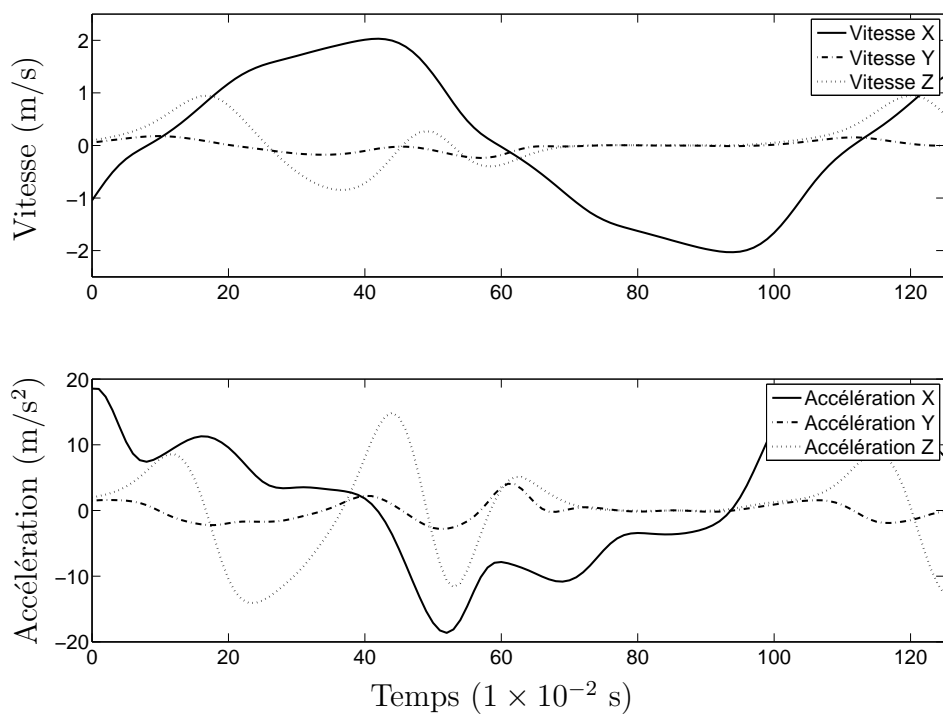


FIG. B.2 – Évolution des vitesses et accélérations de la plate-forme gauche.

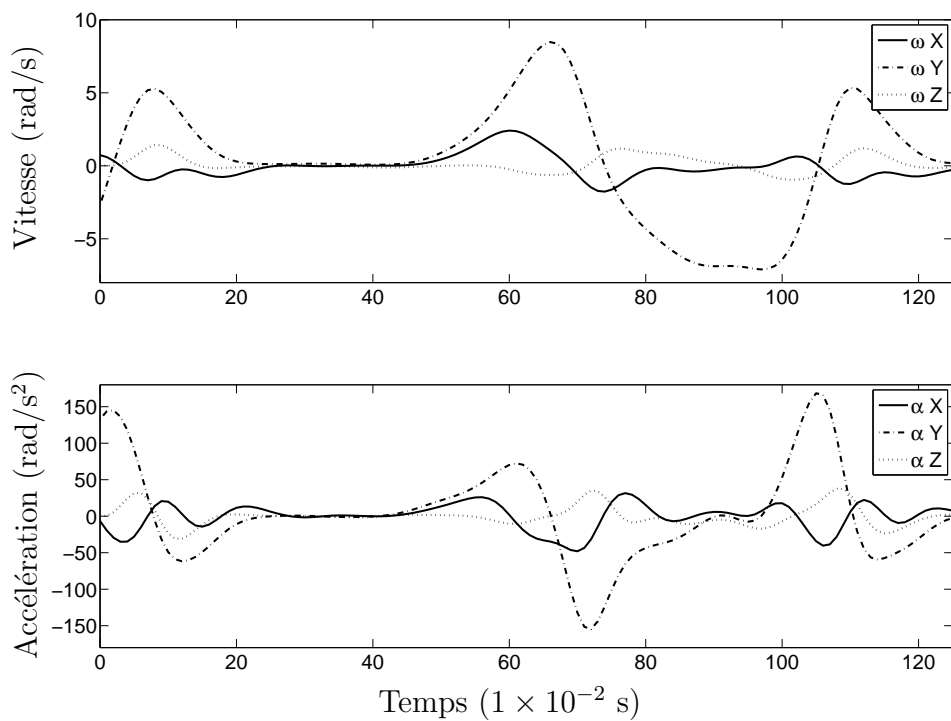


FIG. B.3 – Évolution des vitesses et accélérations angulaires de la plate-forme droite.

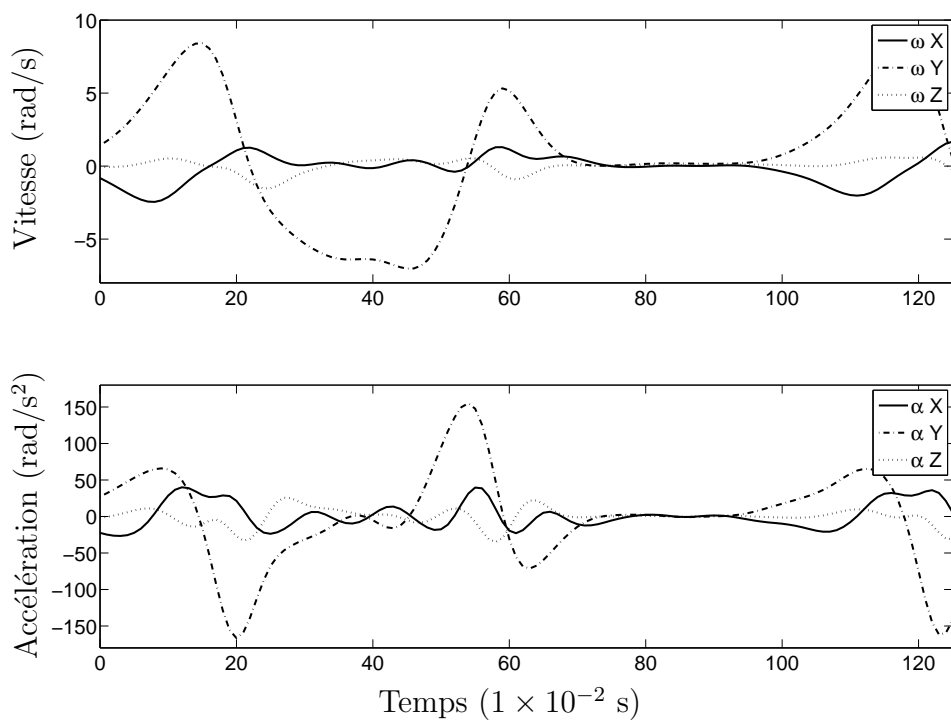


FIG. B.4 – Évolution des vitesses et accélérations angulaires de la plate-forme gauche.

L'utilisation de ce type de courbe a permis de modifier l'évolution angulaire initiale (données du CIRRIS) vers une évolution atteignant un maximum d'environ 45 degrés en tangage au lieu d'environ 68 degrés. Vu la nature même des splines cubiques soit de permettre une connection du troisième degré au point commun entre deux segments de cette nouvelle courbe, une nouvelle évolution pour l'angle θ a été créée en se basant sur la courbe initiale.

De cette manière, les sauts de valeurs tant pour la juxtaposition de cette nouvelle portion de courbe sur celle initiale de la position angulaire selon θ que pour les vitesses angulaires et les accélérations angulaires ont été minimisés. Ainsi, les courbes grises illustrées aux figures 2.16 et 2.18 ont été obtenues en recalculant une trajectoire lorsque la valeur de θ était plus élevée que zéro ($\theta > 0^\circ$). Ensuite, en modifiant l'évolution de l'angle θ des données du CIRRIS, il est requis de recalculer l'évolution des vitesses angulaires et des accélérations angulaires pour conserver les relations physiques liant ce type de mouvement. En ce sens, ces nouvelles valeurs ont été déterminées, pour les portions des courbes modifiées, à l'aide des équations suivantes :

$$\boldsymbol{\omega} = \mathbf{S} \frac{d\boldsymbol{\theta}}{dt} \quad (\text{B.4})$$

où $\boldsymbol{\theta}$ est le vecteur contenant l'évolution des trois angles d'Euler nécessaires pour définir l'orientation d'un pied et \mathbf{S} est une matrice carrée formée comme suit :

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{e}_1 & \mathbf{Q}_1 \mathbf{e}_2 & \mathbf{Q}_1 \mathbf{Q}_2 \mathbf{e}_3 \end{bmatrix} \quad (\text{B.5})$$

où \mathbf{e}_i est le vecteur unitaire suivant l'axe de rotation relatif aux triplets d'angles d'Euler et \mathbf{Q}_i est la matrice de rotation pure autour de ces trois vecteurs unitaires.

