

RÉGIS POULIN

**ARCHITECTURE ET COMMANDE D'UNE  
INTERFACE DE LOCOMOTION UTILISANT UN  
MÉCANISME PARALLÈLE ENTRAÎNÉ À L'AIDE  
DE CÂBLES**

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

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE  
UNIVERSITÉ LAVAL  
QUÉBEC

DÉCEMBRE 2005

## Résumé

Ce mémoire présente le développement de l'architecture et des algorithmes de commande d'une interface de locomotion utilisant un mécanisme parallèle à câbles. Cette interface de locomotion permet d'améliorer l'expérience de la réalité virtuelle en recréant la topologie du monde virtuel. Tout d'abord, une revue de littérature sur les interfaces de locomotion est présentée. Par la suite, l'architecture globale du système est présentée. Les définitions de base sous-jacentes à la compréhension des algorithmes de commande ainsi que l'analyse cinématique du mécanisme sont ensuite présentées. L'architecture logicielle et les algorithmes de commande sont enfin présentés. Des améliorations au point de vue des mécanismes à câbles sont aussi présentées. Ces améliorations permettent d'améliorer la précision de la commande en position des mécanismes à câbles. Enfin, les résultats présentent l'aboutissement des travaux en montrant le fonctionnement d'un prototype à trois degrés de liberté de l'interface de locomotion réalisé.

## **Avant-Propos**

Tout d'abord, je tiens à remercier les professeurs Denis Laurendeau et Clément Gosselin quant à l'initiative du projet. Je tiens aussi à les remercier pour leur soutien technique et pour la confiance qu'ils ont eu en moi pour l'atteinte des objectifs du projet.

Je voudrais souligner le travail exceptionnel des professionnels de recherche du laboratoire de vision et systèmes numériques de l'université Laval, Sylvain Comptois et Denis Ouellet ainsi que ceux du laboratoire de robotique, Simon Foucalt, Boris Mayer-St-Onge, et particulièrement Thierry Laliberté pour sa disponibilité et son expertise.

Je voudrais également souligner l'apport de Benoît Cantin et de Marc Gouttefarde pour l'accomplissement de leurs travaux qui ont été préalables à ce projet.

Je voudrais remercier le CRSNG ainsi que le RDDC pour leur soutien financier et, plus particulièrement le Dr. Lochlan Magee. Je tiens à remercier aussi le CIRRIIS pour son appui au projet.

Je voudrais remercier diverses autres personnes pour leur apport au niveau technique : le Dr. Brad McFadyen, Émilie Sabrié, Éric Boivin, Samuel Bouchard, Pierre-Luc Richard et Martin Otis.

Je voudrais te remercier, Isabelle, pour ton support moral, ta disponibilité et ton aide à tous les niveaux.

Enfin, je voudrais remercier tous mes collègues et par surcroît amis, Stéphane Drouin, Jeff Lalonde, Marc Dubreuil, Jeff Dupuis, Mathieu Goulet, Richard Drouin, Éric Samson, Éric Boivin et Fred Bourgoin. Finalement, je voudrais remercier mes parents, mon frère et mes amis.

«...try not, do or do not, there is no try.»

Yoda, George Lucas

# Table des matières

<b>Résumé.....</b>	<b>ii</b>
<b>Avant-Propos.....</b>	<b>iii</b>
<b>Table des matières .....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>x</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>12</b>
Problématique .....	12
Application.....	13
Solution proposée .....	13
Objectifs.....	14
Méthodologie .....	14
Structure du mémoire.....	14
<b>1 Revue de littérature sur les interfaces de locomotion.....</b>	<b>15</b>
1.1 Présentation des concepts sous-jacents aux interfaces de locomotion .....	16
1.2 Dispositifs ne permettant pas la marche naturelle .....	17
1.3 Dispositifs sphériques .....	18
1.4 Tapis roulants.....	18
1.4.1 « SARCOS Treadport » .....	18
1.4.2 Tapis roulants montés .....	19
1.4.3 « Omnidirectional treadmill » (ODT).....	19
1.4.4 « Torus treadmill ».....	20
1.5 Plates-formes programmables pour pieds.....	21
1.6 Conclusion .....	21
<b>2 Architecture globale du système.....</b>	<b>23</b>
2.1 Description de la solution proposée.....	24
2.1.1 Montage avec 2 plates-formes à 6 DDL .....	24
2.1.2 Prototype à 3 DDL.....	26
2.2 Cahier des charges .....	27

2.2.1	Cahier des charges pour un système idéal à 6 DDL .....	28
2.2.2	Cahier des charges pour le prototype à 3 DDL.....	33
2.3	Description du montage matériel.....	38
2.3.1	Schéma global et interaction entre les composants .....	38
2.3.2	Description détaillée du montage 3 DDL .....	40
2.3.3	Description de l'effecteur .....	41
2.3.4	Description des nœuds .....	41
2.3.5	Description des amplificateurs de puissance .....	42
2.3.6	Console .....	42
2.3.7	Description des enrouleurs initialement utilisés .....	42
2.3.8	Description des enrouleurs améliorés .....	44
2.3.9	Description du capteur de force .....	47
2.4	Architecture logicielle.....	47
2.4.1	L'environnement de développement RT-LAB .....	47
2.5	Conclusion .....	49
<b>3</b>	<b>Définitions de base et cinématique .....</b>	<b>50</b>
3.1	Généralités .....	51
3.2	Nomenclature.....	52
3.3	Définitions .....	54
3.4	Définition de la convention de rotation et de translation.....	55
3.5	Définition des repères .....	56
3.5.1	Description générale des repères .....	56
3.5.2	Repère plate-forme .....	57
3.5.3	Repère monde réel .....	58
3.5.4	Repère monde virtuel.....	58
3.5.5	Relation entre le monde virtuel et le monde réel .....	59
3.6	Description du mécanisme.....	60
3.7	Géométrie et cinématique .....	61
3.7.1	Problème géométrique inverse (PGI) .....	61
3.7.2	Équations de vitesse et matrice Jacobienne .....	62
3.7.3	Dualité cinématique/statique.....	64
3.8	Conclusion .....	65
<b>4</b>	<b>Architecture logicielle et algorithmes de commande.....</b>	<b>66</b>
4.1	Introduction.....	67
4.2	Explication du schéma de commande général .....	67
4.3	Explication des principes sous-jacents aux algorithmes de contrôle .....	68
4.3.1	Commande hybride.....	68
4.3.2	Génération de consigne.....	69
4.3.3	Contrôle de la position cartésienne de la plate-forme basé sur un contrôle articulaire .....	75
4.3.4	Conclusion .....	76
4.4	Explication détaillée des algorithmes de contrôle .....	76
4.4.1	Génération de consigne.....	77
4.4.2	Contrôle moteur global .....	83
4.4.3	Modèle de simulation physique .....	88
4.4.4	PGI et PGD .....	89

4.4.5	Calcul de la force dans le monde réelle $[F]_{MR}$ .....	90
4.5	Conclusion .....	91
<b>5</b>	<b>Calibrage et précision du positionnement de la plate-forme .....</b>	<b>92</b>
5.1	Système de guidage de l'enroulement du câble .....	93
5.2	Étirement longitudinal et écrasement radial des câbles .....	94
5.3	Calibrage .....	96
5.3.1	Prise de données .....	97
5.3.2	Description de l'algorithme .....	98
5.3.3	Résultats .....	105
5.3.4	Limitation .....	108
5.3.5	Validation .....	109
5.3.6	Résultat de la validation .....	110
5.3.7	Conclusion sur le calibrage .....	111
5.4	Conclusion .....	111
<b>6</b>	<b>Résultats .....</b>	<b>112</b>
6.1	Résultats de simulations .....	113
6.1.1	Génération de consigne 2D .....	113
6.1.2	Génération de consigne 3D .....	114
6.1.3	Conclusion sur la gestion des collisions .....	116
6.2	Résultats réels de la commande hybride .....	116
6.2.1	Rigidité de la plate-forme .....	116
6.2.2	Contrôle en position .....	117
6.2.3	Contrôle en force .....	118
6.2.4	Gestion des interférences entre la plate-forme et son environnement .....	120
6.2.6	Conclusion sur les résultats des algorithmes de commande .....	123
6.3	Conclusion .....	123
	<b>Conclusion .....</b>	<b>124</b>
	Résumé des travaux .....	124
	Travaux futurs et perspectives d'exploitation de l'interface de locomotion .....	125
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>127</b>
	<b>A Synthèse des caractéristique des interfaces de locomotion .....</b>	<b>130</b>
	<b>B Seuils de perception des accélérations .....</b>	<b>133</b>
	<b>C Calcul de l'espace de travail .....</b>	<b>135</b>
	<b>D Programmation quadratique .....</b>	<b>139</b>
	<b>E Explication du fonctionnement des vidéos .....</b>	<b>141</b>
	<b>F Explication détaillée des travaux futurs .....</b>	<b>142</b>
	F.1 Améliorations matérielles .....	142
	F.2 Améliorations logicielles .....	146
	F.3 Perspectives d'exploitation de l'interface de locomotion .....	147
	F.4 Ordre des priorités .....	148

## Liste des tableaux

TABLEAU 1 - TYPES DE MOUVEMENT PERMIS .....	28
TABLEAU 2 - DÉBATTEMENT LINÉAIRE AU NIVEAU DES HANCHES .....	30
TABLEAU 3 - DÉBATTEMENT LINÉAIRE AU NIVEAU DES PIEDS .....	31
TABLEAU 4 - INFORMATIONS SUR LA DÉMARCHE HUMAINE AU NIVEAU DES PIEDS .....	31
TABLEAU 5 - SOMMAIRE DE L'ESPACE DE TRAVAIL REQUIS .....	32
TABLEAU 6 - DÉBATTEMENT ANGULAIRE AU NIVEAU DES HANCHES .....	32
TABLEAU 7 - DÉBATTEMENT ANGULAIRE AU NIVEAU DES PIEDS .....	33
TABLEAU 8 - ESPACE DE TRAVAIL POUR LE PROTOTYPE À 3 DDL .....	35
TABLEAU 9 - POINTS MESURÉS SUR L'ARC DE CERCLE .....	110
TABLEAU 10 - MESURE DE LONGUEUR POUR CHACUN DES POINTS DE RÉFÉRENCE .....	111
TABLEAU 11 – CARACTÉRISTIQUES GÉNÉRALES DES INTERFACES DE LOCOMOTION .....	131
TABLEAU 12 - MANOEUVRABILITÉ DES INTERFACES DE LOCOMOTION .....	132

## Liste des figures

FIGURE 1 - SOLUTION PROPOSÉE.....	25
FIGURE 2 - PROTOTYPE À 3 DDL.....	27
FIGURE 3 - DESCRIPTION DE L'EFFECTEUR DU PROTOTYPE À 3 DDL.....	34
FIGURE 4 - ESPACES DES CONFIGURATIONS POLYVALENTES POUR DIFFÉRENTES ORIENTATIONS DE LA PLATE-FORME.....	36
FIGURE 5 - ESPACE DE CONFIGURATIONS POLYVALENTES POUR LE PROTOTYPE À 3 DDL.....	37
FIGURE 6 - ESPACE DES CONFIGURATIONS POLYVALENTES ET ESPACE DE TRAVAIL REQUIS.....	37
FIGURE 7 - CONFIGURATION DES POINTS D'ATTACHES SUR LA PLATE-FORME.....	38
FIGURE 8 - SCHÉMA GLOBAL ET INTERACTION ENTRE LES COMPOSANTS.....	39
FIGURE 9 - PHOTO DU MONTAGE À 3 DDL.....	40
FIGURE 10 - DESCRIPTION DE L'EFFECTEUR.....	41
FIGURE 11 - PHOTO D'UN ANCIEN ENROULEUR.....	43
FIGURE 12 - PHOTO D'UN CÂBLE D'ACIER TRESSÉ.....	44
FIGURE 13 - PHOTO DES CEILLETS.....	45
FIGURE 14 - VUE DE COUPE DES CEILLETS.....	45
FIGURE 15 - PHOTO DU NOUVEL ENROULEUR.....	46
FIGURE 16 - PHOTO DU CAPTEUR DE FORCE.....	47
FIGURE 17 - ARCHITECTURE DE COMMUNICATION RT-LAB.....	48
FIGURE 18 - CONVENTION DE ROTATION ET DE TRANSLATION POUR LE SYSTÈME À 6 DDL.....	55
FIGURE 19 - CONVENTION DE ROTATION ET DE TRANSLATION POUR LE SYSTÈME À 3 DDL.....	56
FIGURE 20 - DESCRIPTION GÉNÉRALE DES REPÈRES.....	57
FIGURE 21 - DESCRIPTION DU REPÈRE PLATE-FORME.....	57
FIGURE 22 - DESCRIPTION DU REPÈRE MONDE RÉEL.....	58
FIGURE 23 - DESCRIPTION DU REPÈRE MONDE VIRTUEL.....	59
FIGURE 24 - RELATION ENTRE LE MONDE VIRTUEL ET LE MONDE RÉEL.....	59
FIGURE 25 - MONDE VIRTUEL DU POINT DE VUE DE LA GÉNÉRATION DE CONSIGNE.....	60
FIGURE 26 - NOTATION POUR LA LIAISON 1 D'UN MÉCANISME SPATIAL.....	61
FIGURE 27 - SCHÉMA DE CONTRÔLE GLOBAL.....	67
FIGURE 28 - PRÉDICTION DE LA POSITION $P_C'$ .....	73
FIGURE 29 - PRÉDICTION DE LA POSITION $P_C$ .....	74
FIGURE 30 - ERREUR ENTRE LA POSITION $P_C'$ ET $P_C$ .....	74
FIGURE 31 - SCHÉMA DÉTAILLÉ DU PRÉDICTEUR.....	77
FIGURE 32 - CALCUL DES PROFONDEURS DE PÉNÉTRATION.....	78
FIGURE 33 - CORRECTION DE LA PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION.....	79
FIGURE 34 - RÉSULTAT FINAL D'UNE COLLISION AVEC UN SEGMENT.....	79

FIGURE 35 - CALCUL DES PROFONDEURS DE PÉNÉTRATION .....	80
FIGURE 36 - CORRECTION DE LA PROFONDEUR DE PÉNÉTRATION .....	81
FIGURE 37 - RÉSULTAT FINAL D'UNE COLLISION AVEC PLUSIEURS SEGMENTS .....	82
FIGURE 38 - SCHÉMA DÉTAILLÉ DU CONTRÔLE MOTEUR .....	83
FIGURE 39 - SCHÉMA DÉTAILLÉ DU CONTRÔLE MOTEUR EN POSITION .....	84
FIGURE 40 - SCHÉMA DÉTAILLÉ DU CONTRÔLE MOTEUR EN TENSION .....	87
FIGURE 41 - VERSION MODIFIÉE DU SCHÉMA DÉTAILLÉ DU CONTRÔLE MOTEUR EN TENSION .....	88
FIGURE 42 - SCHÉMA DÉTAILLÉ DU MODÈLE PHYSIQUE DU SYSTÈME DANS LE DOMAINE ARTICULAIRE .....	89
FIGURE 43 - SCHÉMA DÉTAILLÉ DU MODÈLE PHYSIQUE DU SYSTÈME DANS LE DOMAINE CARTÉSIEN .....	89
FIGURE 44 - ENROULEMENT UNIFORME ET NON-UNIFORME.....	93
FIGURE 45 - ERREUR DE MESURE DE LONGUEUR EN FONCTION DE LA TENSION DANS LES CÂBLES .....	95
FIGURE 46 - RAPPEL DU PGI.....	96
FIGURE 47 - ÉTAPE 1 : INITIALISATION DES POIDS .....	100
FIGURE 48 - ÉTAPE 1 : ENVELOPPE CONVEXE POUR INITIALISATION DES POIDS .....	100
FIGURE 49 - ÉTAPE 2 : CALCUL DES COMPOSANTES DU GRADIENT .....	101
FIGURE 50 - ÉTAPE 2 : CALCUL DU GRADIENT .....	102
FIGURE 51 - ÉTAPE 3 : CALCUL DU PAS À EFFECTUER DANS LE DIRECTION DU GRADIENT .....	103
FIGURE 52 - ÉTAPE 3 : MISE À JOUR DU POIDS.....	104
FIGURE 53 - CONVERGENCE DE L'ALGORITHME .....	104
FIGURE 54 - COURBE D'ERREUR EN FONCTION DE LA POSITION ESTIMÉE DE L'OEILLET.....	105
FIGURE 55 - CONVERGENCE DES POIDS AU FIL DES ITÉRATIONS .....	106
FIGURE 56 - CONVERGENCE DES POIDS AU FIL DES ITÉRATIONS (VUE AGRANDIE) .....	107
FIGURE 57 - NORME DE L'ERREUR CARTÉSIENNE EN FONCTION DU NOMBRE D'ITÉRATION.....	107
FIGURE 58 - ERREUR ENTRE LE POINT RÉEL ET LE POINT ESTIMÉ EN FONCTION DE LA PRÉCISION DE LA MESURE DE LONGUEUR DU CÂBLE.....	108
FIGURE 59 - VALIDATION DE L'ALGORITHME EN TRAÇANT UN ARC DE CERCLE .....	109
FIGURE 60 - DÉMO SIMULATION 2D .....	113
FIGURE 61 - DÉMO SIMULATION 3D - MOUVEMENTS DIVERS.....	115
FIGURE 62 - DÉMO SIMULATION 3D - GLISSEMENT SUR PENTE .....	115
FIGURE 63 - DÉMO RÉELLE RIGIDITÉ .....	117
FIGURE 64 - DÉMO RÉELLE - ASSERVISSEMENT EN POSITION .....	117
FIGURE 65 - DÉMO RÉELLE - ASSERVISSEMENT EN FORCE .....	118
FIGURE 66 - DÉMO RÉELLE - ASSERVISSEMENT EN FORCE .....	119
FIGURE 67 - DÉMO RÉELLE - GÉNÉRATION DE CONSIGNE DYNAMIQUE À 2 DDL .....	120
FIGURE 68 - DÉMO RÉELLE - GÉNÉRATION DE CONSIGNE DYNAMIQUE À 3 DDL .....	121
FIGURE 69 - DÉMO RÉELLE - GÉNÉRATION DE CONSIGNE DYNAMIQUE À 3 DDL .....	122
FIGURE 70 - VITESSE (ROUGE) ET POSITION (BLEU) DE L'USAGER EN FONCTION DU TEMPS SANS LE RAPPEL....	136
FIGURE 71 - VITESSE (ROUGE) ET POSITION (BLEU) DE L'USAGER EN FONCTION TEMPS AVEC LE RAPPEL.....	137
FIGURE 72 - MODE D'HARNACHEMENT DU PIED SUR LA PLATE-FORME.....	144
FIGURE 73 - DUPLICATION DES CÂBLES INTÉRIEURS POUR RÉDUIRE L'INTERFÉRENCE.....	145