Ensuite, les nouvelles valeurs des accélérations angulaires sont calculées de la manière suivante :

$$\boldsymbol{\alpha} = \dot{\boldsymbol{\omega}} = \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \quad (\text{B.6})$$

Finalement, les graphiques représentant les courbes modifiées des trajectoires de vitesse angulaire et d'accélération angulaire sont présentés aux figures B.5 et B.6. Ces graphiques comportent les correspondances physiques propres à un mouvement de rotation réel d'un corps solide et ils concordent parfaitement aux figures B.3 et B.4, sauf à l'intérieur des segments corrigés à partir de l'utilisation des splines cubiques lors de la modification de l'évolution des déplacements angulaires de l'angle θ . Il est possible de

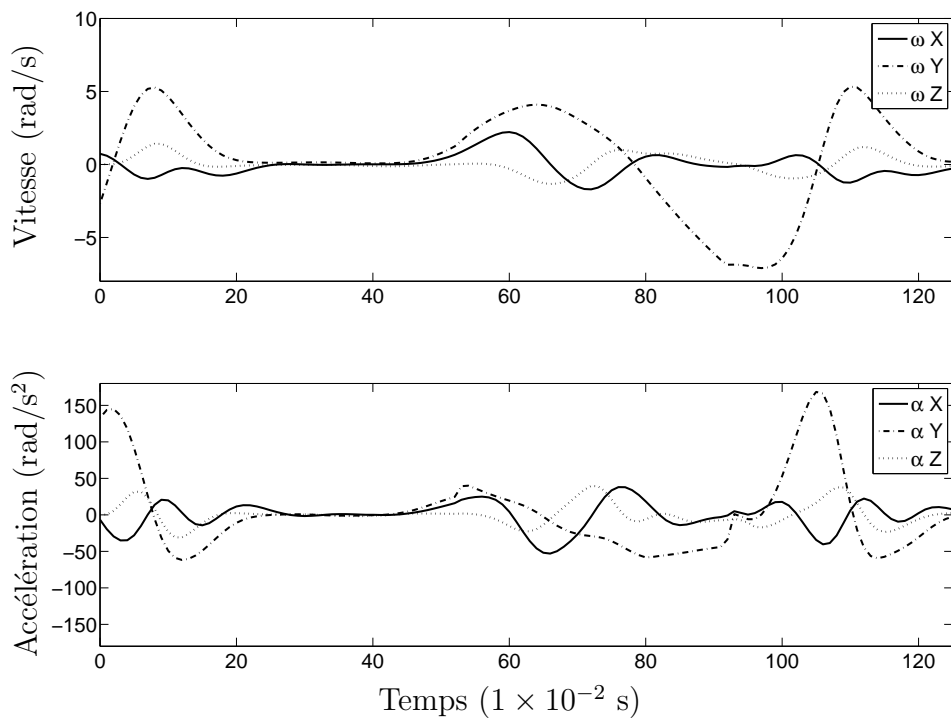


FIG. B.5 – Évolution modifiée des vitesses et des accélérations angulaires de la plateforme droite.

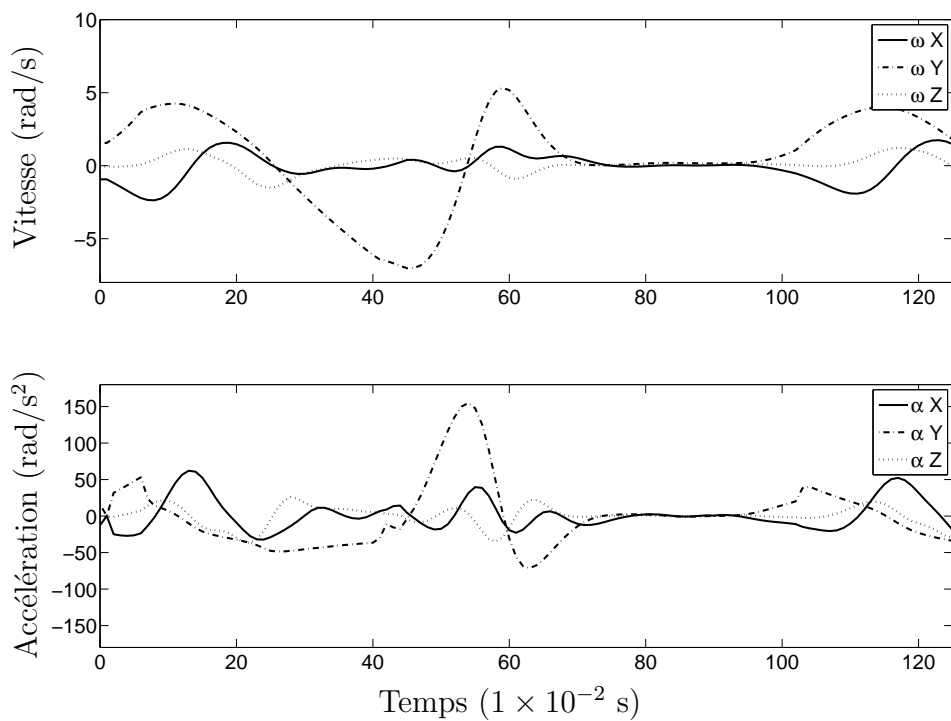


FIG. B.6 – Évolution modifiée des vitesses et des accélérations angulaires de la plateforme gauche.

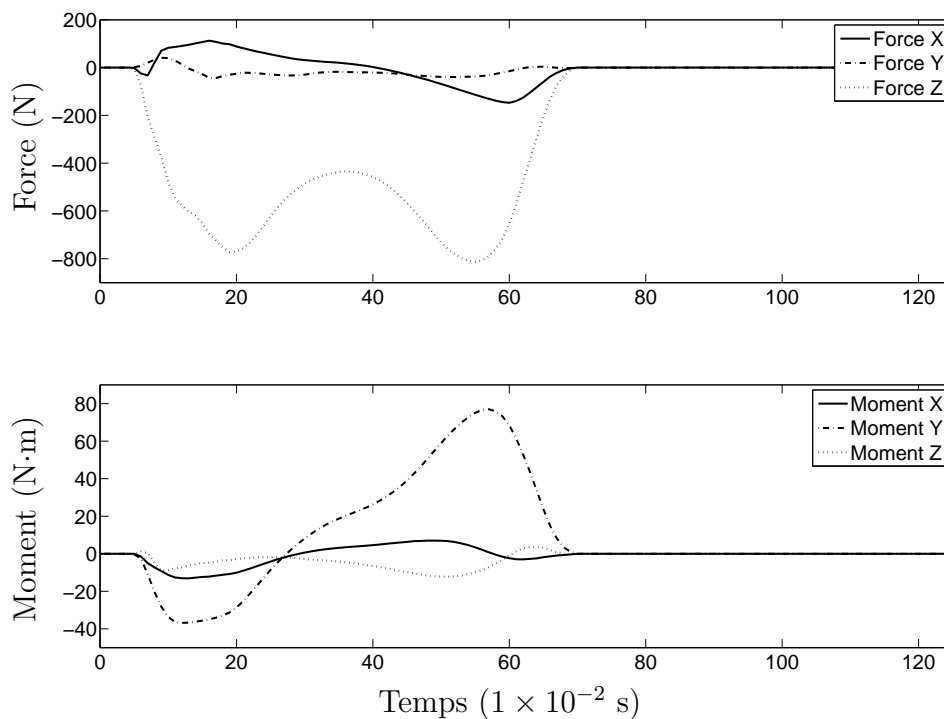


FIG. B.7 – Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme droite par l'utilisateur.

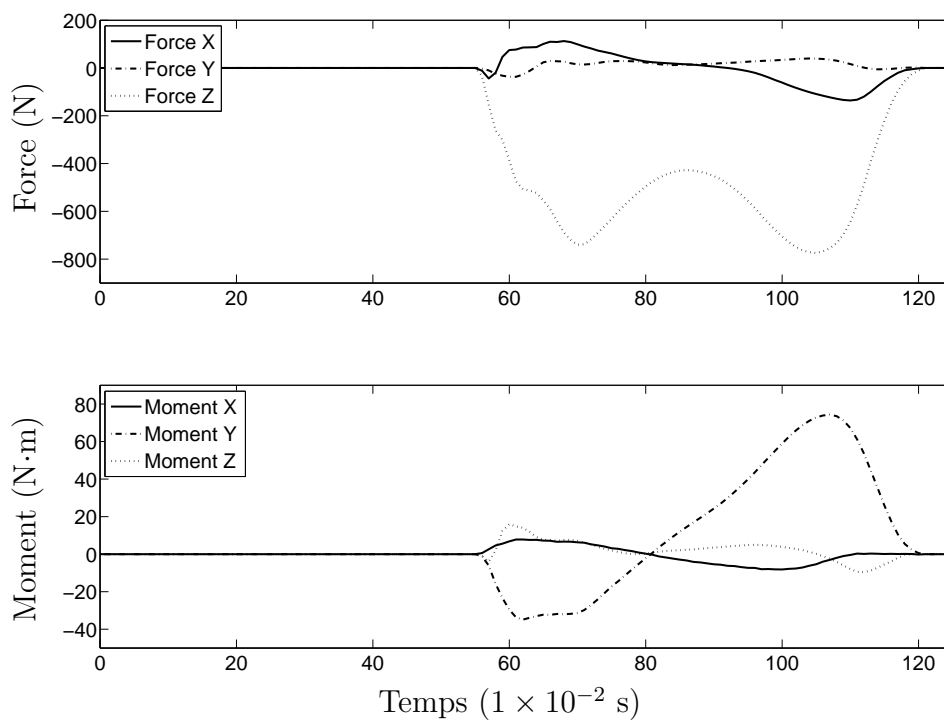


FIG. B.8 – Évolution des efforts cartésiens appliqués à la plate-forme gauche par l'utilisateur.

se référer aux figures 2.16 et 2.18 pour connaître les moments (position dans le temps) où les splines cubiques remplacent l'évolution naturelle de l'angle θ soit lorsque $\theta > 0^\circ$.

Pour terminer la présentation des données nécessaires à l'élaboration complète d'une trajectoire typique de la démarche humaine, les graphiques représentant l'évolution du torseur lié aux efforts ressentis au sol et appliqués par un individu sont illustrés à l'aide des figures B.7 et B.8. Ces derniers graphiques démontrent que les efforts perçus au sol lors de la marche réelle ont naturellement lieu lors de la phase de support d'un pied et non lors de sa phase de balancement aérien. De plus, il y est remarqué que la force selon l'axe Z est celle prédominante, car elle atteint les amplitudes les plus élevées. Ceci est dû au fait qu'elle correspond à l'appui de la majorité du poids de la personne à la surface porteuse. Aussi, il est noté que le moment contenant les valeurs les plus élevées correspond à celui autour de l'axe Y. Cette observation est explicable vu le déplacement du centre de pression du pied (point auquel les efforts sont concentrés lors de la marche et dont le déplacement passe du talon aux orteils lors de la phase de support au sol du pied), ce qui engendre une évolution du moment appliqué au centre de masse du pied (soit la position du repère mobile \mathbf{O}' dans le cadre de ce projet).

Annexe C

Graphiques liés aux interférences du mécanisme final

Cette annexe présente les graphiques illustrant l'ensemble des croisements décelés au sein du mécanisme solution. L'observation de ces figures permet entre autres de visualiser le déroulement du phénomène de contact entre deux entités et de vérifier le type de croisement soit celui qualifié de *léger* ou celui qualifié de *sévère*. De plus, une description détaillée est proposée pour chaque croisement de chacune des paires d'entités montrées.

Dans le cadre de cette étude, un mécanisme parallèle entraîné à l'aide de huit câbles a été sélectionné pour servir de base mécanique à la conception d'une interface de locomotion. Le choix de cette solution est basé sur la qualité des résultats obtenus vis-à-vis la totalité des outils d'analyse. Cependant, au niveau de la détection des interférences, bien que cette architecture comporte un niveau d'évitement des contacts quasiment parfait, il existe quand même des situations où certaines poses d'une ou des deux plates-formes engendrent l'apparition de contacts réels entre certaines de leurs entités.

Les sections qui suivent permettront de mettre en évidence ces différents contacts qui ont lieu lors de deux des quatre parcours utilisés pour évaluer les mécanismes soient la trajectoire de la marche et celle qualifiée d'*exigeante*.

C.1 Interférences liées à la trajectoire de marche

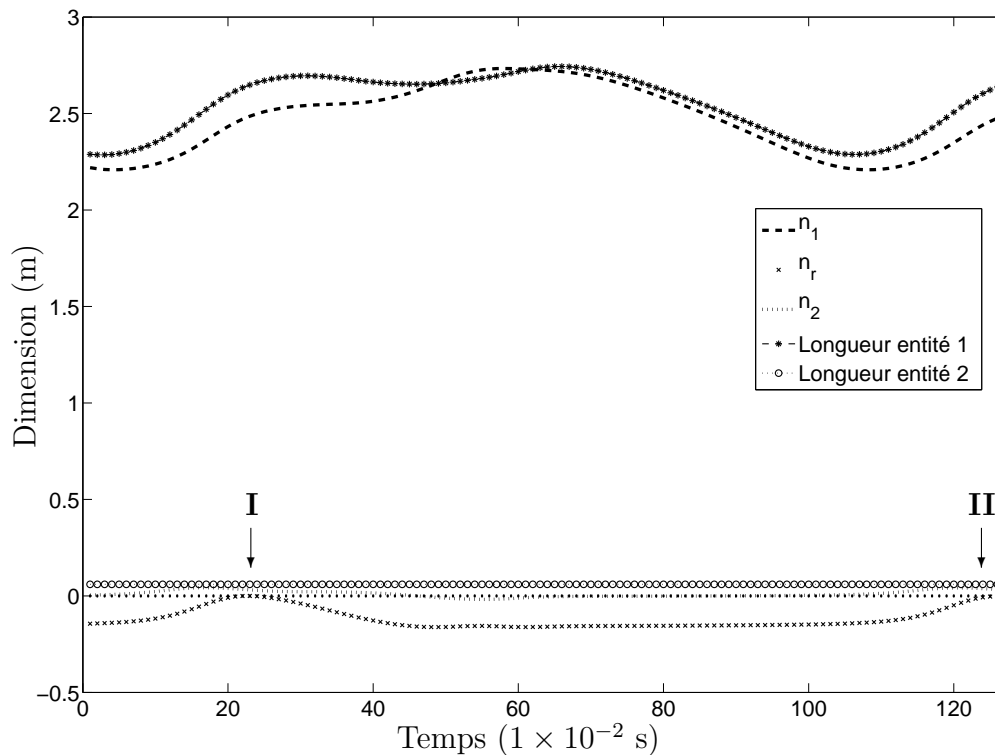


FIG. C.1 – Interférences de la paire d'entités 4-20 de la plate-forme gauche.

Le mécanisme final présente quatre contacts différents lors de cette trajectoire. Ces contacts ont tous lieu au sein du sous-ensemble de la plate-forme gauche et plus précé-

sément, ils apparaissent entre le câble 4 et une arête de la plaque de support du pied (entité 20) de l'effecteur. La figure C.1 illustre ce phénomène en montrant l'évolution des différentes variables servant à déterminer la présence d'un contact. Donc, il y est observé que ces quatre contacts se résultent en la présence de deux moments d'interférence soient au temps 22-23-24 (1×10^{-2} s) (sous l'indice **I**) et au temps 126 (sous l'indice **II**). De plus, il est décelé que ces deux croisements sont de type *léger*, car la valeur de la variable n_r (voir section 2.2.2) approche la valeur nulle tout en demeurant d'un seul et même côté de l'axe Y (ordonnée à l'origine).

C.2 Interférences liées à la trajectoire *exigeante*

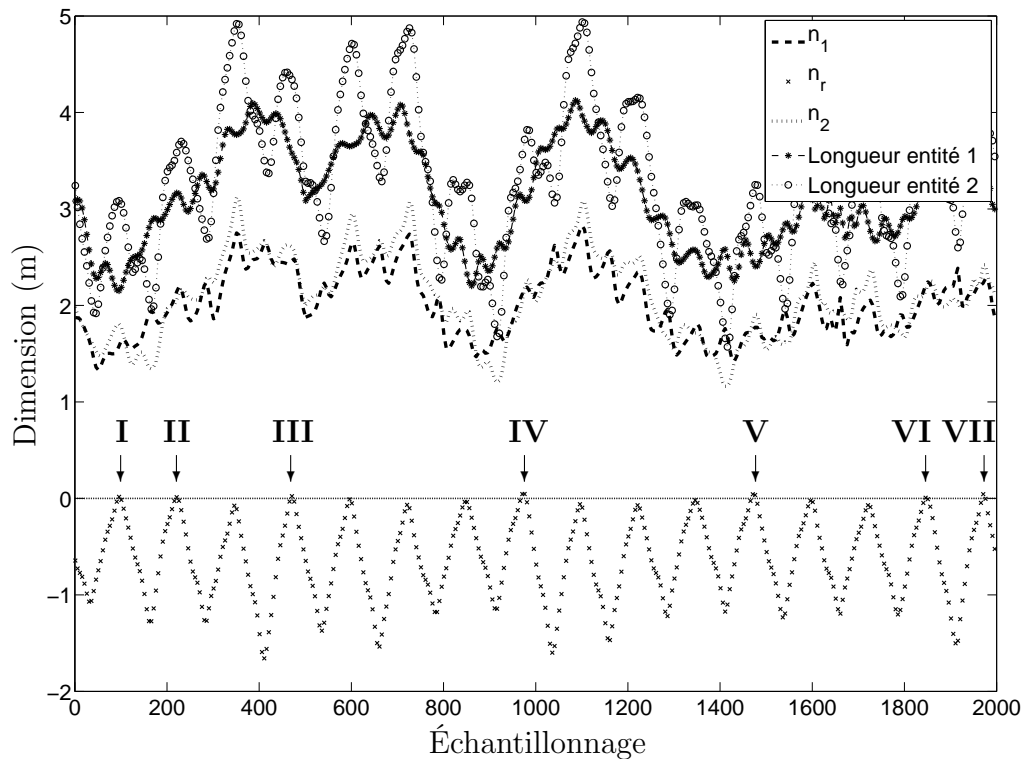


FIG. C.2 – Interférences de la paire d'entités 2-6 de la plate-forme droite.