# **Introduction**

## **Problématique**

Depuis une quinzaine d'années, les interfaces de locomotion font l'objet d'un nouvel intérêt en recherche. Une interface de locomotion permet d'améliorer l'expérience de la réalité virtuelle (RV) en permettant à l'utilisateur de l'interface de se déplacer dans le monde virtuel impliquant une dépense d'énergie. Contrairement à l'utilisation de dispositifs tels les manettes et les souris, les interfaces de locomotion permettent d'imiter la marche naturelle. Par ailleurs, les interfaces de locomotion doivent permettre le déplacement dans un monde virtuel vaste tout en contraignant l'utilisateur dans un espace limité du monde réel. Elles permettent ainsi de considérer les effets de la fatigue et de la réaction face à la topologie du monde virtuel lors du processus de décision. Elles permettent également aux utilisateurs d'avoir les mains libres et d'utiliser d'autres interfaces de RV tels les visiocasques et les gants haptiques. Enfin, l'interface de locomotion doit permettre de se déplacer dans le monde réel ainsi que d'effectuer des tâches demandant une plus grande précision, comme se tourner, marcher de côté, sauter, etc.

## **Application**

L'utilisation de plusieurs exemplaires d'interfaces de locomotion permet de créer des scénarios réalistes d'opération de groupe impliquant plusieurs personnes oeuvrant dans des lieux différents. Chaque interface de locomotion peut être dotée d'une interface réseau lui permettant de transmettre les paramètres de marche de l'utilisateur sur un réseau local ou global. Il est alors possible de recréer des scénarios comme la simulation d'opérations militaires, la simulation d'opérations de recherche et de sauvetage de même que la simulation d'exercices de réhabilitation à la marche. Par exemple, il serait possible, pour un thérapeute, de créer un environnement parfaitement contrôlé grâce auquel il serait en mesure de planifier des exercices de marche adaptés à son patient.

## **Solution proposée**

L'architecture développée pour l'interface de locomotion se démarque significativement des systèmes proposés actuellement dans la littérature. Elle repose sur deux mécanismes parallèles à six degrés de liberté entraînés par des câbles. Le mécanisme parallèle présente de nombreux avantages dont une bande passante mécanique élevée et un contrôle de grande précision. Par ailleurs, l'utilisation de câbles comme éléments de transmission permet de réduire l'inertie et l'encombrement du mécanisme. La connaissance des déplacements dans l'environnement réel est interprétée pour mettre à jour la position de l'avatar de la personne dans l'environnement virtuel. En fonction de la position de la personne dans le monde virtuel, le mécanisme peut faire ressentir la topographie du plancher virtuel à l'utilisateur. Étant donné la nature de l'approche, il est possible de recréer des environnements accidentés, telles des marches d'escalier, une chaîne de trottoir et des pentes changeant rapidement de dénivellation.

## **Objectifs**

Les objectifs de ce mémoire sont les suivants :

- Présenter l'architecture matérielle et logicielle d'une interface de locomotion utilisant un mécanisme à câbles.
- Démontrer qu'il est possible de réaliser une interface de locomotion basée sur un mécanisme à câbles. Cette preuve sera effectuée en réalisant un prototype à 3 DLL d'une interface de locomotion permettant de se déplacer dans un monde virtuel en ressentant sa topographie.

## **Méthodologie**

Le projet de maîtrise consiste en une étude de plusieurs concepts pour valider l'approche d'une interface de locomotion utilisant des mécanismes à câbles. La validation a été réalisée grâce à la fabrication d'un prototype. Le prototype développé représente une version miniature d'une interface de locomotion permettant trois degrés de liberté dans le plan.

## **Structure du mémoire**

Le mémoire présente le prototype réalisé ainsi que les concepts sur lesquels il repose. Le mémoire contient six chapitres. Le premier chapitre présente une revue de la littérature des interfaces de locomotion existantes. Le deuxième chapitre décrit en détail la solution proposée ainsi que la façon dont elle se démarque des autres approches. Il traite également des spécifications ainsi que du contexte matériel et logiciel de l'architecture du système. Le troisième chapitre présente les notions de base et l'analyse cinématique d'un mécanisme à câbles à trois degrés de liberté. Le quatrième chapitre traite des algorithmes de contrôle implantés et de ses concepts sous-jacents. Finalement, les contributions au niveau de l'amélioration de la précision du contrôle de mécanisme à câbles vont être discutées au chapitre 5.

# **Chapitre 1**

## **Revue de littérature sur les interfaces de locomotion**

Cette revue de littérature présente les principales approches de réalisation d'interfaces de locomotion de même que leurs principaux avantages et inconvénients. Elles se divisent en quatre catégories : les dispositifs ne permettant pas la marche naturelle, les dispositifs sphériques, les approches avec tapis roulants et les plates-formes programmables pour les pieds. Une synthèse des caractéristiques des interfaces de locomotion et de leurs manœuvres permises est présentée en annexe A. La section qui suit présente les principaux éléments décrivant les interfaces de locomotion.

## **1.1 Présentation des concepts sous-jacents aux interfaces de locomotion**

Une interface de locomotion est un dispositif permettant à une personne de se déplacer dans un environnement virtuel. Les interfaces de locomotion permettent d'améliorer la qualité de l'immersion dans le monde virtuel en permettant une ou plusieurs des fonctionnalités suivantes.

Premièrement, elle devrait permettre le déplacement dans un monde virtuel vaste en étant contraint à un environnement de travail limité. Pour ce faire, l'interface de locomotion doit comporter un moyen de limiter ou d'empêcher les déplacements de la personne, comme le défilement d'un tapis roulant ou la mise en œuvre d'un algorithme de rappel.

Deuxièmement, elle devrait permettre de se déplacer en effectuant un effort physique. Le fait de déplacer une souris n'est pas considéré comme étant un effort physique.

Troisièmement, elle devrait permettre de se déplacer en gardant les mains libres. Une interface ne devrait pas nécessiter l'utilisation des mains pour détecter les intentions de l'utilisateur. En ayant les mains libres l'utilisateur peut utiliser d'autres interfaces de RV tels les visiocasques et les gants haptiques.

Quatrièmement, elle devrait permettre de se déplacer par l'action d'une marche naturelle. Une marche naturelle signifie que l'utilisateur marche comme s'il marchait dans le monde réel. Le fait de glisser les pieds sur le plancher ou de pédaler sur une bicyclette ne sont pas des exemples de marche naturelle. La marche humaine naturelle peut-être décomposée comme suit. Le premier pied effectue un appui sur le sol, pendant que le deuxième s'élève et se déplace vers l'avant. Cette phase est dite la phase de balancement. Finalement le pied se dépose sur le sol. Ce pied devient maintenant le point d'appui de la personne. Le premier pied se soulève, balance et vient se reposer à côté du deuxième.

Cinquièmement, elle devrait permettre de recréer la topologie du monde virtuel. En influant sur la personne, l'interface de locomotion peut lui faire ressentir la topographie du monde virtuel. Ceci peut consister à tirer sur la personne lorsqu'elle monte une pente ou bien modifier l'angle d'un tapis selon l'orientation d'une pente.

## **1.2 Dispositifs ne permettant pas la marche naturelle**

Il existe plusieurs dispositifs nécessitant une dépense d'énergie pour le déplacement dans un monde virtuel qui ne permettent pas de se déplacer de façon naturelle. Il y a les dispositifs pour pédaler tels que le « SARCOS Uniport » [1] et la bicyclette instrumentée présentée par Brogan et al. [2]. Ces dispositifs présentent une façon simple de se déplacer dans le monde virtuel et de ressentir, en partie, sa topographie en ajoutant une résistance ou en inclinant la bicyclette. L'utilisateur peut orienter son déplacement avec une barre de guidage. Les problèmes avec ces approches sont que l'utilisateur ne se déplace pas selon une marche naturelle et il ne peut pas utiliser ses mains puisqu'elles doivent contrôler la direction. Il est aussi difficile de manœuvrer sur de petites distances et d'effectuer de petites rotations.

Une autre technique consiste à simuler la marche par le glissement des pieds sur une surface plane. Plusieurs mises en œuvre ont été réalisées par Iwata dont l'utilisation de patins [3] et de surfaces très glissantes [4]. La direction du déplacement est estimée par la direction du pas de l'utilisateur pendant que ses hanches sont immobilisées ou limitées par un cerceau. Pour simuler la montée d'une pente, chaque pied est attaché par un câble qui est peut être tendu vers l'arrière. Cette mise en œuvre offre une solution simple au problème d'interface de locomotion. Toutefois, elle ne permet pas de simuler une marche libre et naturelle. Le glissement des pieds ne procure pas à l'utilisateur le sentiment d'une marche naturelle. Enfin, puisque l'utilisateur reste sur place, il n'a pas l'impression de se déplacer.

### 1.3 Dispositifs sphériques

Le « CyberSphere » [5] est un exemple de dispositif sphérique. Cette mise en œuvre consiste en deux sphères superposées. La sphère supérieure roule librement sur la sphère inférieure. L'utilisateur pénètre à l'intérieur de la sphère supérieure. En marchant dans cette sphère, elle roule sur la deuxième ce qui permet à l'utilisateur de marcher tout en restant en place. Ce système permet simplement de se déplacer dans un monde virtuel vaste tout en demeurant dans un espace fini. Le monde virtuel est projeté sur la sphère qui est semi-transparente. Cette méthode présente plusieurs inconvénients. Il n'est d'abord pas facile de pénétrer dans la sphère. De plus, ce système ne permet que la simulation d'une surface plane. Le système comporte aussi la complexité d'harnacher l'utilisateur pour assurer sa sécurité. Finalement, il est difficile pour l'utilisateur de s'arrêter ou d'accélérer rapidement puisque la sphère possède une grande inertie.

### 1.4 Tapis roulants

L'inventaire des systèmes basés sur le tapis roulant est très grand. Ces systèmes vont du tapis classique, qui se déplace selon une direction, au tapis omnidirectionnel qui permet de se déplacer dans toutes les directions. Les tapis roulants offrent des avantages que les autres types d'interface ne peuvent fournir tels que la possibilité de marcher sur les genoux ou de ramper, de marcher de façon naturelle, de courir, de reculer, de tourner, de marcher de côté et de sauter. De plus, il est facile de maintenir l'utilisateur en place en ajustant la vitesse du tapis en fonction de la vitesse de marche de l'utilisateur. Les prochaines sections présentent diverses mises en œuvre d'approches avec tapis roulant.

#### 1.4.1 « SARCOS Treadport »

Le « SARCOS TreadPort » [6] consiste en un tapis roulant motorisé. L'utilisateur peut contrôler sa direction de déplacement de deux façons. S'il est à l'arrêt, l'angle de ses hanches par rapport à une position de référence détermine la vitesse angulaire avec laquelle il tourne dans l'environnement virtuel. Lorsqu'il marche, l'éloignement par rapport au

centre du tapis (gauche-droite) permet de déterminer la vitesse angulaire avec laquelle il veut tourner dans l'environnement virtuel. Par contre, l'utilisateur a la responsabilité de revenir au centre du tapis pour ne pas tomber à l'extérieur de celui-ci. Le système est doté d'un bras mécanisé qui permet d'appliquer une force sur l'utilisateur. Quand l'utilisateur monte une pente, le bras tire sur la personne pour qu'elle ressente les effets de la montée. Le bras permet aussi de compenser la force d'inertie causée par l'accélération du tapis. Dans la seconde version du Treadport, le tapis est monté sur un mécanisme qui permet d'incliner rapidement d'avant-arrière le tapis (20 degrés/s). Ce système permet donc de bien simuler une marche libre sur un plan droit ou incliné sans l'utilisation des mains. Par contre, la façon de tourner dans le monde réel n'est pas naturelle. De plus, même si l'inclinaison est rapide, le système ne peut pas simuler des variations rapides de topographie comme un escalier, une chaîne de trottoir ou un sol rocailloux

### **1.4.2 Tapis roulants montés**

Le tapis roulant ATLAS [7] consiste en un tapis roulant monté sur une table tournante. L'utilisateur peut avancer, reculer et contrôler la direction de marche en orientant son pied dans l'angle de marche désirée. Le tapis réagit en s'orientant dans la direction du pied. Tout comme le système ATLAS, le système CAREN [8] consiste en un tapis roulant monté sur une plate-forme de Gough-Stewart à 6 degrés de liberté. L'utilisateur peut donc marcher en ligne droite et peut tourner de façon analogue au système ATLAS. Des topologies de terrain variable peuvent être également simulées en variant l'angle de tangage et de roulis du tapis. Par contre, étant donné la grande inertie des tapis et des plates-formes, il peut être difficile de changer rapidement la topologie du terrain.

### **1.4.3 « Omnidirectional treadmill » (ODT)**

Contrairement au tapis classique où l'on peut se déplacer suivant un seul degré de liberté (avant-arrière), le tapis omnidirectionnel permet de se déplacer selon 2 degrés de liberté : avant-arrière et de côté. La conception de l'ODT [9], repose sur deux tapis perpendiculaires imbriqués. Le tapis supérieur est constitué de rangées de rouleaux tournant librement. Ce

premier tapis repose sur tapis orienté orthogonalement. Ce deuxième tapis est aussi constitué de rangées de rouleaux tournant librement. Chaque tapis est fait de 3400 rouleaux indépendants. Les deux tapis sont tissés ensemble avec un tissu mécanique. Le grand avantage de ce système est qu'il permet de se déplacer selon 2 degrés de liberté sans l'utilisation des mains. La réalisation mécanique du système est cependant complexe. L'utilisation de l'ODT est bruyante : lors de son utilisation à vitesse maximale, il produit un bruit de 85 dB. Tel que présenté dans [9], la vitesse maximale de déplacement est de 2 m/s. Pour atteindre des vitesses supérieures, il faudrait une plus grande surface. Étant donnée la complexité de conception mécanique, plus la surface désirée est grande, plus elle est dispendieuse et plus elle est bruyante. Finalement, étant donnée la grande inertie du tapis, on note une difficulté de contrôle lors de l'accélération rapide ou de changement de direction de la part de l'utilisateur. À cause de ce délai l'utilisateur doit s'habituer à la marche sur l'ODT. Le prototype actuel [9] ne permet pas de courir, de marcher sur les genoux et de ramper.

#### **1.4.4 « Torus treadmill »**

Le « Torus treadmill » [10] se classe aussi sous la catégorie des tapis roulants omnidirectionnels. Il est constitué de douze tapis roulants qui sont juxtaposés côte à côte sur une bande de roulement d'un plus gros tapis roulant qui est perpendiculaire aux autres tapis roulants. De cette façon, il est possible de se déplacer dans une direction en marchant dans la direction de roulement du tapis, et se déplacer dans l'autre direction en marchant d'un tapis à l'autre. Les auteurs proposent, pour améliorer le système, de remplacer les tapis par des matrices d'actuateurs linéaires. De cette façon, il serait possible de simuler des planchers non plats, tels qu'une marche d'escalier. Toutefois, l'amplitude des variations de topologie serait assez limitée. La grande limitation du système courant est la surface de marche qui est limitée à 1m par 1m, réduisant ainsi le pas de l'utilisateur à 30 cm. La mise en œuvre courante ne permet pas de générer des planchers non plats. Comme tous les systèmes avec tapis roulant, il y a un délai dans le système de contrôle lorsque l'utilisateur accélère ou change de direction rapidement. Cette difficulté à gérer les accélérations oblige les utilisateurs du système à apprendre à marcher sur le tapis.