La deuxième trajectoire contenant des interférences est celle qualifiée d'*exigeante* (voir la section 2.2.2.2). Celle-ci a engendré des contacts mécaniques à l'intérieur du sous-ensemble du mécanisme droit ainsi qu'au sein de celui de gauche. Tout d'abord, les résultats comportant le sous-ensemble droit sont analysés.

Ainsi, la figure C.2 présente les interférences observées entre le câble 2 et le câble 6

de la plate-forme droite lors de cette trajectoire. Au total, il y sept croisements distincts qui apparaissent à des moments différents au cours de ce trajet et ils sont tous analysés ci-dessous :

- la première interférence (indice **I**) a lieu au temps 93 jusqu’au temps 100 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,018 m ;
- la deuxième interférence (indice **II**) a lieu au temps 218 jusqu’au temps 224 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,014 m ;
- la troisième interférence (indice **III**) a lieu au temps 467 jusqu’au temps 474 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,023 m ;
- la quatrième interférence (indice **IV**) a lieu au temps 967 jusqu’au temps 979 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,056 m ;
- la cinquième interférence (indice **V**) a lieu au temps 1 467 jusqu’au temps 1 478 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,050 m ;
- la sixième interférence (indice **VI**) a lieu au temps 1 844 jusqu’au temps 1 850 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,010 m ;
- la septième interférence (indice **VII**) a lieu au temps 1 968 jusqu’au temps 1 975 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,048 m.

Il faut ajouter que l’ensemble de ces interférences peuvent être qualifiées de *sévères*, car il va de soi qu’aussitôt que la valeur de n_r change de signe, il y a une répercussion ressentie au niveau de l’orientation du câble et donc le parfait contrôle de la plate-forme n’est plus assuré.

Ensuite, la figure C.3 montre l’évolution des différentes variables liées à l’interaction entre le câble 4 et une arête de la plaque de support au pied de la plate-forme droite (entité 20). Ce graphique ne contient qu’un seul croisement et celui-ci a lieu au temps 329 à 331. Ce croisement est de l’ordre du millimètre (environ 0,001 m) et il peut être supposé comme étant *léger*.

La figure C.4 présente l’interaction entre le câble 6 et le câble 7 de la plate-forme droite lors de la trajectoire *exigeante*. Tel que le précédent, ce graphique ne contient qu’un seul croisement. Celui-ci a lieu au temps 854 jusqu’au temps 858 et il comporte une distance de croisement d’environ 0,005 m. Enfin, cette interférence est tout de même qualifiée de *sévère*.

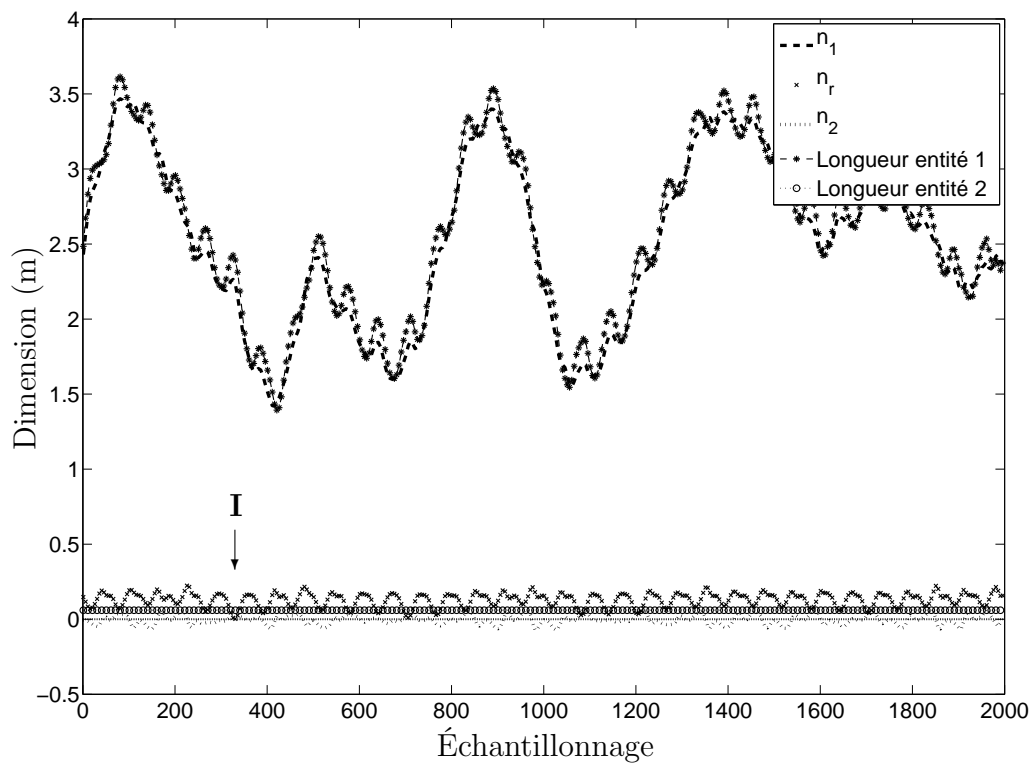


FIG. C.3 – Interférence de la paire d’entités 4-20 de la plate-forme droite.

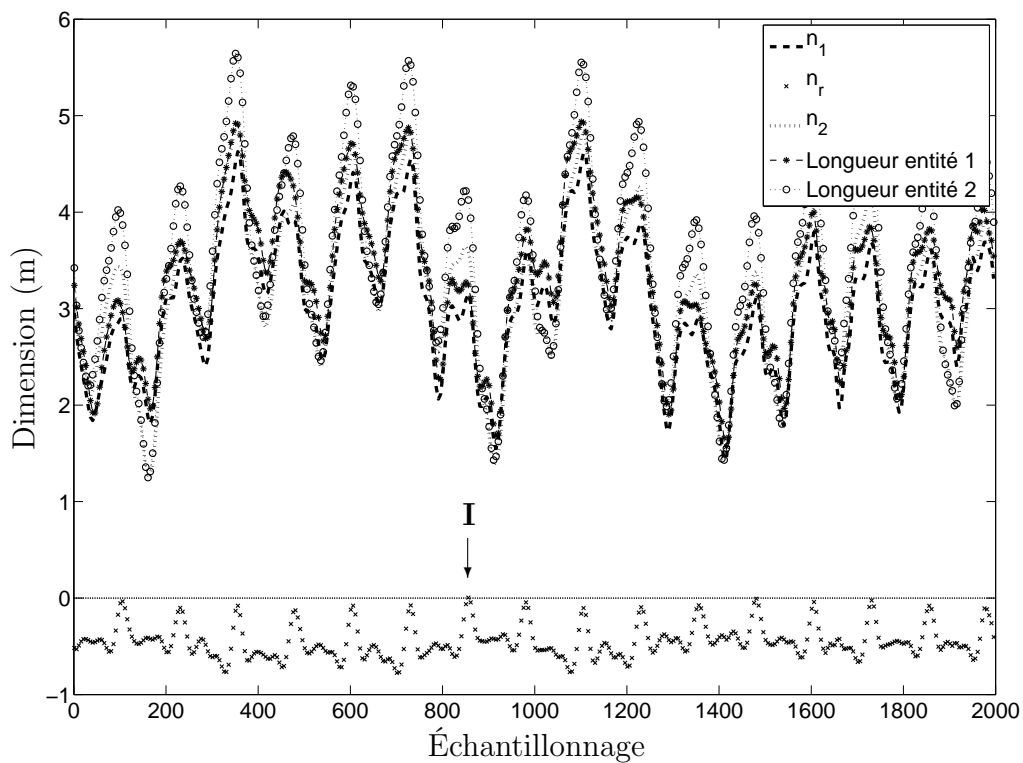


FIG. C.4 – Interférence de la paire d’entités 6-7 de la plate-forme droite.

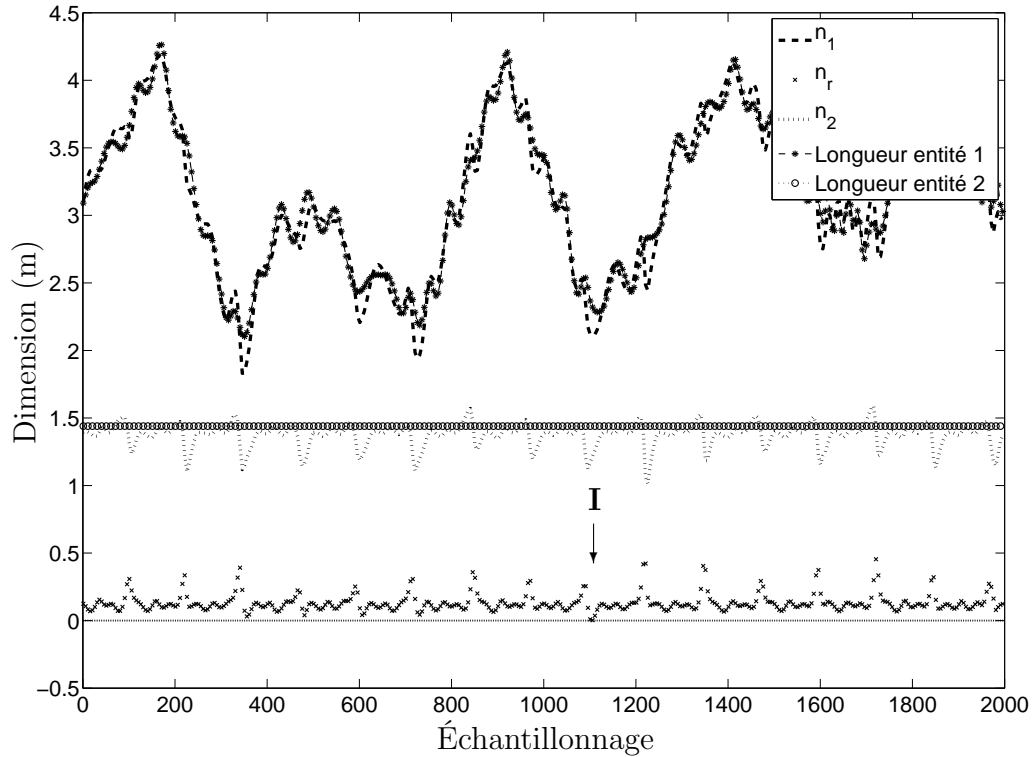


FIG. C.5 – Interférence de la paire d’entités 1-10 de la plate-forme droite.

Finalement, la figure C.5 démontre l’évolution des variables de détection des interférences entre le câble 1 et une arête de la tige de l’effecteur de la plate-forme droite (entité 10). Ces courbes présument l’apparition d’un seul croisement et celui-ci a lieu au temps 1 102 à 1 106. La distance de dépassement est similaire à celle de la combinaison d’entité précédente soit d’environ 0,005 m et cette interférence est donc qualifiée de *sévère*.

Maintenant que les interférences engendrées à l’intérieur du sous-groupe de la plate-forme droite ont été décrites, les prochains graphiques illustreront celles reliées au sous-groupe gauche. Ainsi, la figure C.6 propose les différents croisements observés entre la paire d’entité formée par le câble 2 et le câble 6. Il y a un total de sept interférences et chacune d’entre elles est décrite ci-dessous :

- la première interférence (indice **I**) a lieu au temps 153 jusqu’au temps 168 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,085 m ;
- la deuxième interférence (indice **II**) a lieu au temps 905 jusqu’au temps 917 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,040 m ;
- la troisième interférence (indice **III**) a lieu au temps 1 032 jusqu’au temps 1 037

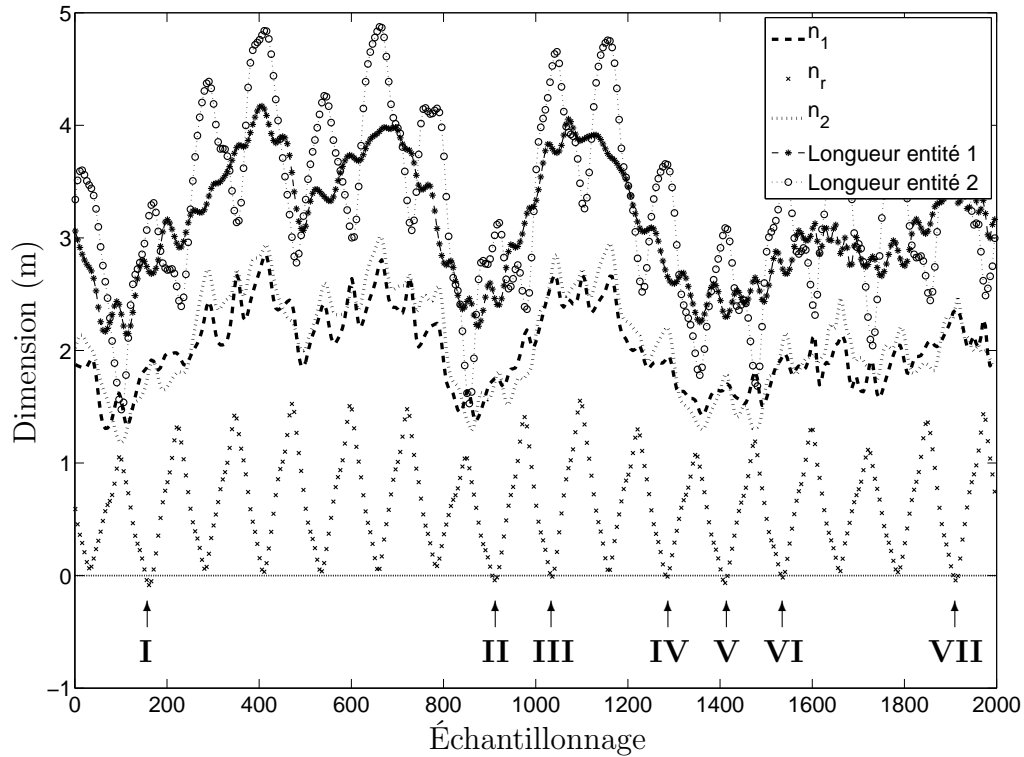


FIG. C.6 – Interférences de la paire d’entités 2-6 de la plate-forme gauche.

- et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,010 m ;
- la quatrième interférence (indice **IV**) a lieu au temps 1 281 jusqu’au temps 1 287 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,015 m ;
- la cinquième interférence (indice **V**) a lieu au temps 1 403 jusqu’au temps 1 416 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,070 m ;
- la sixième interférence (indice **VI**) a lieu au temps 1 532 jusqu’au temps 1 539 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,018 m ;
- la septième interférence (indice **VII**) a lieu au temps 1 906 jusqu’au temps 1 916 et elle présente un croisement atteignant une distance d’environ 0,045 m.

Il est noté que toutes ces interférences peuvent être qualifiées de *sévères*, car elles entraîneraient une perte significative de la précision du contrôle des plates-formes.

Ensuite, la figure C.7 montre l’évolution de l’interaction entre le câble 1 et le câble 4 de la plate-forme gauche. Il y a deux croisements observés lors de la trajectoire et ils se produisent au temps 225 et au temps 1 352 à 1 353. Le premier (indice **I**) propose une distance de contact d’environ 0,008 m (interférence *sévère*) qui devient rapidement virtuel vu que la distance n_2 devient plus élevée que la longueur physique de l’entité 2.

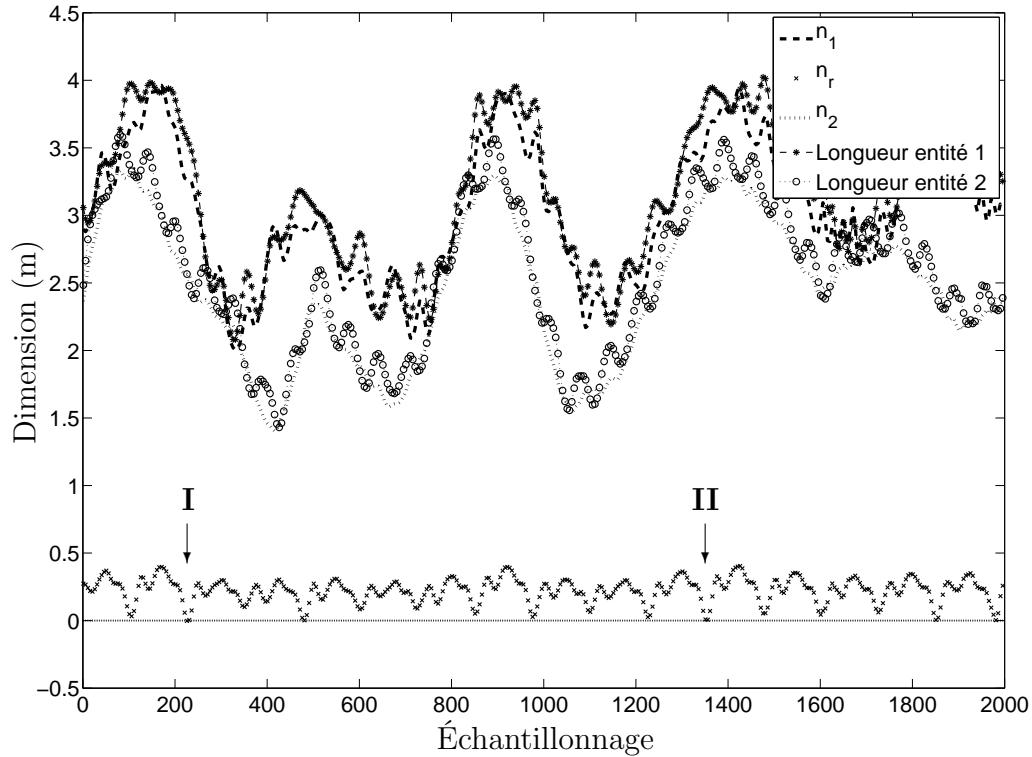


FIG. C.7 – Interférences de la paire d’entités 1-4 de la plate-forme gauche.