## 1.5 Plates-formes programmables pour pieds

Les plates-formes programmables pour pieds peuvent prendre la forme d'un escalier d'exercice tel le système Osiris [11]. Elles peuvent aussi prendre d'autres formes tels le « SARCOS Bi-Port » [12], le « SARCOS I-Port » [13] et le système présenté par Roston and Peurach [14]. Dans ces applications, les deux pieds de l'utilisateur sont montés sur deux plates-formes parallèles indépendantes possédant 3 degrés de liberté de type Gough-Stewart. Cette technique permet d'améliorer l'expérience de réalité virtuelle en permettant de simuler des topologies accidentées. Par contre, l'utilisation de plate-forme de Gough-Stewart pose un problème de débattement, car l'utilisateur est contraint dans l'ampleur de ses mouvements. Enfin, il faut effectuer une compensation logicielle pour que l'utilisateur ne sente pas l'inertie des plates-formes lors de la phase de balancement du pied.

## 1.6 Conclusion

Ce chapitre présentait les fonctionnalités souhaitables des interfaces de locomotion. Une interface de locomotion devrait permettre le déplacement dans un environnement virtuel en effectuant un travail énergétique. Elle devrait aussi permettre de se déplacer dans un monde virtuel vaste tout en étant contraint dans un espace réel réduit. De plus, elle devrait permettre à l'utilisateur de garder les mains libres. Par ailleurs, elle devrait permettre de recréer un déplacement naturel, comme la marche. Enfin, elle devrait permettre de recréer la topologie du monde virtuel.

Ce chapitre présentait ensuite les principales interfaces de locomotion existantes dans la littérature. Il existe quatre types d'interface : les dispositifs ne permettant pas la marche naturelle, les dispositifs sphériques, les approches avec tapis roulants et les plates-formes programmables pour les pieds.

Pour chacune des interfaces, les principaux avantages et inconvénients ont été présentés. Les interfaces existantes permettent entre deux et quatre fonctionnalités qui ont été

mentionnées auparavant, mais aucune ne permet l'utilisation de toutes les fonctionnalités. La solution proposée offre ces cinq fonctionnalités.

## **Chapitre 2**

### **Architecture globale du système**

Cette section décrit l'architecture globale du système. Elle décrit tout d'abord la solution proposée. Elle présente ensuite le cahier des charges. Elle contient finalement une explication du contexte matériel et logiciel du système. L'abréviation suivante DDL sera utilisée pour degrés de liberté. Le nom interface de locomotion se réfère au système global, alors que les plates-formes sont sur quoi l'utilisateur met les pieds.

## **2.1 Description de la solution proposée**

Cette section présente la solution proposée et le prototype réalisé. D'abord, le système complet et idéal est décrit, c'est le montage à 6 DDL. Par la suite, le prototype réalisé est décrit, c'est le montage à 3 DDL.

### **2.1.1 Montage avec 2 plates-formes à 6 DDL**

Chaque pied de l'utilisateur repose sur une plate-forme à laquelle il est attaché. Les plates-formes sont des mécanismes parallèles à 6 DDL actionnés par des câbles. Les deux mécanismes sont indépendants. Chaque plate-forme est attachée par des câbles qui sont reliés à des moteurs. En tournant d'un côté ou de l'autre, les moteurs peuvent enrouler ou dérouler les câbles afin de contrôler leur longueur.

Le principe de fonctionnement est le suivant. En contrôlant les longueurs des câbles, il est possible de contrôler la pose cartésienne des plates-formes. Ce contrôle des plates-formes permet d'empêcher ou d'aider le déplacement des plates-formes. En limitant le déplacement, il est possible de faire ressentir les obstacles du monde virtuel tel que le plancher. Vu que les plates-formes permettent un débattement angulaire, il est possible de faire ressentir un terrain accidenté à l'utilisateur. Afin de déterminer les obstacles virtuels avec lesquels les plates-formes entrent en contact, il est nécessaire d'effectuer une détection de collision entre l'avatar des plates-formes et l'environnement virtuel.

Comme l'utilisateur désire se déplacer dans un environnement virtuel aux dimensions infinies et qu'il est contraint à un espace réel aux dimensions finies, il est nécessaire d'implanter un algorithme de rappel qui a pour but de limiter l'éloignement de l'utilisateur du centre de l'espace de travail. Par ailleurs, la dextérité du mécanisme est plus grande au centre de l'espace de travail qu'aux extrémités. Il est à noter que la mise en œuvre de l'algorithme de rappel ne fait pas l'objet de ces travaux. Toutefois, le concept de rappel est décrit puisqu'il

fait partie de la solution proposée. Par ailleurs, la détermination de l'espace de travail requis repose sur le concept de rappel.

Pour faciliter le rappel de l'utilisateur, un mécanisme à câbles au niveau de son centre de masse pourrait être ajouté. Ce mécanisme permettrait de donner plus de stabilité à l'utilisateur. Lors du rappel, le système tire sur les plates-formes des pieds ainsi que sur les hanches. L'utilisateur peut ainsi rester stable puisque son centre de masse est situé à la hauteur de ses hanches.

La figure 1 permet de voir l'interface de locomotion idéale (à gauche) reliée à un ordinateur. Cet ordinateur peut être relié à d'autres interfaces de locomotion par le biais d'un réseau. Toutes les interfaces reliées ensemble peuvent interagir dans le même environnement virtuel.

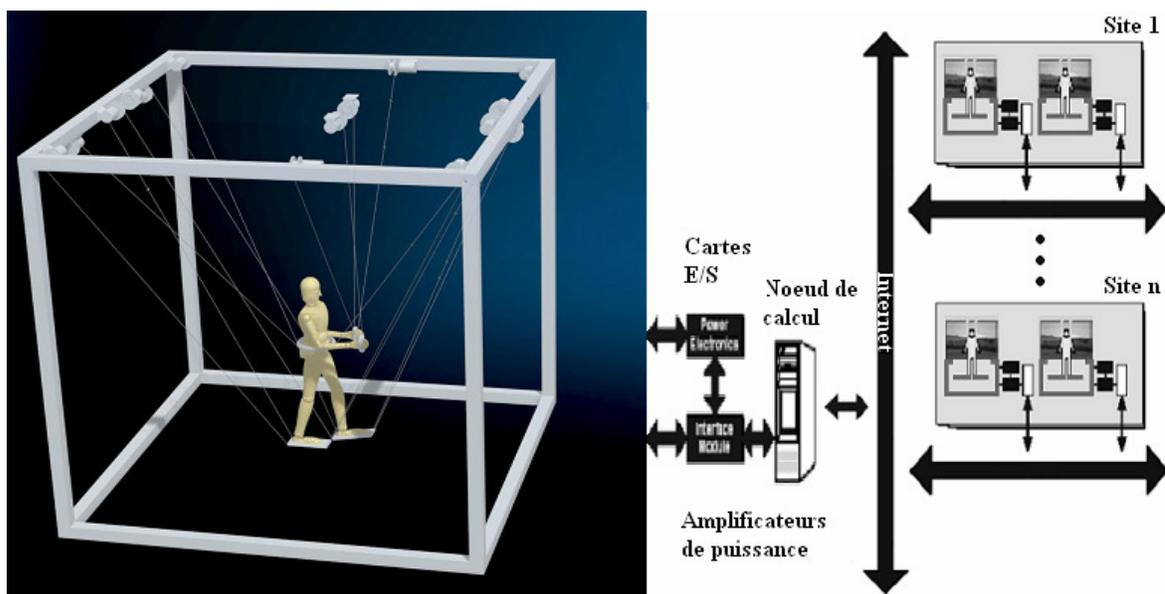


Figure 1 - Solution proposée  
(source : S. Foucault et D. Laurendeau)

L'approche proposée se classe dans la catégorie des plates-formes programmables pour pieds. Celle-ci se démarque significativement des autres approches en incorporant les avantages de chacun. En effet, elle permet de se déplacer dans un vaste monde virtuel par

l'action d'une marche naturelle en faisant ressentir la topologie du plancher virtuel tout en gardant les mains libres.

Comme toutes les plates-formes programmables, l'approche proposée permet de simuler un terrain à topologie variable, car les plates-formes offrent chacune 6 DDL et sont indépendantes les unes des autres. En utilisant une approche par mécanisme à câbles, le problème de débattement limité connu avec les approches de plates-formes programmables pour les pieds est résolu. Étant donné que les actionneurs sont des couples moteurs-câbles, le système possède moins d'inertie que les tapis roulants, ce qui permet d'obtenir de grandes vitesses et accélérations de déplacement des plates-formes. Il est aussi possible de changer rapidement l'orientation des plates-formes, ce qui permet de simuler une topologie très accidentée, tel que des escaliers, une chaîne de trottoir ou un sol rocailleux. Comme les tapis roulants omnidirectionnels, l'approche proposée permet à l'utilisateur de se déplacer dans les deux directions horizontales (avant-arrière et de côté). De plus, il est facile et peu coûteux, étant donné le mode de construction, d'agrandir l'espace de travail : il suffit d'allonger les câbles et d'éloigner les moteurs. Cependant, l'approche par câbles entraîne deux problèmes majeurs : la difficulté du contrôle et les interférences causées par les câbles. L'interférence des câbles va se résoudre par une détection d'interférence et par une redondance de câbles permettant de sélectionner ou de relâcher les câbles selon les différentes configurations.

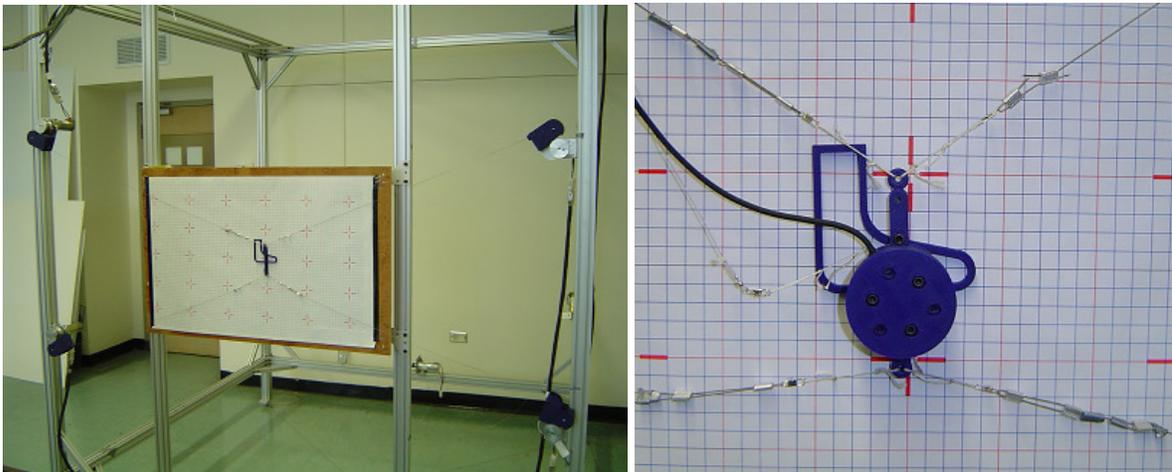
### **2.1.2 Prototype à 3 DDL**

L'utilisation d'une architecture parallèle actionnée par des câbles pour la mise en œuvre d'une interface de locomotion n'a jamais été réalisée. Avant d'implanter cette approche sur un mécanisme de grandeur réelle, il est requis de valider les principes fondamentaux sur un prototype de taille et de complexité réduites.

La réalisation d'un prototype à 3 DDL permet de tester tous les principes fondamentaux de commande et de vérifier s'il est possible de simuler un terrain à topologie variable. Il s'agit d'un mécanisme plan doté de quatre actionneurs placés aux sommets d'un rectangle. Ces

quatre moteurs sont positionnés de façon à former un plan. Un quadrillage de référence est placé dans ce même plan afin de faciliter la validation des algorithmes et la visualisation du monde virtuel.

La figure 2 présente une vue globale du prototype ainsi qu'une vue rapprochée de l'effecteur (plate-forme).



(a) Vue générale du montage

(b) Vue de l'effecteur

Figure 2 - Prototype à 3 DDL

## 2.2 Cahier des charges

Le cahier des charges définit les spécifications du système qui comprennent la détermination des types de mouvement permis et la détermination de l'espace de travail requis, caractérisé par les débattements linéaires et angulaires. Le cahier des charges comprend aussi la définition de la configuration des points d'attache des moteurs et de l'effecteur.

Cette section décrit ces différentes spécifications pour le système idéal à 6 DDL et pour le prototype réalisé à 3 DDL.

### 2.2.1 Cahier des charges pour un système idéal à 6 DDL

Afin d'offrir à l'utilisateur de l'interface de locomotion une immersion complète dans un environnement virtuel, il est essentiel de lui procurer le sentiment de se déplacer dans le monde virtuel tel qu'il le ferait dans le monde réel. Le système doit donc lui permettre de déplacer librement ses pieds pour la plupart des phases de la marche naturelle. Certains éléments de la marche impliquent beaucoup de complexité dans la réalisation de l'interface et ne font pas partie du présent cahier des charges. Par exemple, le fait de permettre le croisement des jambes impliquerait beaucoup d'interférence entre les câbles. Voici la liste des mouvements que permettrait l'interface de locomotion.

#### Types de mouvement permis

Cette section vise à identifier les possibilités qui seront offertes par l'interface de locomotion, i.e. : les types de mouvement offerts par le système. Le tableau 1 présente ces types de mouvement.

Tableau 1 - Types de mouvement permis

Types de mouvement	Explications
Marcher vers l'avant et l'arrière	Marcher vers l'avant Marcher vers l'arrière Marcher vers l'avant ou l'arrière et s'arrêter instantanément
Marcher de côté	Se déplacer de côté sans croiser les jambes (Un pied vient rejoindre l'autre, l'autre se déplace, l'autre vient le rejoindre, etc.)
Tourner	Marcher vers l'avant et tourner à petit angle (20-30 degrés d'azimut) sans croisement des jambes À l'arrêt, se tourner sans croisement des jambes
Monter et descendre	Monter et descendre des escaliers Monter et descendre une pente

## Spécifications requises et informations sur la démarche humaine

Une fois les types de mouvement choisis, il est possible de fixer les spécifications du système. Voici les spécifications qui ont été identifiées et qui seront présentées sous forme de tableau.

Spécifications sur les débattements linéaires et angulaires des hanches :

- Débattement linéaire sur chaque degré de liberté (x (avant-arrière), y (gauche-droite) et z (haut-bas)),
- Débattement angulaire sur chaque degré de liberté (roulis, azimut, tangage),
- Espace de travail permettant une marche libre.

Spécifications sur les débattements linéaires et angulaires des pieds :

- Débattement linéaire sur chaque degré de liberté (x (avant-arrière), y (gauche-droite) et z (haut-bas)),
- Débattement angulaire sur chaque degré de liberté (roulis, azimut, tangage),
- Espace de travail permettant une marche libre,
- Force à produire afin de garder les plates-formes stables lors du dépôt du pied.

Pour commencer, une analyse du besoin de l'espace de travail au niveau des hanches est présentée. Il est mentionné dans la section précédente qu'il est important de garder l'utilisateur au centre de l'espace de travail. L'algorithme de rappel permet de solutionner ce problème. Il est intéressant de noter qu'il existe une dualité entre les dimensions de l'espace de travail et la paramétrisation de l'algorithme de rappel. En effet, plus le rappel se fait lentement, plus il est nécessaire d'avoir un grand espace de travail et plus le rappel se fait rapidement, moins l'espace de travail doit être important. La paramétrisation de l'algorithme de rappel dépend de la faculté de l'humain à détecter des accélérations. En effet, lors du rappel, on applique des forces à l'utilisateur afin de le ramener vers le centre de l'espace de travail. Plus le seuil de perception de l'humain face aux accélérations est grand, plus il est possible de tirer sur lui sans qu'il ne s'en rende compte. Une recherche dans la littérature a été réalisée afin d'identifier les seuils de perception des accélérations sur l'humain. Le résultat de cette recherche est présenté en annexe B. Ces résultats seront maintenant utilisés afin de déterminer l'espace de travail requis.

Les informations retrouvées dans les tableaux suivants font référence à divers ouvrages. Les informations sur la démarche humaine sont disponibles dans Winter [15, 16] et sont référencées par l'indice (1). Les informations sur les seuils de perception des accélérations sont disponibles dans Reid et Nahon [17] et sont référencées par l'indice (2). Les informations concernant les forces de contact et le débattement angulaire aux pieds ont été fournies par le docteur Brad McFadyen du Centre interdisciplinaire de recherche en réadaptation et intégration sociale lors de discussions ou par le biais d'échanges de courriels. Finalement, les autres spécifications proviennent de spécifications arbitraires. Ces références ne sont pas numérotées. Le tableau 2 présente les informations pertinentes afin de déterminer le débattement linéaire au niveau des hanches.