La seconde interférence (indice **II**) en est une de type *léger* et elle devient aussi virtuelle lorsque la valeur de n_2 dépasse celle de la longueur physique de l’entité 2.

La figure C.8 propose quant à elle l’évolution des variables en ce qui a trait à la combinaison du câble 1 avec une arête de la tige soit l’entité 10. De manière similaire à l’analyse précédente, il y a deux lieux de croisement entre ces entités et ils apparaissent au temps 412 à 421 et au temps 663 à 673. Les distances de contact associées atteignent des valeurs d’environ 0,025 m dans le premier cas (indice **I**) et d’environ 0,040 m dans le deuxième cas (indice **II**). Il va de soi que ces deux interférences peuvent être qualifiées comme étant de type *sévère*.

Enfin, la dernière figure (figure C.9) représente la seule interférence apparaissant lors de la vérification de l’interaction entre le câble 6 et le câble 7 de la plate-forme gauche lors de la trajectoire *exigeante*. Ce croisement, présent sous l’indice **I**, est considéré de type *léger*, car il comporte une distance de contact de l’ordre du millimètre soit d’environ 0,001 m.

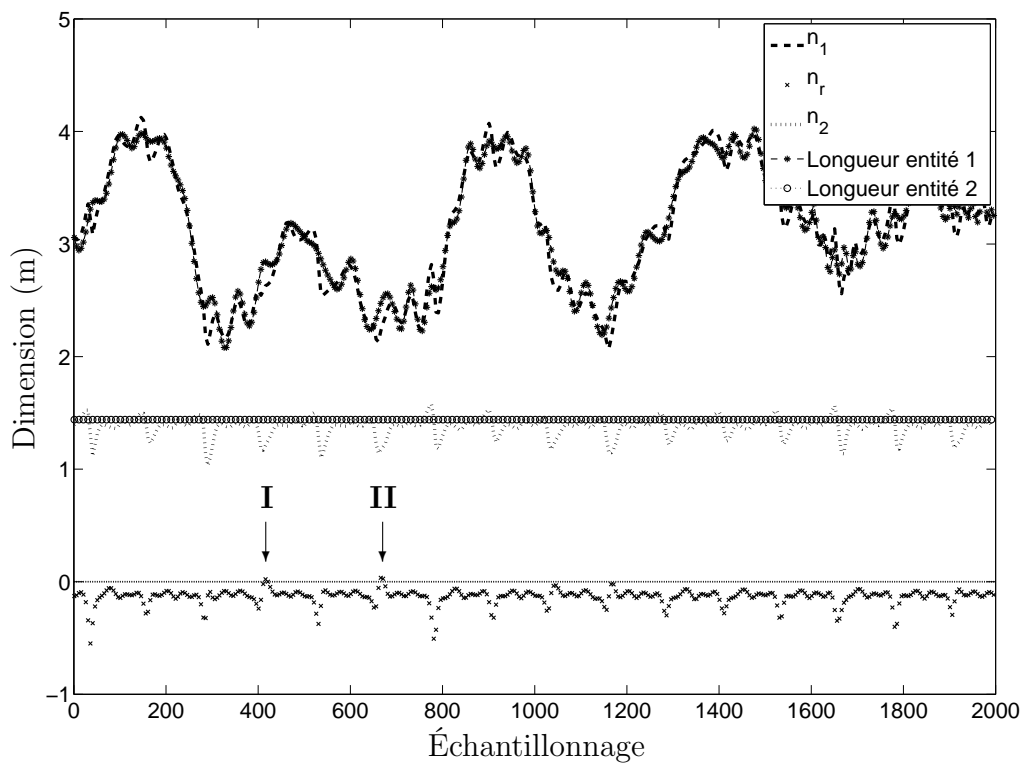


FIG. C.8 – Interférences de la paire d’entités 1-10 de la plate-forme gauche.

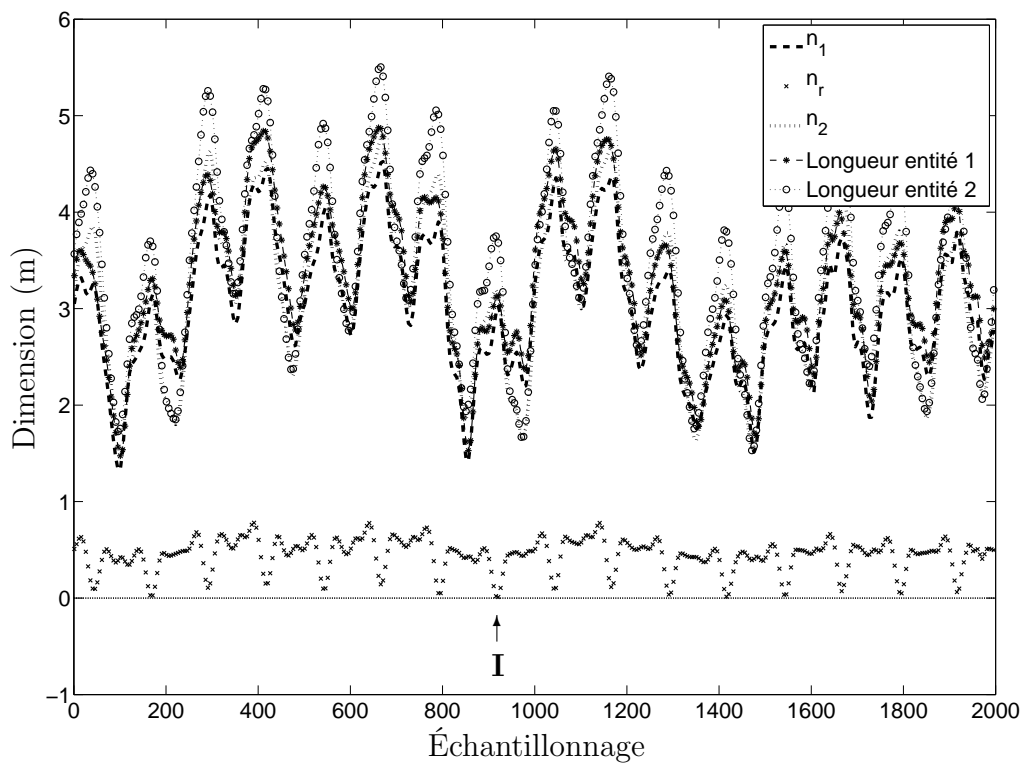


FIG. C.9 – Interférence de la paire d’entités 6-7 de la plate-forme gauche.

Annexe D

Résultats complémentaires

Cette annexe contient une présentation de l'évolution des coordonnées, des vitesses et des accélérations articulaires du mécanisme final de cette étude lors de la trajectoire modifiée simulant une démarche humaine. Ces résultats ont été déterminés à partir des équations établies au sein de ce mémoire.

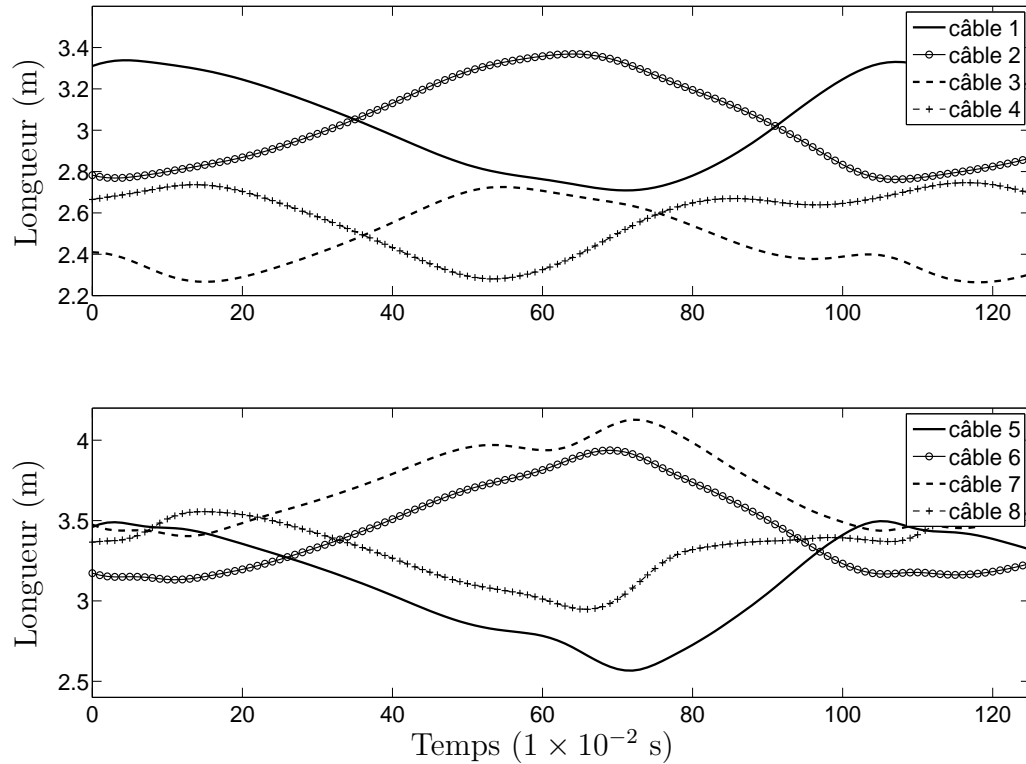


FIG. D.1 – Évolution des coordonnées articulaires de la plate-forme droite.

Les chapitres 2 et 4 de ce mémoire ont présenté les équations permettant de déterminer l'évolution des résultats articulaires liés à la cinématique des mécanismes parallèles entraînés à l'aide de câbles. En guise de rappel, les équations (2.8) (ou (4.1)), (4.16) et (4.24) permettent de calculer respectivement les valeurs des longueurs articulaires, des vitesses articulaires et des accélérations articulaires lorsque ces mêmes variables sont connues dans le domaine cartésien.

Dans le cadre d'une simulation de la démarche humaine à l'aide du mécanisme solution de cette étude, les graphiques suivants illustrent les évolutions articulaires étant liés aux résultats présentés au sein du chapitre 4.

Les figures D.1 et D.2 montrent l'évolution suivie par la longueur des huit câbles de chacune des deux plates-formes de marche (droite et gauche respectivement) pour exécuter la trajectoire imposée. Bien entendu, une diminution de la longueur d'un câble représente son enroulement autour de la bobine associée à son système d'entraînement et une augmentation représente son déroulement. De plus, il peut être observé que les variations de longueur sont plus importantes pour les câbles 5-6-7-8 de chaque plate-

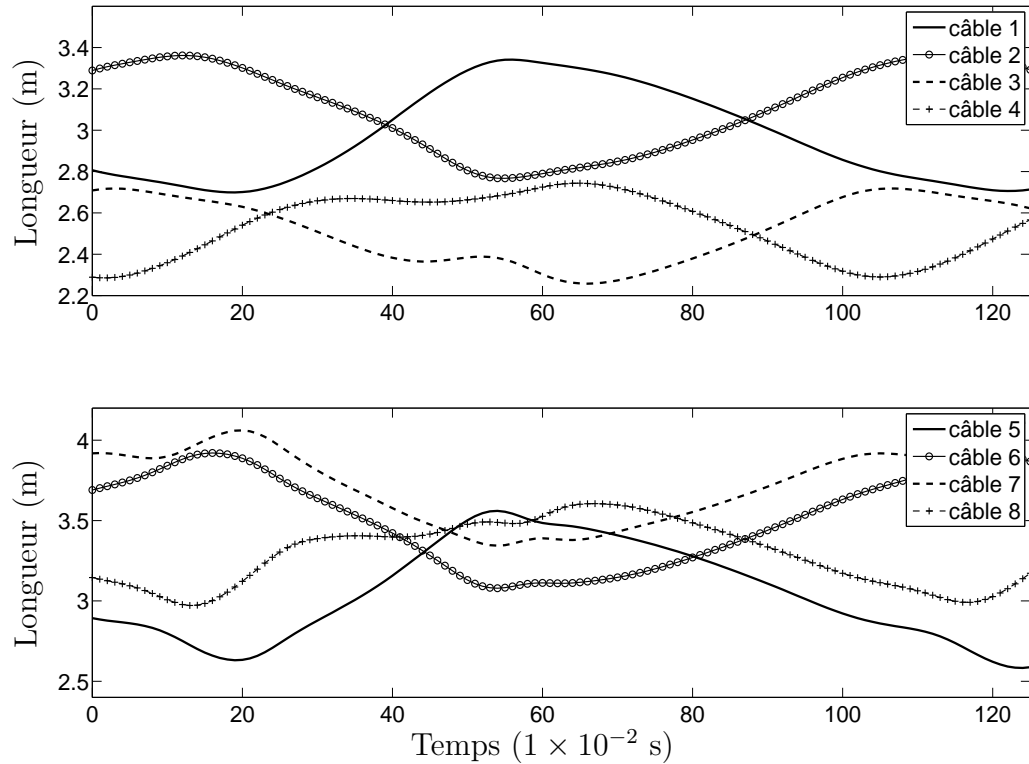


FIG. D.2 – Évolution des coordonnées articulaires de la plate-forme gauche.

forme que les câbles 1-2-3-4. Ceci s'explique par le fait que les câbles 5-6-7-8 sont situés à l'extrémité opposée de la plate-forme par rapport à la position des pieds et qu'ils subissent naturellement des débattements de plus grandes amplitudes que ceux des câbles attachés à proximité des pieds.

Ensuite, les figures D.3 et D.4 illustrent l'évolution des vitesses articulaires des câbles des deux plates-formes. Les variations de vitesse y sont plus prononcées pour les câbles situés à l'extrémité des plates-formes soient les câbles 5-6-7-8.

Enfin, les figures D.5 et D.6 démontrent l'évolution des accélérations articulaires du système complet, soient les huit câbles de la plate-forme droite et les huit câbles de la plate-forme gauche. Ces courbes illustrent, encore une fois, que les câbles 5-6-7-8 contiennent des variations d'amplitude au niveau des accélérations plus élevées que celles proposées par les câbles 1-2-3-4.

Finalement, en analysant l'ensemble de ces graphiques, il est remarqué que ces courbes représentent bien la physique du phénomène en question, celui d'une démarche

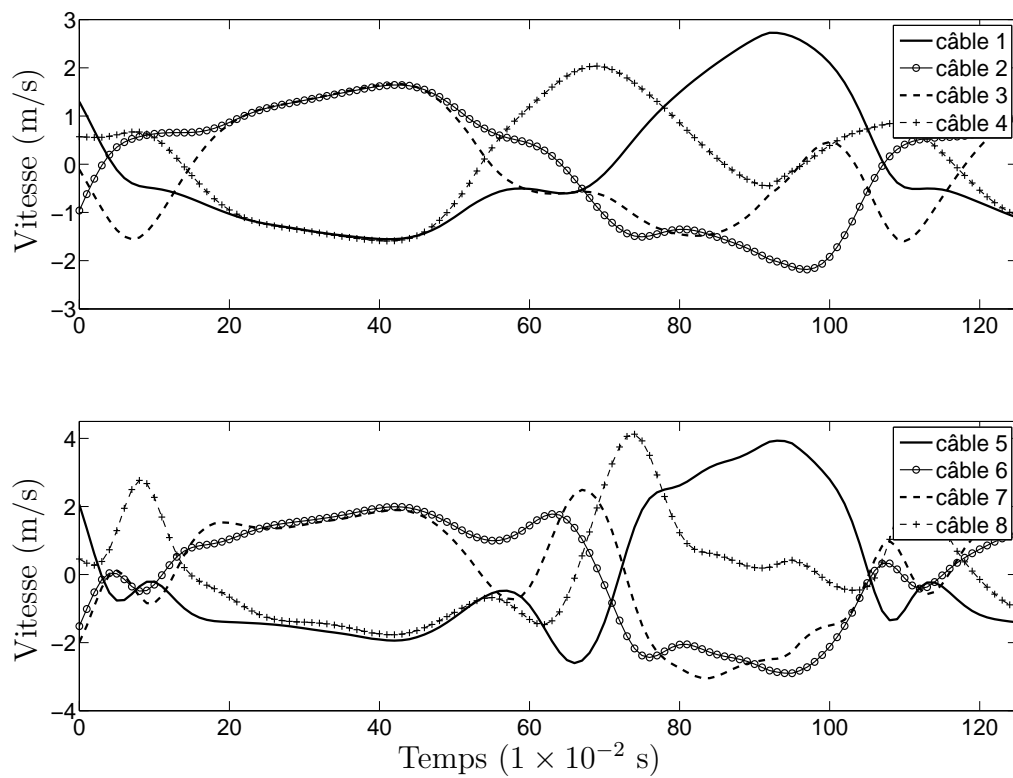


FIG. D.3 – Évolution des vitesses articulaires de la plate-forme droite.