Tableau 2 - Débattement linéaire au niveau des hanches

Type de mouvement	Marche avant	Marche arrière	Marche côté	Monter escalier
Grandeur d'un pas (m)	0,75 <sup>(1)</sup>	0,6 <sup>(1)</sup>	0,85 <sup>(1)</sup>	0,4 <sup>(1)</sup>
Nombre de pas par minute	110 <sup>(1)</sup>	100 <sup>(1)</sup>	60 <sup>(1)</sup>	66 <sup>(1)</sup>
Vitesse de croisière (m/s)	1,375 <sup>(1)</sup>	1 <sup>(1)</sup>	0,85 <sup>(1)</sup>	0,44 <sup>(1)</sup>
Seuil de perception de l'accélération (m/s <sup>2</sup> )	0,51 <sup>(2)</sup>	0,51 <sup>(2)</sup>	0,51 <sup>(2)</sup>	0,84 <sup>(2)</sup>
<b>Débattement linéaire requis (m)</b>	<b>1,875</b>	<b>1,0</b>	<b>0,78</b>	<b>0,15</b>

Il est possible de remarquer que les débattements nécessaires ne seront pas les mêmes dans toutes les directions. L'espace de travail ne sera donc pas un cube. Vers l'avant et l'arrière, l'espace nécessaire est plus grand que l'espace nécessaire de côté ou vers le haut et le bas. Le calcul de l'espace de travail requis en fonction de la vitesse de déplacement et des seuils de perception de l'accélération est décrit en annexe C. Ce calcul ne se veut pas exact, mais

permet d'estimer l'ordre de grandeur de l'espace de travail requis. Il faudra conduire des tests expérimentaux pour obtenir le calcul exact de l'espace nécessaire. Des tests expérimentaux tels des tests sur tapis roulant muni d'un système de rappel aux hanches devront être conduits pour valider ces données. L'estimation a été effectuée avec des données générales de la démarche humaine, de seuils de perception et en implantant un rappel constant. Selon l'algorithme de rappel, il pourrait être nécessaire d'avoir un espace de travail plus ou moins grand que l'espace estimé.

Afin de déterminer l'espace de travail nécessaire au niveau des pieds, on se base sur l'espace de travail des hanches auquel on ajoute la grandeur d'un pas dans chaque direction. Le tableau 3 présente le débattement linéaire au niveau des pieds.

Tableau 3 - Débattement linéaire au niveau des pieds

Type de mouvement	Marche avant	Marche arrière	Marche côté	Monter escalier
Débattement linéaire requis (m)	1,875+0,75	1,0+0,6	0,78+0,85	0,15+0,4
<b>Débattement linéaire requis (m)</b>	<b>2,625</b>	<b>1,6</b>	<b>1,63</b>	<b>0,55</b>

Le tableau 4 présente quelques informations supplémentaires sur la marche humaine qui seront nécessaires au développement de l'interface de locomotion.

Tableau 4 - Informations sur la démarche humaine au niveau des pieds

Type de mouvement	Marche avant	Marche arrière	Marche de côté	Monter escalier
Vitesse linéaire (m/s)	4,0 <sup>(1)</sup>	< 4,0 <sup>(1)</sup>	< 4,0 <sup>(1)</sup>	< 4,0 <sup>(1)</sup>
Force tangentielle ou normale appliquée au plancher (N)	150 <sup>(3)</sup> (tangentielle)	150 <sup>(3)</sup> (tangentielle)	75 <sup>(3)</sup> (tangentielle)	1000 <sup>(3)</sup> (normale)

Voici finalement le tableau 5 qui contient le sommaire de l'espace de travail requis.

Tableau 5 - Sommaire de l'espace de travail requis

Type de mouvement	Débattement linéaire des hanches (m)	Débattement linéaire des pieds (m)
Avant-Arrière	2,875	4,225
Gauche-Droite	1,56	3,26
Haut-Bas	0,3	1,1

Les débattements linéaires des hanches et des pieds sont déterminés à l'aide des données présentées aux tableaux 2 et 3 respectivement. Le débattement linéaire avant-arrière est déterminé en sommant les débattements avant et arrière alors que les débattements linéaires gauche-droite et haut-bas sont déterminés en multipliant par deux le débattement linéaire pour la marche de côté et pour monter les escaliers.

L'espace de travail requis ne tient compte que du débattement linéaire. Le débattement angulaire n'influence pas l'espace de travail. Il devra tout de même être évalué, car le système devra supporter ces débattements. Il faudra en tenir compte lors du choix de la configuration pour la pose des moteurs responsables des hanches de façon à être capable d'appliquer le rappel selon l'azimut. Le tableau 6 présente ces informations.

Tableau 6 - Débattement angulaire au niveau des hanches

Type de mouvement	Roulis	Tangage	Azimut
<b>Débattement angulaire nécessaire à une démarche libre des hanches (degré)</b>	<b>Très petit</b> <sup>(1)</sup>	<b>±20 (Lorsqu'on monte une pente, on se penche, etc.)</b> <sup>(1)</sup>	<b>Au moins ±20 degrés</b>

Le tableau 7 présente les informations sur la démarche humaine au niveau des pieds et présente le débattement angulaire aux pieds requis.

Tableau 7 - Débattement angulaire au niveau des pieds

Type de mouvement	Roulis	Tangage	Azimut
Vitesse angulaire (degré/s)	Très petit	400 <sup>(1)</sup>	300
<b>Débattement angulaire requis (degré)</b>	<b>±20</b> <sup>(3)</sup>	<b>±45</b>	<b>±20</b>

Les informations sur les vitesses linéaires sont disponibles dans Winter [16]. Les spécifications sur le débattement angulaire ont été déterminées en partie grâce à Winter [16] et en partie en fonction des spécifications quant au type de topographie que l'on veut simuler. Par exemple, le roulis est limité à  $\pm 20$  degrés pour éviter les blessures au niveau des chevilles. Tout comme les hanches, l'azimut est limité à  $\pm 20$  degrés puisque la dextérité globale du système se dégrade à l'extérieur de ces limites. Le mécanisme à câble tel qu'il sera implanté est très limité en azimut. Pour le tangage, on limite à  $\pm 45$  degrés afin d'être capable de simuler d'importantes dénivellations.

L'architecture choisie ne permet pas de faire des rotations amples aux hanches. Ceci causerait trop de problèmes d'interférence des câbles. De plus, les mécanismes à câbles perdent de leur dextérité avec un grand angle d'azimut. Quelques solutions sont proposées dans le chapitre sur les travaux futurs.

### 2.2.2 Cahier des charges pour le prototype à 3 DDL

Cette section décrit le cahier des charges pour le prototype à 3 DDL. Elle décrit les spécifications requises et présente une étude du choix de la configuration des points d'attache des moteurs et des points d'attache des plates-formes.

## Spécifications

Le prototype à 3 DDL est une interface de locomotion dans le plan. Les degrés de liberté sont deux degrés linéaires (avant-arrière et haut-bas), et un degré angulaire (tangage). Le prototype représente la coupe transversale d'un pied. La figure 3 permet de voir l'effecteur. Sous la pastille ronde apparaît la forme d'un pied vue de côté.

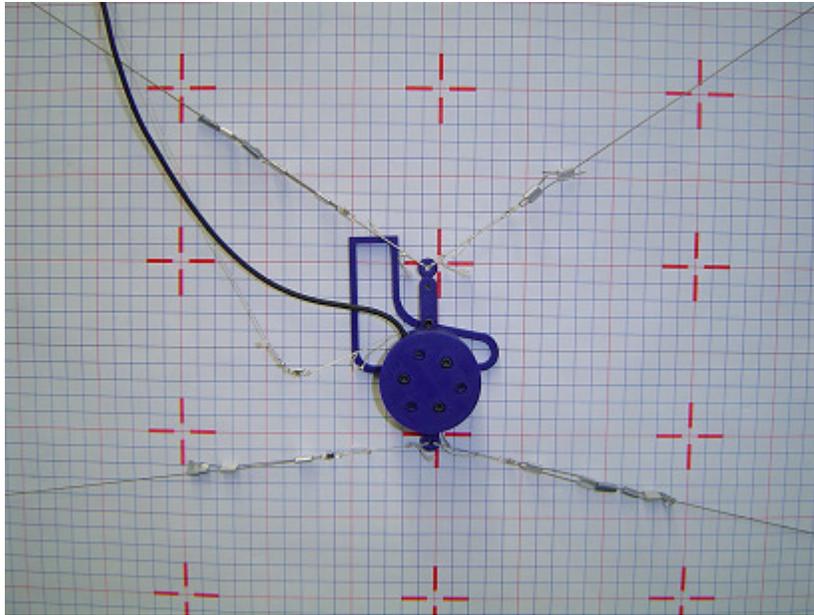


Figure 3 - Description de l'effecteur du prototype à 3 DDL

Le pied peut avancer, reculer, monter, descendre et changer le tangage. Le prototype est une version miniature d'un système à grandeur nature avec un ratio de 1 pour 4.

### Espace de travail requis pour rencontrer les spécifications du prototype

Le prototype étant une version miniature du grand mécanisme avec seulement 3 DDL, les spécifications sont ajustées en conséquences. Les spécifications correspondantes au système à 6 DDL sont multipliées par le ratio  $\frac{1}{4}$ . Elles sont présentées dans le tableau 8.

Tableau 8 - Espace de travail pour le prototype à 3 DDL

<b>Espace de travail pour le prototype à 3 DDL</b>			
Type de mouvement	Avant-Arrière (m)	Haut-Bas (m)	Tangage (degré)
Débattement complet (facteur ¼ du débattement grandeur réelle)	1,05	0,275	±45
Débattement complet (valeurs arrondies pour simplicité)	1	0,3	±45

### **Détermination de la configuration des points d'attache**

L'espace de travail est déterminé comme étant l'espace nécessaire à l'utilisateur pour se déplacer. Pour permettre cet espace de travail, il faut un espace de positionnement des moteurs encore plus grand. Cet espace est défini par les points d'attache des moteurs. Les moteurs ne peuvent pas être placés aux limites de l'espace de travail, car les limites de l'espace de positionnement des moteurs est un lieu de singularité. Il faut donc éloigner les moteurs de l'espace de travail afin de s'éloigner des singularités. Les moteurs sont éloignés de l'espace de travail en agrandissant l'espace de positionnement des moteurs. La configuration du positionnement des points d'attache des moteurs et de la plate-forme influence les débattements de la plate-forme. Une étude de l'impact de la configuration des points d'attache est effectuée à la section suivante.

Gouttefarde [18] a développé un algorithme permettant de déterminer les débattements d'un mécanisme à câbles plan en fonction de la configuration des points d'attache. L'algorithme effectue l'analyse des configurations polyvalentes. Une configuration polyvalente est une configuration dans laquelle le mécanisme peut résister à tout jeu

d'efforts externes ou générer tout jeu d'accélération à l'effecteur. Pour une orientation constante, l'algorithme détermine une zone dans le plan à l'intérieur de laquelle, toutes les poses sont des configurations polyvalentes. En étudiant ces surfaces pour la plage d'orientation requise, il est possible de déterminer l'espace atteignable total. La figure 4 montre l'espace des configurations polyvalentes pour une orientation de  $-45$  degrés,  $0$  degré et  $+45$  degrés. Il est possible de voir en bleu les surfaces de l'espace des configurations polyvalentes et en vert la limite de cet espace.

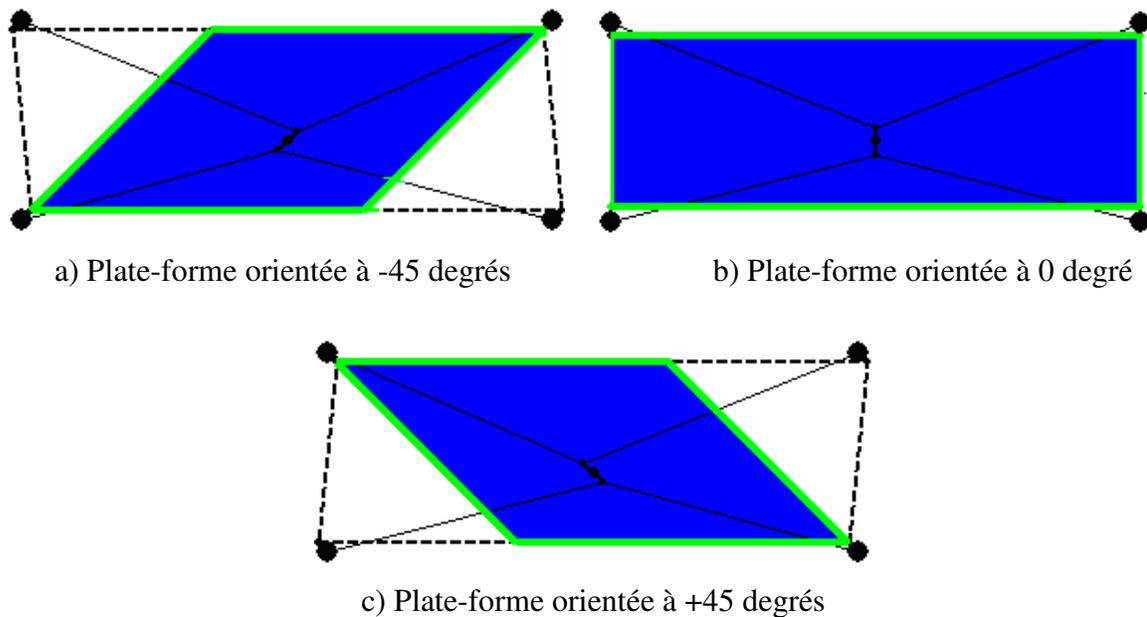


Figure 4 - Espaces des configurations polyvalentes pour différentes orientations de la plate-forme

On peut observer que la surface est réduite proportionnellement à l'orientation de la plate-forme. Pour trouver l'espace atteignable du prototype à 3 DDL, il faut faire l'intersection des espaces polyvalents pour tout angle entre  $-45$  et  $+45$  degrés puisque ces orientations sont les plus contraignantes. La figure 5 montre le résultat de cette intersection.

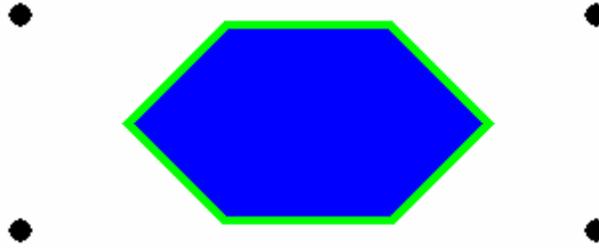


Figure 5 - Espace de configurations polyvalentes pour le prototype à 3 DDL

L'espace atteignable requis déterminé précédemment est  $X = [-0,5 ; 0,5]$  et  $Y = [-0,15 ; 0,15]$  pour une orientation variant entre  $\pm 45$  degrés. La figure 6 montre l'espace des configurations polyvalentes ainsi que l'espace atteignable requis.

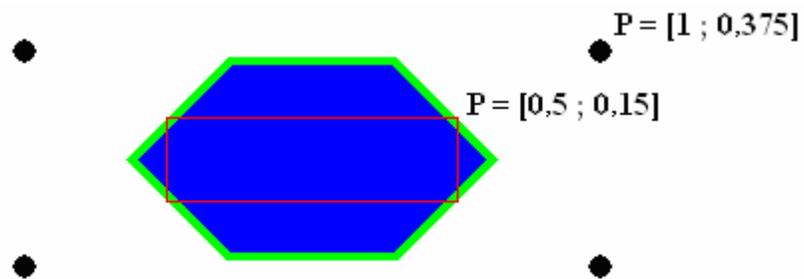


Figure 6 - Espace des configurations polyvalentes et espace de travail requis

L'algorithme de Gouttefarde [18] spécifie que pour obtenir cet espace de travail, les moteurs doivent être positionnés sur une boîte rectangulaire de dimension  $X = [-1 ; 1]$  et  $Y = [-0,375 ; 0,375]$  alors que les points d'attache doivent être  $[0 ; 0,05]$  et  $[0 ; -0,05]$  tel que montrés sur la figure 7.

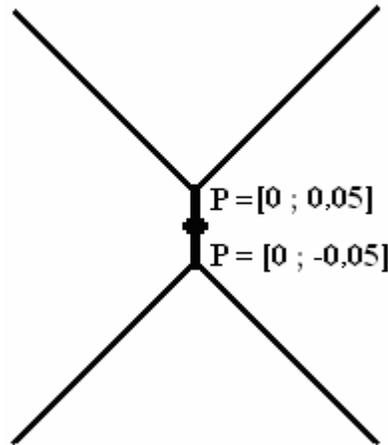


Figure 7 - Configuration des points d'attaches sur la plate-forme

L'analyse de l'espace de travail en fonction des configurations des points d'attache démontre que pour un espace de travail écrasé selon l'horizontale, les points d'attache sur l'effecteur doivent être placés selon un rectangle vertical. Dans le cas présent, ce rectangle est aplati au maximum et devient une ligne verticale. Le fait que les points d'attache sur l'effecteur semblent être regroupés par paire découle uniquement du fait d'utiliser un rectangle complètement aplati. Il ne s'agit aucunement d'une obligation.

## 2.3 Description du montage matériel

Cette section présente le contexte matériel de conception du prototype. Elle présente les différentes composantes mécaniques et électriques requises pour la réalisation du prototype à 3 DDL.

### 2.3.1 Schéma global et interaction entre les composants

Cette première section permet de visualiser le schéma global du montage. La figure 8 présente le montage et l'interaction entre les différents composants.

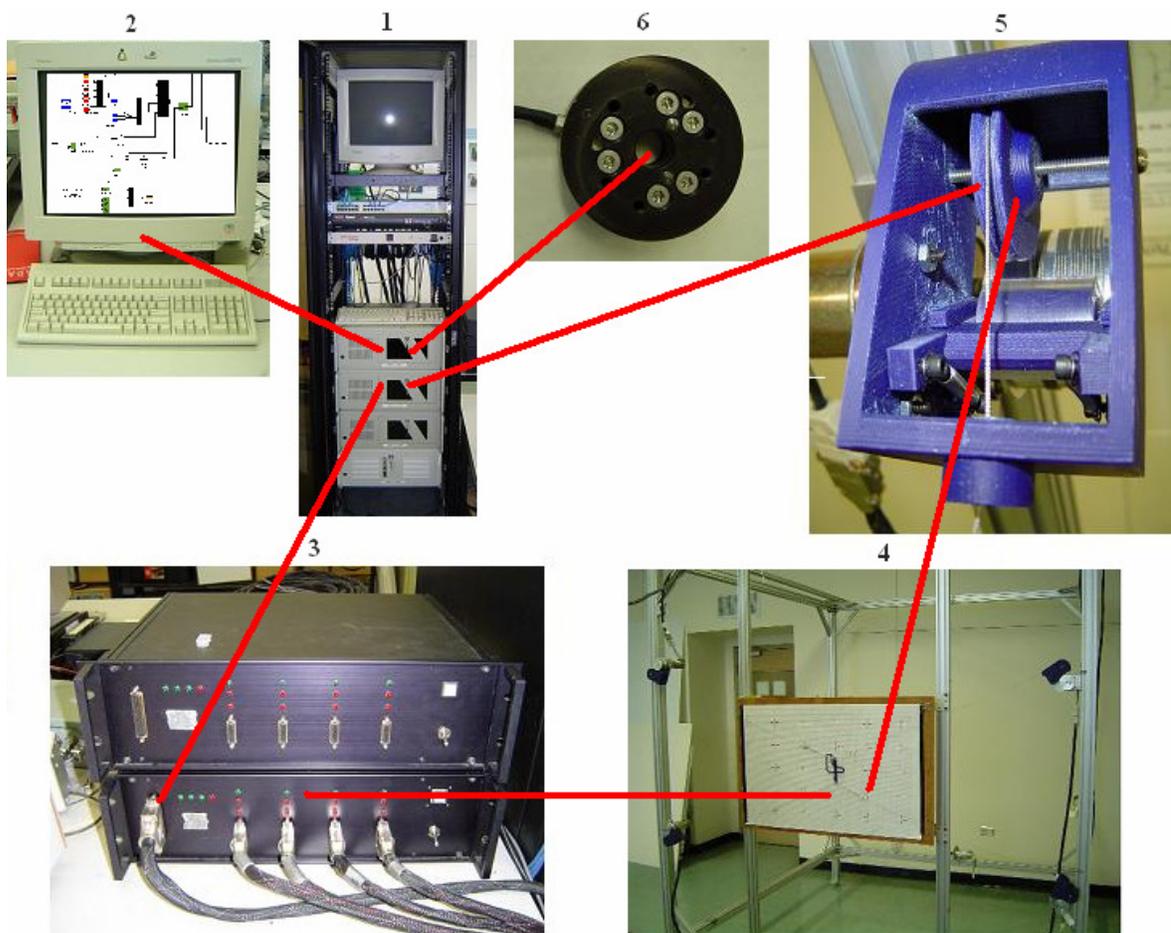


Figure 8 - Schéma global et interaction entre les composants

Sur cette figure, il est possible de voir les nœuds de calcul (1). Ils sont au cœur du système puisqu'ils ont la responsabilité d'exécuter les algorithmes de contrôle et d'interagir avec le montage mécanique et électrique. Les nœuds de calcul interagissent avec la console de l'opérateur (2) qui permet à ce dernier d'interagir avec le système. Les nœuds de calcul interagissent aussi avec des amplificateurs de puissance (3). Ces amplificateurs de puissance permettent d'amplifier les signaux provenant des cartes d'entrée/sortie des nœuds de calcul. Ces signaux amplifiés servent à approvisionner les moteurs (4) en courant. Les boîtes d'amplification servent aussi à recevoir l'information des capteurs de position des moteurs et à relayer cette information aux nœuds de calcul. Le capteur de force (5) est monté sur l'effecteur et permet à l'utilisateur d'exprimer ses intentions au système. Finalement, les capteurs de tension dans les câbles (6) interagissent directement avec les nœuds de

calcul par des cartes d'entrée/sortie analogiques. Les capteurs de force dans les câbles permettent de maintenir la tension dans les câbles.

### 2.3.2 Description détaillée du montage 3 DDL

Le montage 3 DDL est constitué de quatre systèmes d'enroulement montés sur une cage de métal fixe, d'un effecteur, d'un capteur de force et d'un plan de référence. La figure 9 montre le montage à 3 DDL.

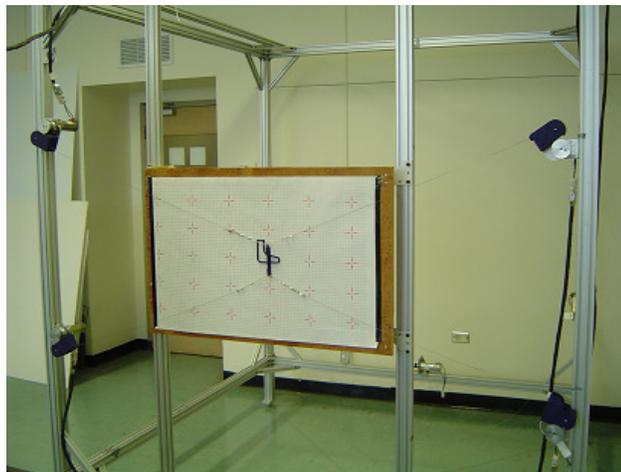
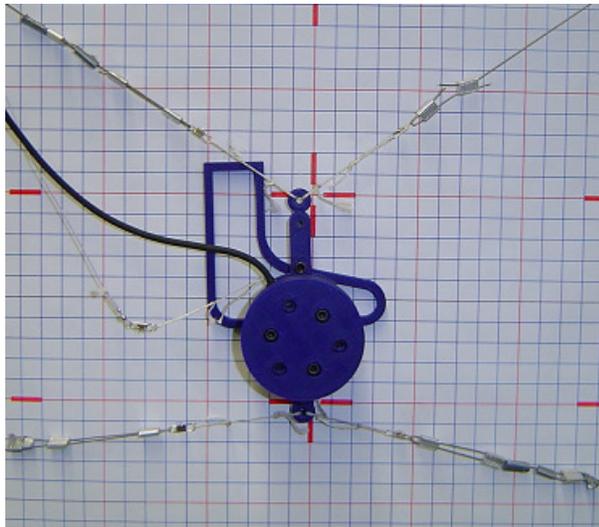


Figure 9 - Photo du montage à 3 DDL

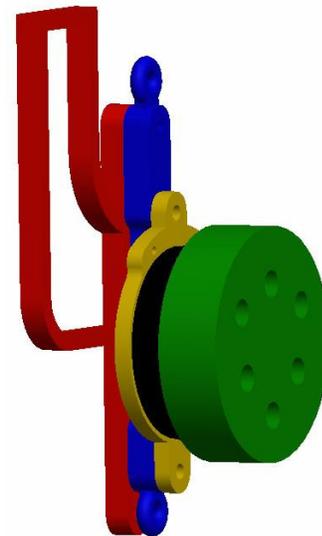
Les systèmes d'enroulement sont positionnés de façon à ce que leurs œillets soient tous dans un seul et même plan. L'œillet est l'endroit où passe le câble pour se rendre du cylindre d'enroulement au point d'attache de la plate-forme. L'œillet est utilisé comme point de référence fixe du positionnement du moteur et sera souvent référé comme étant le point d'attache du moteur. Le plan de référence est une planche de bois sur laquelle est placée une feuille quadrillée. Plusieurs points de référence (croix rouges) ont été imprimés sur la feuille facilitant la procédure de calibrage du système. Le plan de référence se trouve dans le même plan que le plan formé par les œillets. C'est dans ce plan que l'effecteur évoluera comme s'il se promenait dans l'environnement virtuel.

### 2.3.3 Description de l'effecteur

L'effecteur permet d'attacher les câbles et le capteur de force. De plus, la forme d'un pied a été ajoutée de façon à visualiser le pied de l'utilisateur sur l'interface de locomotion. La figure 10 montre les câbles attachés à l'effecteur, le capteur de force monté sur l'effecteur ainsi que la forme du pied.



a) Photo de l'effecteur



b) Image Pro/Engineer  
(source : P.-L. Richard)

Figure 10 - Description de l'effecteur

### 2.3.4 Description des nœuds

Les nœuds de calcul sont des ordinateurs de type PC Pentium III à 500 Mhz, qui opèrent sous un système d'exploitation en temps réel, Neutrino de QNX. Ces PC sont connectés entre eux par des câbles « firewire » et connectés avec la console par câbles « Ethernet ». Les PC sont munis de cartes d'entrée/sortie analogiques et digitales permettant l'interaction avec le système mécanique par le biais des amplificateurs de puissance.

### **2.3.5 Description des amplificateurs de puissance**

Les amplificateurs permettent d'amplifier les signaux analogiques du PC et de les relayer aux moteurs. Quatre moteurs peuvent être contrôlés par boîte d'amplification. Un dispositif de panique (Panic Button) est implanté dans cette boîte. Si un quelconque problème survient, l'opérateur appuie sur le bouton et l'amplificateur coupe l'alimentation de courant aux moteurs. Les amplificateurs sont aussi responsables de recevoir l'information des capteurs de position des moteurs et de relayer cette information aux nœuds de calcul.

### **2.3.6 Console**

La console de l'opérateur (operator console) lui permet d'interagir avec la simulation. Cette console permet d'envoyer et de recevoir des informations provenant de la simulation.

### **2.3.7 Description des enrouleurs initialement utilisés**

Cette section présente une description des enrouleurs qui ont été utilisés initialement pour la mise en œuvre de l'interface de locomotion. Suite à la découverte de faiblesses au niveau des différentes fonctionnalités des enrouleurs, plusieurs améliorations ont été apportées. Ces améliorations sont décrites dans la prochaine section.

Premièrement, il est nécessaire d'expliquer comment le système d'enroulement est responsable de la mesure de la longueur du câble. Les encodeurs de position des moteurs permettent de mesurer le déplacement angulaire de l'arbre moteur depuis une position de référence. Cette position de référence est initialisée lors de la mise en service des moteurs. À partir de la connaissance du déplacement angulaire et du rayon d'enroulement, il est possible de calculer la variation de longueur du câble. Le rayon d'enroulement est calculé selon le rayon du cylindre d'enroulement auquel il faut ajouter une demi-épaisseur de câble. La variation de longueur du câble est utilisée pour mettre à jour la mesure réelle de longueur de câble. Initialement, un système d'enroulement était constitué d'un moteur de qualité médiocre (valeur approximative de 150\$), muni d'un encodeur de position de 11

bits et d'une boîte d'engrenage avec un ratio de réduction de 5,9. Selon le montage de départ, un cylindre était monté sur l'arbre du moteur sur lequel le câble était enroulé. Le câble enroulé autour du cylindre allait s'attacher au point d'attache de la plate-forme en passant par un œillet cylindrique d'un diamètre de 1 cm. Des câbles de cerf-volant étaient utilisés. La figure 11 présente la photo d'un ancien enrouleur.

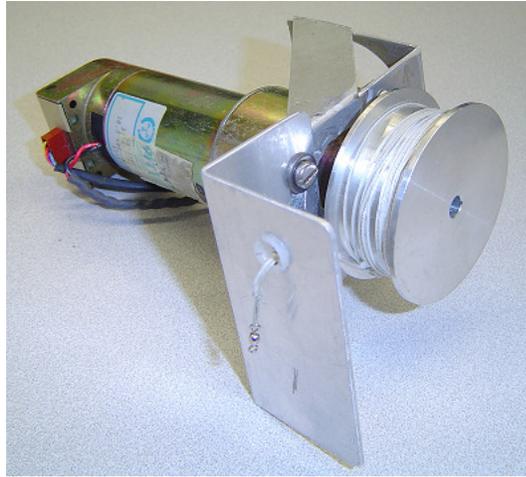


Figure 11 - Photo d'un ancien enrouleur

Ce montage présentait des problèmes majeurs. Premièrement, les câbles utilisés étaient des câbles de cerf-volant. Ces câbles étaient assez solides, mais présentaient un coefficient d'élasticité trop élevé. Cela se traduisait par une élévation du câble lorsqu'il était mis sous tension. Par ailleurs, en variant la tension dans le câble lors son enroulement, il s'écrasait sur la poulie faisant ainsi varier le rayon d'enroulement ce qui donnait une mesure de longueur erronée. Par la suite, l'enroulement du câble se faisait de façon aléatoire. Aucun système de guidage d'enroulement n'était présent afin d'assurer un enroulement uniforme. Un enroulement uniforme est un enroulement où chaque tour de câble est juxtaposé au précédent sans qu'il n'y ait de chevauchement. Enfin, le point d'attache du moteur pouvait varier de quelques millimètres, puisque l'œillet était cylindrique et que son diamètre était assez important. Ces variations de longueur et de position du point d'attache représentaient d'importantes perturbations pour le système de contrôle du positionnement de l'effecteur. Les trois perturbations décrites ci-haut engendraient des variations ne pouvant être enregistrées par l'arbre moteur. La mesure de longueur était donc biaisée. Le système

d'enroulement présentait un dernier problème qui consistait en la perte de tension dans les câbles. Il y avait deux situations où les enrouleurs pouvaient perdre la tension. Le premier cas se produisait lors de la mise hors circuit du système. Les moteurs relâchaient la tension sur les câbles ce qui causait un problème lors de la remise en marche du système. Il fallait s'assurer de réenrouler manuellement les câbles uniformément sur les cylindres avant toute mise en marche du système. Le deuxième cas se produisait pendant le fonctionnement du système. Si on déplaçait l'effecteur dans une zone de singularité ou si le système était mal calibré, certains câbles perdaient leur tension. Dans les deux cas, lors du relâchement de la tension dans un câble, celui-ci pouvait se dérouler du cylindre, perdre son enroulement uniforme et même aller s'enrouler sur l'arbre du moteur compromettant ainsi le bon fonctionnement du système.

### 2.3.8 Description des enrouleurs améliorés

Pour améliorer la mécanique des systèmes d'enroulement, plusieurs corrections sont apportées. D'abord, une nouvelle technologie de câble a été employée. La compagnie « SAVA Cables » fabrique des câbles en acier tressé miniature enrobés d'un enduit de nylon. Ce sont des câbles de 0,610 mm de diamètre sans le revêtement de nylon et de 0,762 mm avec le revêtement. Le câble d'acier tressé de petit gabarit est très rigide, très peu élastique et offre une bonne flexibilité. La faible élasticité et la rigidité du câble minimisent fortement les problèmes d'élongation longitudinal et d'écrasement radial. La figure 12 présente un câble d'acier tressé.

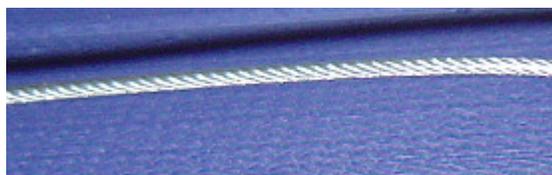


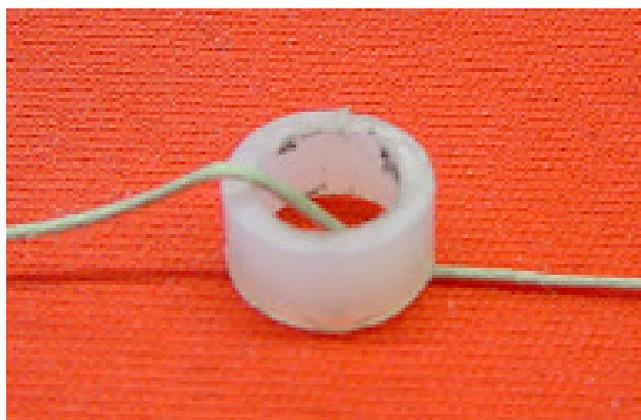
Figure 12 - Photo d'un câble d'acier tressé

Malgré leur bonne flexibilité, les câbles d'acier tressé sont fragiles et requièrent d'être minutieux quant au respect du rayon de courbure minimum. Une amélioration au niveau

des œillets a dû être apportée. La forme cylindrique des œillets ne respectait pas le rayon de courbure minimum causant ainsi un vieillissement prématuré du câble. La confection d'œillets paraboliques permet d'imposer un rayon de courbure minimum. La figure 13 présente les photos des œillets alors que la figure 14 présente un dessin de leur forme.