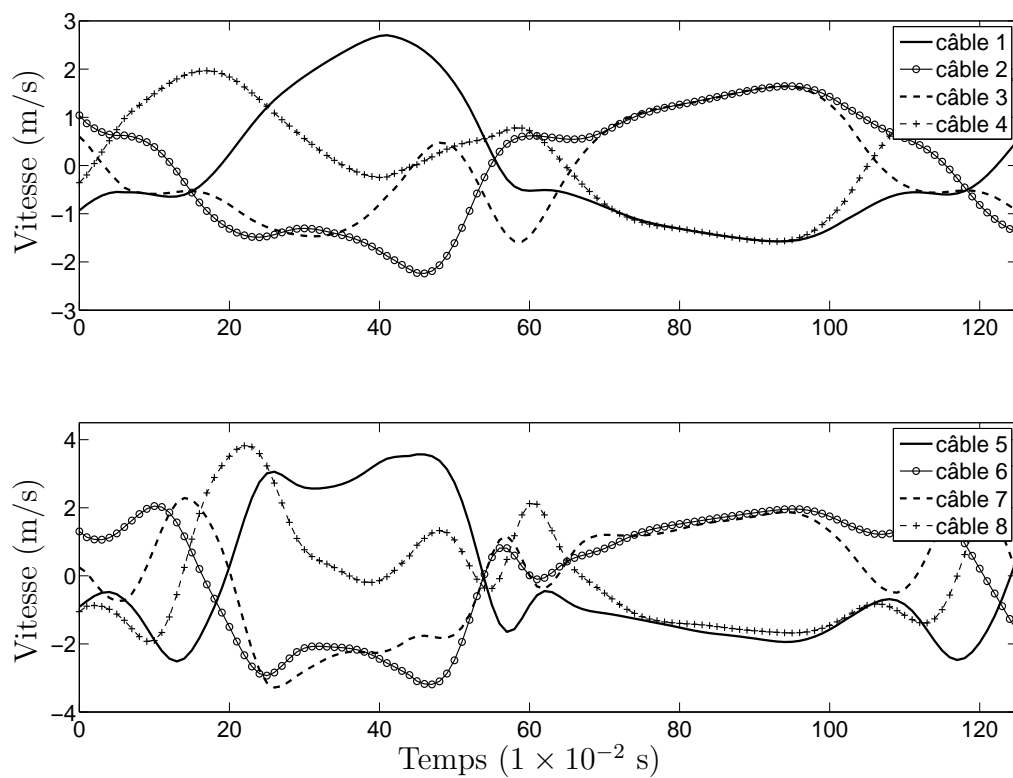


FIG. D.4 – Évolution des vitesses articulaires de la plate-forme gauche.

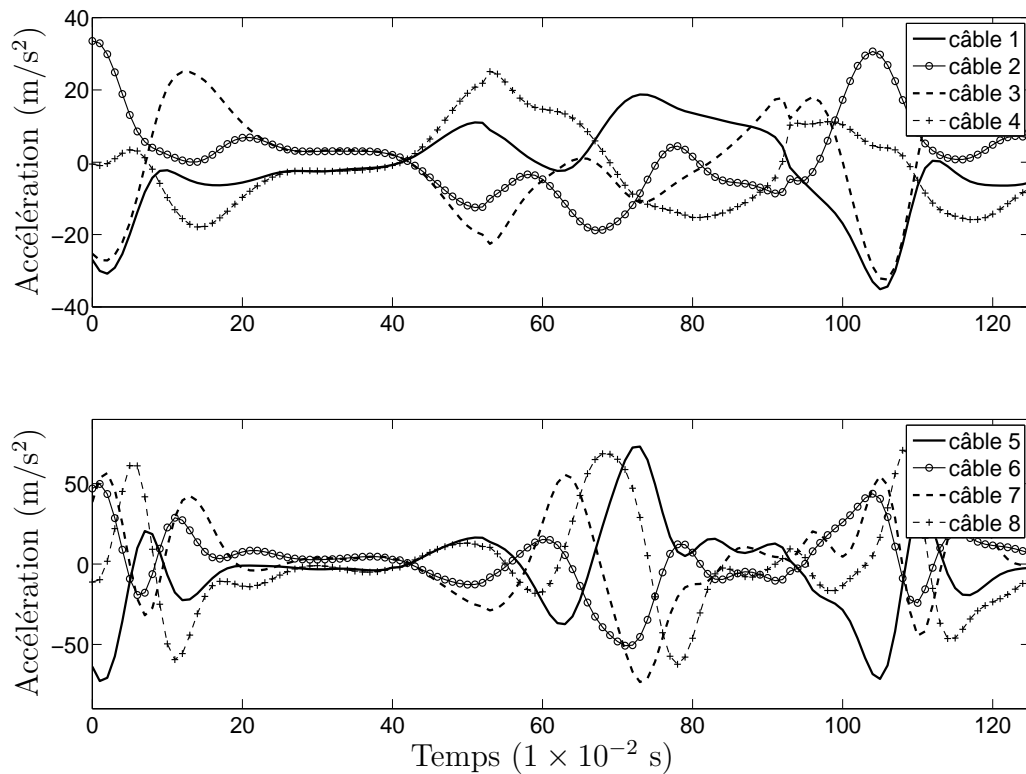


FIG. D.5 – Évolution des accélérations articulaires de la plate-forme droite.

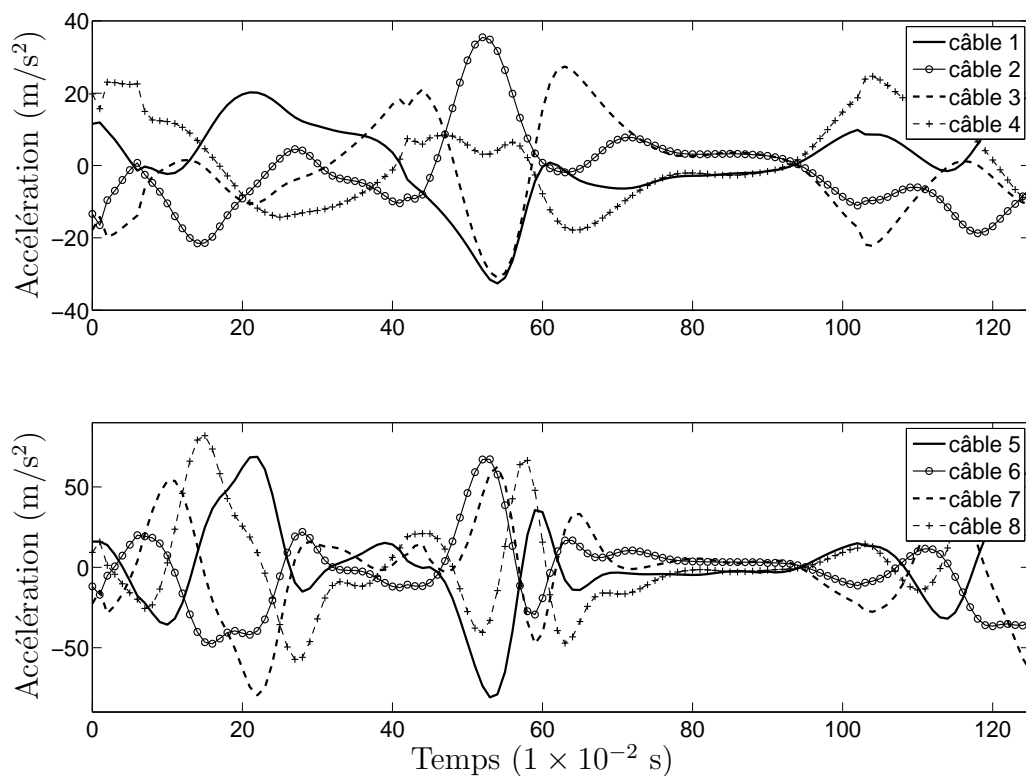


FIG. D.6 – Évolution des accélérations articulaires de la plate-forme gauche.

humaine appliquée au mécanisme solution de cette étude. De plus, les liens physiques devant être présents entre les courbes des positions articulaires versus celles des vitesses articulaires et entre les courbes des vitesses articulaires et celles des accélérations articulaires sont observés. Cette dernière affirmation aide à prouver que ces résultats sont exacts. Finalement, certaines variations brusques peuvent être remarquées au niveau des courbes d'accélération. Ces dernières sont dues aux légères imperfections présentes lors du passage des données de la marche du CIRRIS à celles reconstituées à partir de l'utilisation des splines cubiques (voir annexe B).