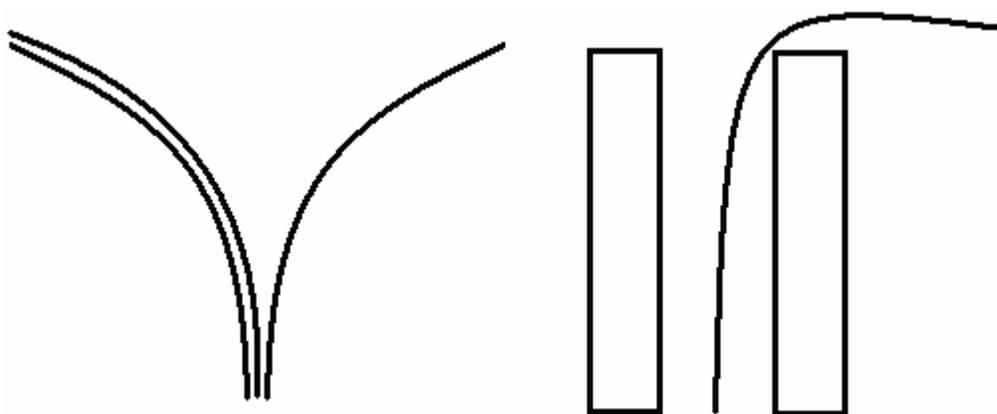


a) Œillet parabolique



b) Œillet cylindrique

Figure 13 - Photo des œillets



a) Œillet parabolique

b) Œillet cylindrique

Figure 14 - Vue de coupe des œillets

Cette forme offre aussi deux autres avantages. Premièrement, elle réduit la friction du câble réduisant l'usure de l'enrobage de nylon du câble. Il est à noter que l'œillet a été confectionné en UHMW (Ultra High Molecular Weight) qui est un polyéthylène qui a un bas coefficient de friction et une grande résistance à l'abrasion et aux impacts. L'utilisation

de l'UHMW permet de réduire encore plus l'usure du revêtement de nylon. Deuxièmement, la forme parabolique permet d'avoir un orifice de très petite taille, ce qui réduit les variations du positionnement du point d'attache du moteur.

Un système de guidage est conçu pour uniformiser l'enroulement du câble. Une étude détaillée sur les gains apportés par les câbles d'acier et par le guide d'enroulement est présentée dans le chapitre sur l'amélioration de la qualité du positionnement.

Finalement, deux dispositifs ont été implantés pour régler les problèmes de perte de tension. Le premier permet de garder la tension dans les câbles lors de la mise hors service du système. Il s'agit d'un rouleau qui appuie sur le cylindre d'enroulement. Le deuxième permet de conserver la tension dans les câbles en tout temps lors du fonctionnement du système. Ce dispositif est une combinaison matérielle et logicielle. Il s'agit d'un capteur permettant de mesurer la tension dans le câble. Le capteur est relié aux nœuds de calcul où un asservissement logiciel est effectué pour limiter la tension dans le câble à une tension minimale lors d'une perte de tension. La figure 15 présente la photo du nouvel enrouleur.

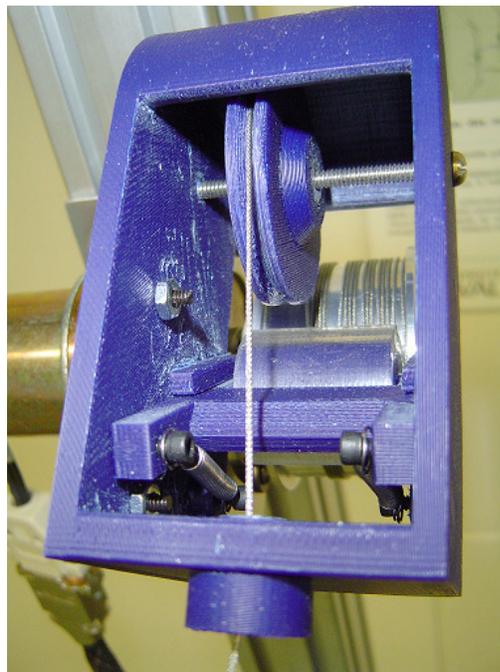


Figure 15 - Photo du nouvel enrouleur

### 2.3.9 Description du capteur de force

Le capteur de force est un dispositif permettant de mesurer les forces et les moments qui lui sont appliqués. Le dispositif utilisé est un capteur du modèle Mini40 de la compagnie ATI. Ce capteur permet de mesurer dans les 3 axes les forces et les moments. Seulement trois de ces six composantes sont utilisées dans le montage à 3 DDL. Ce capteur permet de mesurer des forces dans la plage  $\pm 40$  N selon deux axes et  $\pm 120$  N selon le troisième axe. Pour les moments, la plage est de  $\pm 2$  Nm. La résolution du capteur est de  $1/400$  N pour deux axes, de  $1/200$  N pour le troisième axe et de  $1/32$  Nmm pour les moments. L'encodage est fait sur 16 bits alors que le taux de rafraîchissement est supérieur à 4 kHz, ce qui est nettement suffisant pour l'application de l'interface à 3 DDL. La figure 16 montre le capteur de force.



Figure 16 - Photo du capteur de force

## 2.4 Architecture logicielle

### 2.4.1 L'environnement de développement RT-LAB

La mise en œuvre des algorithmes de contrôle est fait grâce à l'environnement de développement RT-LAB de Opal-RT. RT-LAB permet le développement d'applications d'automatisation avec une interaction matérielle (hardware-in-the-loop). RT-LAB offre des

outils logiciels intégrés au logiciel de conception schématique Simulink de Matlab. Simulink permet le prototypage rapide d'algorithmes de contrôle de façon schématique, alors que RT-LAB permet de transformer ces schémas sous forme de fonctions dans le langage de programmation « C ». L'exécution de ces fonctions compilées se fait de façon plus efficace que l'interprétation des schémas Simulink. De plus, RT-LAB permet une simulation en temps réel en exécutant ces fonctions sur des nœuds de calcul opérant un système d'exploitation en temps réel. RT-LAB gère aussi la communication temps réel entre les nœuds, les interactions d'entrée/sortie avec le matériel et l'ordonnancement des calculs.

L'environnement RT-LAB améliore les performances en offrant la possibilité de paralléliser les calculs en séparant la charge de travail sur les différents nœuds de calcul. L'environnement RT-LAB offre aussi la possibilité d'avoir une console pour l'opérateur qui permet à l'opérateur d'interagir avec la simulation. Cette console permet d'envoyer et de recevoir des informations provenant de la simulation. Toutefois, le respect du temps réel n'est pas garanti, car la communication est faite par un lien Ethernet qui n'est pas en temps réel. L'opérateur peut tout de même envoyer des requêtes de haut niveau à la simulation. La figure 17 permet de voir les différentes interactions de communication inter-nœuds et entre les nœuds et la console.

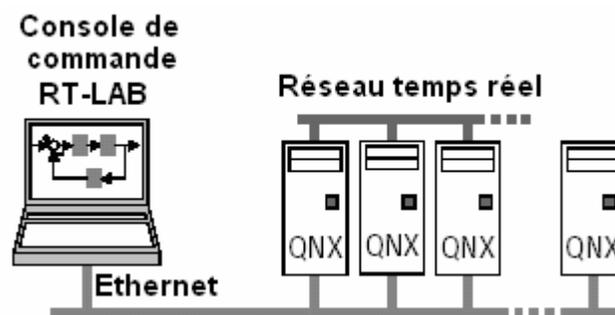


Figure 17 - Architecture de communication RT-LAB  
(source : <http://www.opal-rt.com>)

## **2.5 Conclusion**

Ce chapitre permet de clarifier la solution proposée en élaborant la description et le cahier des charges de l'interface de locomotion idéale à 6 DDL et du prototype à 3 DDL. Il contient aussi une description du contexte matériel et logiciel du système.

Le chapitre suivant va présenter les notions de base qui permettent de comprendre le fonctionnement des algorithmes de contrôle.

## **Chapitre 3**

### **Définitions de base et cinématique**

Dans ce chapitre, les notions de base sur les manipulateurs parallèles entraînés par câbles sont présentées de même que la notation utilisée tout au long de ce mémoire. Les sections généralités, définitions, description du mécanisme, géométrie et cinématique sont largement inspirées des travaux de Cantin [19], Côté [20] et Barette [21].

### 3.1 Généralités

Un manipulateur parallèle est un mécanisme constitué de plusieurs chaînes cinématiques entre une base fixe et un effecteur. À l’opposé, un manipulateur sériel n’est composé que d’une seule chaîne cinématique entre une base fixe et un effecteur. Un manipulateur parallèle entraîné par câbles est donc un manipulateur parallèle dont les chaînes cinématiques reliant la base à l’effecteur incluent des câbles. La principale caractéristique qui distingue ce type de manipulateur des manipulateurs parallèles conventionnels est l’unité de la transmission. En effet, de par leur nature, les câbles ne peuvent travailler qu’en tension. Cette caractéristique inhérente aux câbles leur donne des frontières d’espace atteignable très différentes de celles des manipulateurs parallèles conventionnels de type Gough-Stewart. Un manipulateur parallèle entraîné par câbles est défini par un corps mobile appelé l’effecteur, relié à une base fixe en des points d’attache fixes à la base et sur l’effecteur.

Des hypothèses sont faites dans le cadre de l’analyse des manipulateurs à câbles. Les analyses de mécanismes à câbles considèrent le câble comme une ligne droite. Les déformations dues à la masse du câble ou à d’autres forces externes, par exemple l’aérodynamique, sont négligées. Cette approximation est tout à fait justifiable pour l’analyse de mécanismes ayant des débattements de faibles à moyens. Par ailleurs, les débattements maximum des câbles ne sont pas considérés dans les analyses.

Par convention, les unités du système international (SI) sont utilisées. Sauf avis contraire, le temps, la longueur, la masse, le moment d’inertie, la force et le moment de force sont mesurés en seconde ( $s$ ), mètre ( $m$ ), kilogramme ( $kg$ ), kilogramme-mètre carré ( $kg \cdot m^2$ ), Newton ( $N$ ) et Newton-mètre ( $N \cdot m$ ). Sauf avis contraire, les angles seront exprimés en radians.

Par convention, une lettre minuscule en caractère gras désignera toujours un vecteur tandis qu’une majuscule en caractère gras désignera une matrice. Mis à part certains paramètres

utilisés ponctuellement, chaque symbole sera associé jusqu'à la toute fin à l'entité qu'il désigne. La section suivante présente les symboles utilisés.

## 3.2 Nomenclature

**MV** : Monde virtuel

**MR** : Monde réel.

**PF** : Plate-forme.

$\mathbf{P}_{\text{papf},i}$  : Position du  $i^{\text{ème}}$  point d'attache de la plate-forme. L'acronyme signifie **P**osition du **P**oint d'**A**ttache au niveau de la **P**late-**F**orme.

$\mathbf{P}_{\text{pam},i}$  : Position du point d'attache du  $i^{\text{ème}}$  moteur. L'acronyme signifie **P**osition du **P**oint d'**A**ttache au niveau du **M**oteur.

$\mathbf{P}_{\text{opf}}$  : Position de l'origine de la plate-forme. L'acronyme signifie **P**osition de l'**O**rigine de la **P**late-**F**orme.

$\mathbf{P}_{\text{pcpf},i}$  : Position du  $i^{\text{ème}}$  point de contact de la plate-forme. L'acronyme signifie **P**osition du **P**oint de **C**ontact de la **P**late-**F**orme.

$\mathbf{p}_{\text{papf},i}$  : Vecteur de la position du  $i^{\text{ème}}$  point d'attache de la plate-forme.

$\mathbf{p}_{\text{pam},i}$  : Vecteur de la position du point d'attache du  $i^{\text{ème}}$  moteur.

$\mathbf{p}_{\text{opf}}$  : Vecteur de la position de l'origine de la plate-forme.

$\theta$  : Angle entre le repère plate-forme et le repère monde réel.

$x$  : Position horizontale de l'origine de l'effecteur.

$y$  : Position verticale de l'origine de l'effecteur.

$\mathbf{P}$  : Position de la plate-forme notée :  $P(x, y, \theta)$ .

$\mathbf{P}_m$  : Position mesurée.

$\Delta\mathbf{P}$  : Déplacement de la plate-forme pour un pas de temps.

$[\mathbf{F}_m]_{\text{MR}}$  : Les crochets signifient que la valeur à l'intérieur des crochets est exprimée dans le repère de l'indice des crochets. Ici, on a la force mesurée dans le repère du monde réel.

$\rho_i$  : Distance (longueur de câble) entre le  $i^{\text{ème}}$  point d'attache moteur et le point d'attache plate-forme.

$\tau_i$  : Tension dans le  $i^{\text{ème}}$  câble.

$\tau_{\min}$  : Tension minimum tolérée dans un câble.

$\tau_{\max}$  : Tension maximum tolérée dans un câble.

$\mathbf{F}$  : Force cartésienne à l'effecteur.

$\mathbf{v}$  : Vitesse cartésienne de l'effecteur.

$K_v$  : Facteur de contribution de la vitesse au calcul de  $\Delta\mathbf{P}$ .

$\mathbf{J}$  : Matrice Jacobienne du manipulateur.

$I$  : Courant moteur.

$\mathbf{P}_c$  : Position choisie par le générateur de consignes.

$d$  :  $d$  en indice désigne la valeur désirée. Par exemple  $\tau_d$  désigne la tension désirée.

$m$  :  $m$  en indice désigne la valeur mesurée. Par exemple  $\tau_m$  désigne la tension mesurée.

$\varepsilon$  : Mesure d'erreur entre deux signaux.

$In_c$  : Inertie d'un câble.

$n$  : Nombre de câbles.

$d$  : Nombre de dimensions.

$S$  : Définition d'un segment du monde virtuel

$f_r$  : Coefficient de friction dynamique

### 3.3 Définitions

Les définitions suivantes sont introduites pour faciliter la compréhension du texte du mémoire. Certaines d'entre elles seront clarifiées au moment approprié.

**EFFECTEUR** : Organe terminal d'un mécanisme, d'un robot ou d'un manipulateur.

**MÉCANISME PARALLÈLE** : Mécanisme dont l'effecteur et la base sont reliés par plusieurs chaînes cinématiques.

**REDONDANCE D'ACTIONNEMENT** : Il y a redondance d'actionnement lorsque le nombre d'actionneurs est supérieur au nombre de degrés de liberté. Les actionneurs risquent de travailler de façon antagoniste.

**CONFIGURATION** : État d'un mécanisme ou pose de tous les corps de ce mécanisme. La configuration d'un mécanisme est habituellement définie par ses variables articulaires ou ses variables cartésiennes.

**SINGULARITÉ** : Dégénérescence de la relation entre les vitesses articulaires et les vitesses à l'effecteur d'un manipulateur.

**CONFIGURATION SINGULIÈRE** : Configuration d'un mécanisme pour laquelle celui-ci est en singularité.

**CONDITIONS DYNAMIQUES** : Ensemble des accélérations linéaires et angulaires de l'effecteur. Les conditions dynamiques sont définies par trois paramètres dans le plan  $(\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{\theta})$ .

**CONFIGURATION POLYVALENTE** : Configuration dans laquelle le mécanisme peut résister à tout jeu d'efforts externes ou générer tout jeu d'accélérations à l'effecteur.

**ESPACE ATTEIGNABLE DYNAMIQUE** : Ensemble des configurations du mécanisme permettant de générer les conditions dynamiques requises tout en maintenant les câbles en tension.

### 3.4 Définition de la convention de rotation et de translation

Cette section explique comment sont exprimés les déplacements et les rotations de la plateforme. Pour le système à 6 DDL, les angles de rotation sont l'azimut, le tangage et le roulis. L'axe des x représente la direction arrière-avant, l'axe des y représente la direction droite-gauche alors que l'axe des z représente la direction bas-haut. La figure 18 montre graphiquement cette convention.

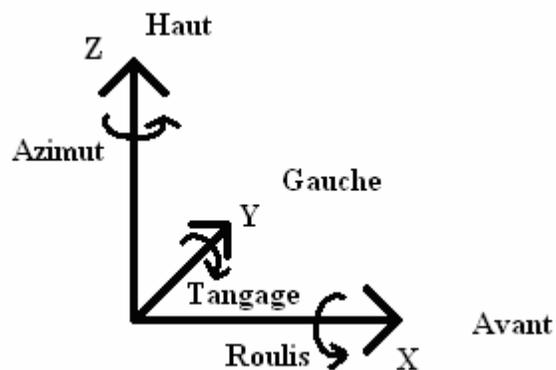


Figure 18 - Convention de rotation et de translation pour le système à 6 DDL

Pour ce qui est du cas en 3 DDL, l'axe des X représente toujours la direction arrière-avant, alors que l'axe des Y représente la direction bas-haut. L'angle  $\theta$  représente l'angle de tangage du système à 6 DDL. La figure 19 présente cette convention.

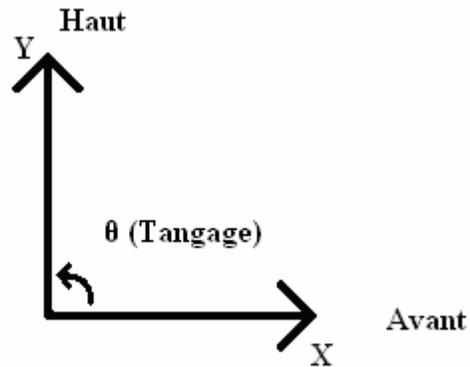


Figure 19 - Convention de rotation et de translation pour le système à 3 DDL

### 3.5 Définition des repères

La section suivante présente les différents repères utilisés. Il est nécessaire de définir trois repères afin d'exprimer toutes les géométries et mesures du système : le repère monde virtuel, le repère monde réel et le repère plate-forme.

#### 3.5.1 Description générale des repères

Le repère *monde virtuel* (MV) permet d'exprimer la géométrie et la localisation des objets et du plancher virtuel. Le monde réel (MR) permet d'exprimer le positionnement des points d'attache moteur ( $P_{pam}$ ) ainsi que le positionnement de la plate-forme dans le monde réel ( $P_{opf}$ ). Le repère plate-forme (PF) permet d'exprimer le positionnement des points d'attache plate-forme ( $P_{papf}$ ) ainsi que les points de contact plate-forme ( $P_{pcpf}$ ). Lors du déplacement de la personne, la plate-forme se déplacera dans le monde réel. Lors du rappel de la personne, le monde réel se déplacera dans le monde virtuel. La figure 20 montre les trois repères.

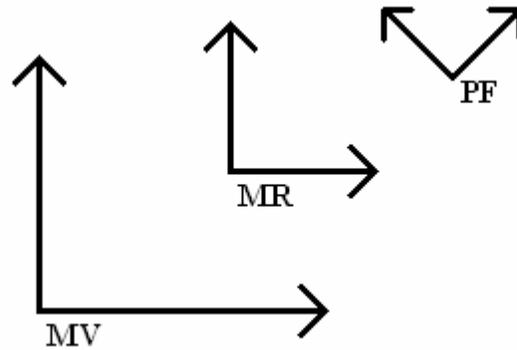


Figure 20 - Description générale des repères

### 3.5.2 Repère plate-forme

Le repère *plate-forme* (PF) permet d'exprimer la géométrie de la plate-forme.  $P_{papf}$  sont les points d'attache des câbles au niveau de la plate-forme. Ces points sont utilisés pour exprimer la position de la plate-forme dans le repère monde réel.  $P_{pcpf}$  sont les points de contact de la plate-forme. Ce sont ces points qui seront utilisés pour la détection de collision. La figure 21 montre le repère plate-forme.

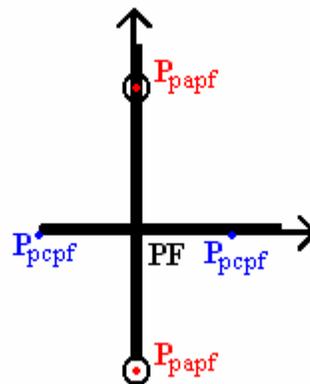


Figure 21 - Description du repère plate-forme

### 3.5.3 Repère monde réel

Le repère *monde réel* (MR) permet d'exprimer le positionnement des points d'attache moteur ( $P_{\text{pam}}$ ) ainsi que la position et l'orientation de la plate-forme. Le repère monde réel est le repère fixe que représente la cage de métal sur laquelle les moteurs sont posés. L'origine de ce repère se trouve sur la feuille quadrillée du montage à 3 DDL montrée au chapitre 2 à la figure 2a. La figure 22 montre le repère monde réel.

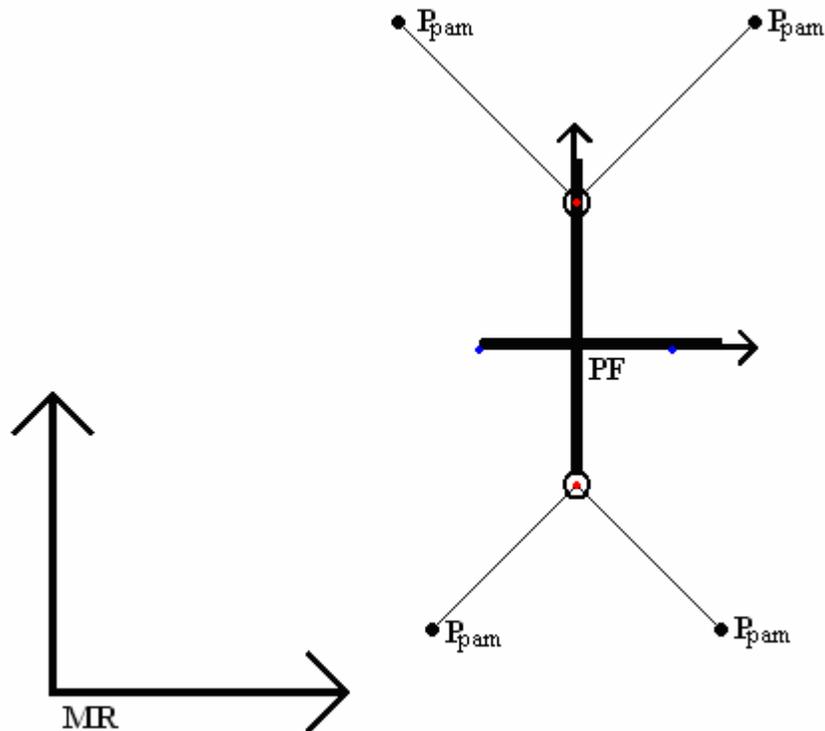


Figure 22 - Description du repère monde réel

### 3.5.4 Repère monde virtuel

Le repère monde virtuel (MV) permet d'exprimer la topographie du plancher virtuel. Le plancher est constitué d'une succession de segments linéaires. Ils sont définis par leurs extrémités ( $x_{\text{min}}$ ,  $x_{\text{max}}$ ) et leur pente. La figure 23 montre le repère monde virtuel.

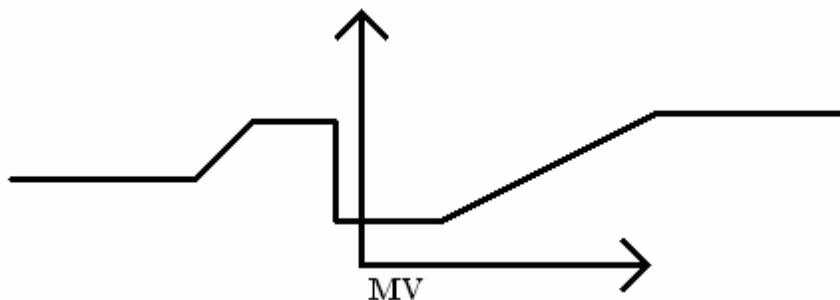


Figure 23 - Description du repère monde virtuel

### 3.5.5 Relation entre le monde virtuel et le monde réel

Le positionnement du repère monde réel dans le monde virtuel permet de calculer le positionnement des plates-formes dans le monde virtuel. En connaissant la position de la plate-forme dans le monde réel ainsi que la position du monde réel dans le monde virtuel, il est possible de déduire la position de la plate-forme dans le monde virtuel. Lorsque la personne se déplace dans le monde réel, son avatar se déplace aussi.

Du point de vue de la réalité virtuelle, lorsqu'il y a rappel de la personne, le repère monde réel se déplace dans le monde virtuel. La figure 24 montre la relation entre le monde virtuel et le monde réel.

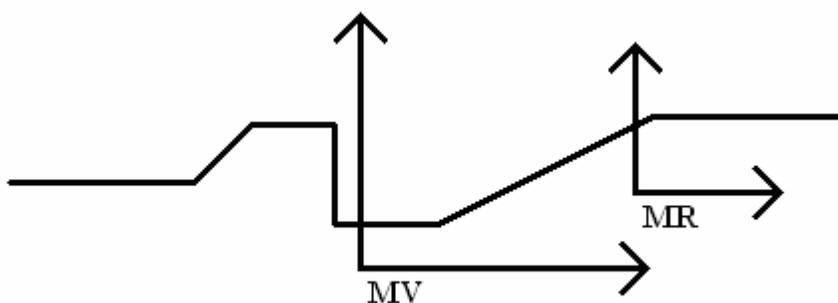


Figure 24 - Relation entre le monde virtuel et le monde réel

Du point de vue de la génération de consigne des plates-formes, lorsqu'il y a rappel, c'est le monde virtuel qui se déplace dans le monde réel, i.e. : le plancher virtuel défile dans le monde réel. La figure 25 montre le monde virtuel du point de vue de la génération de consigne.

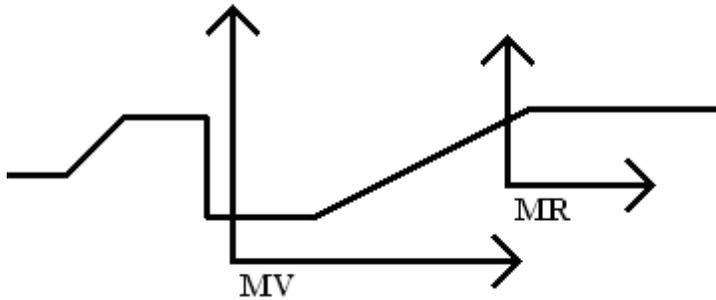


Figure 25 - Monde virtuel du point de vue de la génération de consigne

### 3.6 Description du mécanisme

On désigne par  $\mathbf{P}_{\text{pam},i}$  le  $i^{\text{ème}}$  point d'attache du moteur, par  $\mathbf{P}_{\text{papf},i}$  le  $i^{\text{ème}}$  point d'attache sur la plate-forme et par  $\mathbf{P}_{\text{opf}}$ , l'origine de la plate-forme. L'axe Y du repère fixe est considéré vertical et la notation suivante est utilisée pour la figure 26 :

$\mathbf{p}_{\text{pam},i}$  : Vecteur position du point  $\mathbf{P}_{\text{pam},i}$ ,

$\mathbf{p}_{\text{papf},i}$  : Vecteur position du point  $\mathbf{P}_{\text{papf},i}$ ,

$\mathbf{p}_{\text{opf},i}$  : Vecteur position du point  $\mathbf{P}_{\text{papf},i}$ ,

$\rho_i$  : Distance entre  $\mathbf{P}_{\text{pam},i}$  et  $\mathbf{P}_{\text{papf},i}$ ,

$\theta$  : Angle d'orientation du repère plate-forme par rapport au repère monde réel,

$\mathbf{Q}$  : Matrice qui définit l'orientation du repère plate-forme par rapport au repère monde réel exprimée par :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}.$$

La configuration de l'effecteur est entièrement définie par le vecteur  $\mathbf{p}_{opf}$  et la matrice  $\mathbf{Q}$ .

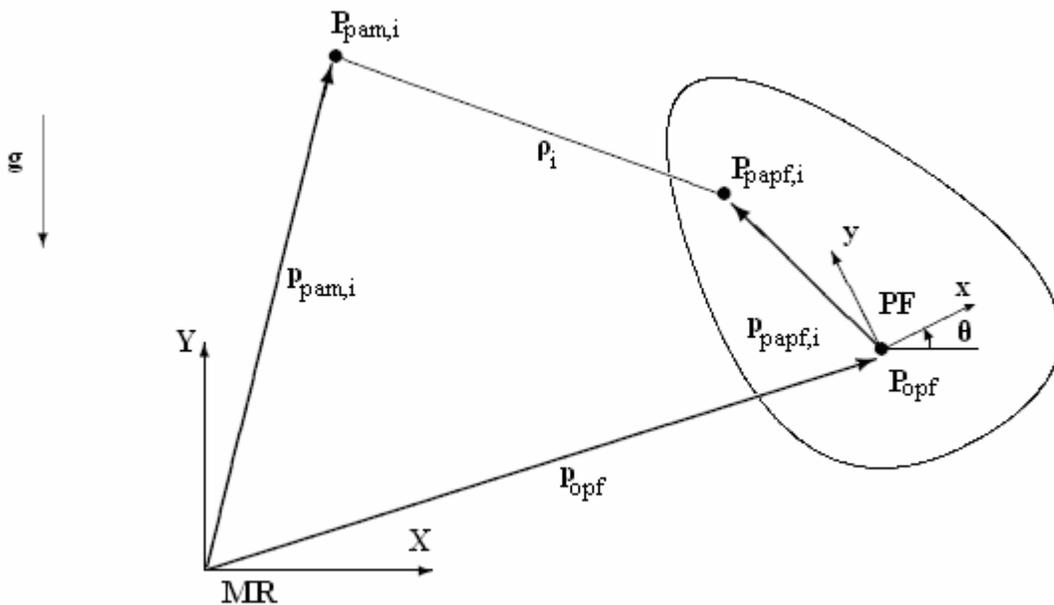


Figure 26 - Notation pour la liaison  $i$  d'un mécanisme spatial.

## 3.7 Géométrie et cinématique

### 3.7.1 Problème géométrique inverse (PGI)

La géométrie et la cinématique générale des manipulateurs parallèles actionnés par câbles sont maintenant traitées. Tout d'abord, comme c'est en général le cas pour les mécanismes parallèles conventionnels, le problème géométrique inverse (PGI) des manipulateurs parallèles actionnés par câbles est simple. Pour une position et une orientation données de l'effecteur, il est possible d'exprimer la position des points d'attache sur la plate-forme dans le repère monde réel. Par la suite, il est possible de déduire les longueurs respectives de chaque lien actionné en calculant la distance entre les points d'attache moteur et les points d'attache plate-forme.

Par souci de clarté dans le développement suivant, les notations  $\mathbf{p}_{\text{opf}}$ ,  $\mathbf{p}_{\text{pam}}$  et  $\mathbf{p}_{\text{papf}}$  sont remplacées par les notions  $\mathbf{c}$ ,  $\mathbf{m}$  et  $\mathbf{f}$  respectivement.

Dans le cas général, le PGI s'exprime :

$$\begin{aligned}\rho_i &= \|\mathbf{c} + \mathbf{Q}\mathbf{f}_i - \mathbf{m}_i\|, \\ \rho_i^2 &= (\mathbf{c} + \mathbf{Q}\mathbf{f}_i - \mathbf{m}_i)^T (\mathbf{c} + \mathbf{Q}\mathbf{f}_i - \mathbf{m}_i), \\ \rho_i^2 &= \mathbf{c}^T \mathbf{c} + 2\mathbf{c}^T \mathbf{Q}\mathbf{f}_i - 2\mathbf{c}^T \mathbf{m}_i + (\mathbf{Q}\mathbf{f}_i)^T \mathbf{Q}\mathbf{f}_i - 2\mathbf{m}_i^T \mathbf{Q}\mathbf{f}_i + \mathbf{m}_i^T \mathbf{m}_i, \\ \rho_i^2 &= \mathbf{c}^T \mathbf{c} + 2\mathbf{c}^T \mathbf{Q}\mathbf{f}_i - 2\mathbf{c}^T \mathbf{m}_i + \mathbf{f}_i^T \mathbf{f}_i - 2\mathbf{m}_i^T \mathbf{Q}\mathbf{f}_i + \mathbf{m}_i^T \mathbf{m}_i.\end{aligned}\quad (3.1)$$

### 3.7.2 Équations de vitesse et matrice Jacobienne

On peut simplement dériver l'équation (3.1) pour obtenir les relations entre les vitesses. En dérivant par rapport au temps, on obtient, pour chaque actionneur l'équation :

$$\rho_i \dot{\rho}_i = \mathbf{c}^T \dot{\mathbf{c}} + \mathbf{c}^T \dot{\mathbf{Q}}\mathbf{f}_i + (\mathbf{Q}\mathbf{f}_i)^T \dot{\mathbf{c}} - \mathbf{m}_i^T \dot{\mathbf{c}} - \mathbf{m}_i^T \dot{\mathbf{Q}}\mathbf{f}_i, \quad (3.2)$$

où  $\dot{\rho}_i$  est le taux de variation de la longueur de la liaison  $i$ , c'est-à-dire la vitesse articulaire.

L'équation (3.2) représente un système de  $n$  équations linéaires où  $n$  représente le nombre d'articulations qui peut être exprimé sous la forme matricielle suivante :

$$\mathbf{A}\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{B}\mathbf{t}, \quad (3.3)$$

Dans cette relation,  $\dot{\boldsymbol{\rho}}$  est le vecteur des vitesses articulaires,  $\mathbf{t}$  est le vecteur des vitesses cartésiennes de l'effecteur comprenant les translations et les rotations.  $\mathbf{A}$  et  $\mathbf{B}$  représentent les matrices Jacobiennes du système. On a d'abord :

$$\dot{\boldsymbol{\rho}} = [\dot{\rho}_1 \quad \dot{\rho}_2 \quad \dots \quad \dot{\rho}_n]^T, \quad (3.4)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \rho_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \rho_2 & & 0 \\ & & \ddots & \\ 0 & 0 & & \rho_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & & 0 & \rho_n \end{bmatrix}_{n \times n}, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_1^T \\ \mathbf{b}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{b}_{n-1}^T \\ \mathbf{b}_n^T \end{bmatrix}_{n \times d}, \quad (3.6)$$

où  $d$  est le nombre de degrés de liberté du manipulateur.

Maintenant, les matrices  $\mathbf{B}$  et  $\mathbf{t}$  vont être définies. Dans un espace à deux dimensions, la matrice de rotation est :

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, \quad (3.7)$$

et sa dérivée par rapport au temps est

$$\dot{\mathbf{Q}} = \mathbf{E}\mathbf{Q}\dot{\theta}, \quad (3.8)$$

où

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

L'équation (3.2) devient donc :

$$\begin{aligned} \rho_i \dot{\rho}_i &= \mathbf{c}^T \dot{\mathbf{c}} + \mathbf{c}^T \mathbf{E} \mathbf{Q} \mathbf{f}_i \dot{\theta} + (\mathbf{Q} \mathbf{f}_i)^T \dot{\mathbf{c}} + -\mathbf{m}_i^T \dot{\mathbf{c}} - \mathbf{m}_i^T \mathbf{E} \mathbf{Q} \mathbf{f}_i \dot{\theta}, \\ \rho_i \dot{\rho}_i &= (\mathbf{c} + \mathbf{Q} \mathbf{f}_i - \mathbf{m}_i)^T \dot{\mathbf{c}} + (\mathbf{c} - \mathbf{m}_i)^T \mathbf{E} \mathbf{Q} \mathbf{f}_i \dot{\theta}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

La rangée  $\mathbf{b}_i^T$  de la matrice  $\mathbf{B}$  et le vecteur  $\mathbf{t}$  de (3.3) sont :

$$\mathbf{b}_i^T = [(\mathbf{c} + \mathbf{Q}\mathbf{f}_i - \mathbf{m}_i)^T \quad (\mathbf{c} - \mathbf{m}_i)^T \mathbf{E}\mathbf{Q}\mathbf{f}_i]_{1 \times 3}, \quad (3.10)$$

$$\mathbf{t} = [\dot{x} \quad \dot{y} \quad \dot{\theta}]. \quad (3.11)$$

### 3.7.3 Dualité cinématique/statique

À partir de l'équation (3.3), on déduit :

$$\begin{aligned} \dot{\boldsymbol{\rho}} &= \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\mathbf{t}, \\ \dot{\boldsymbol{\rho}} &= \mathbf{J}\mathbf{t}, \end{aligned} \quad (3.12)$$

Selon le principe de la dualité cinématique/statique tel qu'énoncé par Gosselin [22], on peut dire que :

$$\mathbf{F}^T \mathbf{t} = \boldsymbol{\tau}^T \dot{\boldsymbol{\rho}} \quad (3.13)$$

où  $\boldsymbol{\tau}$  est le vecteur des tensions dans le câbles.

En remplaçant l'équation (3.12) dans l'équation (3.13), on obtient

$$\mathbf{F}^T \mathbf{t} = \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{J}\mathbf{t}$$

et puisque cette équation doit être valide pour toute valeur de  $\mathbf{t}$ , on a

$$\mathbf{F}^T = \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{J}. \quad (3.14)$$

De l'équation (3.14), on dégage l'équation suivante :

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau} \quad (3.15)$$

Cette équation montre que la matrice Jacobienne définit la relation entre les efforts articulaires et les efforts cartésiens à la plate-forme. Dans le cas où  $n > d$ , ce qui est le cas pour un mécanisme à quatre câbles dans le plan, le système d'équations (3.15) est sous-déterminé. Il existe donc une infinité de solutions pour  $\boldsymbol{\tau}$  correspondant à une valeur de  $\mathbf{F}$  donnée.

Une façon de calculer  $\boldsymbol{\tau}$  avec l'équation (3.15), est d'utiliser l'inverse généralisé de  $(\mathbf{J}^T)^I$  tel que décrit par Gosselin [23] :

$$\boldsymbol{\tau} = (\mathbf{J}^T)^I \mathbf{F}, \quad (3.17)$$

où

$$(\mathbf{J}^T)^I = \mathbf{J}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1}.$$

On en déduit que

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}(\mathbf{J}^T \mathbf{J})^{-1} \mathbf{F}. \quad (3.18)$$

Cette solution correspond à la solution à norme minimale pour  $\boldsymbol{\tau}$ .

Étant donné que les actionneurs d'un mécanisme à câbles ne peuvent travailler qu'en traction, il faut inclure dans le calcul de  $\boldsymbol{\tau}$  des contraintes d'inégalité afin d'assurer une tension minimale et maximale dans chaque câble. Pour solutionner ce problème, il est possible d'utiliser la programmation quadratique. Le détail de l'algorithme de programmation quadratique est présenté en annexe D.

### 3.8 Conclusion

Le présent chapitre présentait les différentes notions qui permettront de comprendre le chapitre suivant : l'architecture logicielle.

## **Chapitre 4**

### **Architecture logicielle et algorithmes de commande**

Ce chapitre présente l'architecture logicielle ainsi que les algorithmes de commande utilisés pour réaliser le prototype à 3 DDL. Tout d'abord, le chapitre présente un survol des différents composants logiciels. Le chapitre présente ensuite l'explication des algorithmes utilisés. Finalement, il présente la mise en œuvre des différents composants logiciels et des algorithmes de commande.

## 4.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents aspects de l'architecture logicielle. La contribution de ce mémoire au niveau de la commande repose sur les algorithmes de haut niveau, sur la commande hybride alternative ainsi que sur la génération de consigne. Comme l'objectif du mémoire est de démontrer la faisabilité de la mise en œuvre globale du prototype, le réglage des contrôleurs n'est pas présenté en détail. Pour une première mise en œuvre du prototype, il n'était pas nécessaire d'obtenir des contrôleurs performants, mais plutôt des contrôleurs fonctionnels. Il est toutefois important de mentionner que le réglage des contrôleurs a été effectué en suivant la méthodologie suivante : étude du procédé, identification et validation des modèles, choix de la structure de commande, design des contrôleurs et tests en simulation ainsi que l'implantation sur le vrai système des contrôleurs et validation.

## 4.2 Explication du schéma de commande général

Le schéma présenté à la figure 27 montre une vue globale du système de commande.

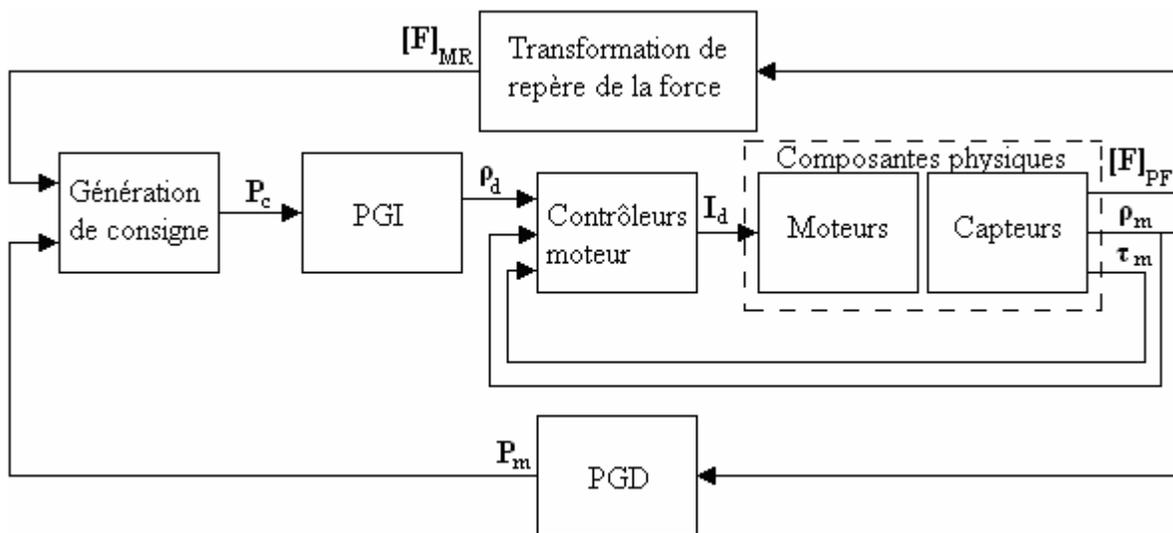


Figure 27 - Schéma de contrôle global

Les moteurs sont les éléments à contrôler. Ce sont eux qui agissent sur le mécanisme à câbles. Les sorties du système sont les courants ( $I_d$ ) fournis aux moteurs et calculés par les contrôleurs moteurs. Les entrées du système sont les forces appliquées à l'effecteur ( $[F]_{PF}$ ), les mesures de longueur ( $\rho_m$ ) et les tensions mesurées dans les câbles ( $\tau_m$ ). L'information sur les longueurs de câbles et les tensions dans les câbles est utilisée pour calculer le courant nécessaire afin d'atteindre les consignes en longueur de câble ( $\rho_d$ ) tout en respectant les contraintes en tension  $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ . Les consignes en longueur de câble sont calculées à l'aide du PGI qui transforme la consigne en position du domaine cartésien au domaine articulaire. Cette consigne en position ( $P_c$ ) dans le domaine cartésien est calculée en fonction de la position mesurée de la plate-forme ( $P_m$ ) et des forces appliquées à l'effecteur ( $[F]_{MR}$ ). La consigne est aussi influencée par la présence d'objets virtuels à proximité de l'effecteur. Les forces appliquées à l'effecteur sont calculées à partir des forces mesurées par le capteur ( $[F]_{MR}$ ) en effectuant une transformation de repère. Le calcul de la position dans le domaine cartésien est effectué grâce au calcul du problème géométrique direct (PGD). Le module encadré en pointillé est la partie réelle du système, soit les moteurs et la plate-forme. Il est possible de remplacer ce module par un modèle de la physique des câbles et de la plate-forme à des fins de simulation.

## **4.3 Explication des principes sous-jacents aux algorithmes de contrôle**

### **4.3.1 Commande hybride**

Cette section présente le concept de commande hybride. Elle est présentée à titre indicatif puisque aucune commande hybride n'est, proprement dit, implantée dans le système de contrôle. Par contre, le système de contrôle en position de la plate-forme imite le comportement d'une commande hybride.

La commande hybride sous-entend deux concepts : la commande en position et la commande en force nulle. La commande en position est utilisée pour prescrire des positions

à l'effecteur. Les consignes en position dictent le déplacement de l'effecteur d'une position à l'autre ou maintiennent l'effecteur dans une position. La commande en position permet donc de contraindre le déplacement des plates-formes. La commande en force nulle permet de reproduire à la plate-forme les forces appliquées par l'utilisateur selon la force qu'il transmet au capteur de force. De cette façon, l'utilisateur ne sent pas l'inertie de la plate-forme et des câbles. La commande en force sert donc à aider au déplacement de la plate-forme.

La commande hybride permet de combiner le potentiel des deux modes de commande. Lorsqu'il faut contraindre le mouvement de la plate-forme, le système fait de la commande en position. À l'inverse, le système fait de la commande en force nulle lorsqu'il faut aider le mouvement de la plate-forme. Par ailleurs, la sélection du type de commande ne se fait pas identiquement selon tous les degrés de liberté, car il est possible de limiter le déplacement dans une direction et d'aider le déplacement dans une autre. Par exemple, lorsqu'un pied est sur la surface d'un plancher, il ne peut pas se déplacer dans la direction normale au plancher alors qu'il peut se déplacer dans la direction tangentielle au plancher. Le pied peut donc glisser sur la surface du plancher. Dans ce cas, il y a un contrôle en position dans l'axe vertical vers le bas et un contrôle en force dans toutes les autres directions.

Le choix de commande est fait grâce à un module de génération de consigne qui dépend de la position des pieds dans l'environnement virtuel. Avec les algorithmes de détection de collision, il est possible de déterminer les axes pour lesquels il faut contraindre le déplacement et les axes pour lesquels il faut favoriser ce déplacement.

### **4.3.2 Génération de consigne**

Cette section décrit comment la génération de consigne est gérée par le système. Il ne s'agit pas de commande hybride, mais plutôt d'une imitation du comportement de celle-ci. Il faut aider le déplacement de la plate-forme lorsque l'environnement le permet et limiter le déplacement de la plate-forme lorsque celle-ci entre en interférence avec celui-ci. Dans ce cas-ci, la génération de consigne se résume en une prédiction du comportement de la

position de la plate-forme en fonction de sa position courante, des intentions de l'utilisateur mesurées par le capteur de force et des informations sur le monde virtuel.

Dans la mise en œuvre, il n'y a pas de contrôle en force. Tel que pour la commande en position dans le domaine cartésien, la commande en force nécessite une bonne maîtrise de la tension dans les câbles. Comme le prototype courant ne permet pas une maîtrise adéquate, il est plus facile de procéder avec un contrôle total en position. Le système fonctionne toujours en contrôle en position, c'est-à-dire que la position de la plate-forme est maintenue à la consigne en position. Toutefois, l'information fournie par le capteur d'effort est utilisée pour générer les changements de consigne en position. Le contrôle est donc un contrôle en position dont les consignes sont prescrites grâce à la connaissance des efforts appliqués à la plate-forme. Par exemple, lorsque l'utilisateur désire déplacer son pied, et par conséquent la plate-forme, il applique une force à la plate-forme qui peut être mesurée par le capteur. Le vecteur de force mesuré est orienté dans la direction où il désire déplacer son pied et sa norme est proportionnelle à la vitesse à laquelle il veut le déplacer. Quand il veut déplacer son pied lentement, la force est petite alors que lorsqu'il veut déplacer son pied rapidement, cette force est grande. Ce vecteur de force est utilisé pour mettre à jour la consigne en position de la plate-forme. La consigne en position est actualisée dans la direction du vecteur de force et proportionnellement à la norme du vecteur. Plus la force est grande, plus la plate-forme est déplacée. En utilisant les forces appliquées à la plate-forme, il est possible de calculer un déplacement. La formule 4.1 permet d'exprimer le déplacement dans le temps d'un corps en fonction de sa vitesse et de son accélération :

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2} . \quad 4.1$$

Cette équation n'est valide que pour un mouvement uniformément accéléré. Comme l'environnement logiciel fonctionne dans le domaine discret, l'hypothèse suivante a été posée : le mouvement est uniformément accéléré pour chaque pas de temps.

De plus, l'équation 4.2 permet d'exprimer la relation entre la force et l'accélération :

$$F=ma. \quad 4.2$$

Les deux hypothèses suivantes sont faites. L'environnement de simulation fonctionne avec un pas de simulation fixe, le temps écoulé entre deux pas de temps est donc  $\Delta t$ . De plus, l'accélération est considérée constante pendant ce pas de temps. Il est possible d'utiliser ces équations pour calculer  $x_{t+1}$ , la position au pas de temps suivant. En appliquant ces hypothèses, l'équation 4.1 devient :

$$x_{t+1} = x_t + v_t \Delta t + \frac{a_t (\Delta t)^2}{2}, \quad 4.3$$

et en isolant l'accélération dans l'équation 4.2, et la remplaçant dans l'équation 4.3, on obtient :

$$x_{t+1} = x_t + v_t \Delta t + \frac{F_t (\Delta t)^2}{2m},$$

où  $x_t$ ,  $v_t$  et  $F_t$  sont la position et la vitesse de la plate-forme ainsi que la force appliquée à la plate-forme au début d'un pas de temps.

Le déplacement entre deux pas de temps devient donc

$$\Delta x_t = x_{t+1} - x_t = v_t \Delta t + \frac{F_t (\Delta t)^2}{2m} \quad 4.4$$

En réalité, il existe une force de frottement dynamique. Ce frottement dynamique est fonction de la vitesse de la plate-forme. Ce frottement est causé par les divers frottements dans le système, plus particulièrement au niveau des enrouleurs. Afin de mieux représenter

la réalité, l'équation 4.5 est utilisée au lieu de l'équation 4.2. L'équation 4.4 devient la suivante :

$$F = ma - f_r, \quad 4.5$$

$$\Delta x = v_0 \Delta t + \frac{(F + f_r)(\Delta t)^2}{2m}. \quad 4.6$$

Cette stratégie de mise à jour de déplacement est utilisée lorsque la plate-forme n'est pas en interférence avec un objet du monde virtuel. Le comportement est le même que pour une commande en force, mais il est implanté en toute simplicité par une commande en position.

Lorsque la plate-forme entre en contact avec son environnement virtuel, il faut déplacer la plate-forme en restant cohérent avec celui-ci. Le système doit empêcher les déplacements de la plate-forme, qui la feraient traverser un objet. Par exemple, si l'utilisateur applique une force dans la direction du plancher, le système empêche la plate-forme de continuer dans cette direction en ignorant la force appliquée sur le capteur. Le comportement résultant est le même que pour la commande en position dans la stratégie de la commande hybride.

L'asservissement en position est constant dans la direction du plancher et c'est ainsi que l'utilisateur peut sentir l'environnement virtuel. La plate-forme est maintenue immobile dans la direction du plancher, mais peut tout de même glisser à sa surface. Le comportement final est le même que pour la stratégie de la commande hybride. Voici maintenant un exemple montrant comment est mise à jour la position de la plate-forme lorsqu'elle est à proximité d'un plancher virtuel.

À partir de la force mesurée ( $[F_m]_{MR}$ ) et de la position courante ( $P_m$ ), il est possible de calculer la position qu'atteindrait le pied ( $P_d$ ) s'il était dans le vide (sans présence d'environnement) pendant le pas de simulation suivant. L'équation décrit le calcul de  $P_d$  :

$$P_d = v_0 \Delta t + \frac{(F + f_r)(\Delta t)^2}{2m} + P_m. \quad 4.7$$

Si  $P_d$  est une position pour laquelle la plate-forme est en interférence avec son environnement, il faut la corriger afin de rester cohérent avec l'environnement. Il s'agit de trouver à quel moment à l'intérieur du pas de simulation suivant et la partie de la plate-forme qui entre en contact avec l'environnement. Le moment et la partie de la plate-forme sont représentés par la position  $P_c'$ . Au lieu de prescrire la consigne  $P_d$  à l'effecteur, le système prescrit la position  $P_c'$ , qui est montrée à la figure 28.

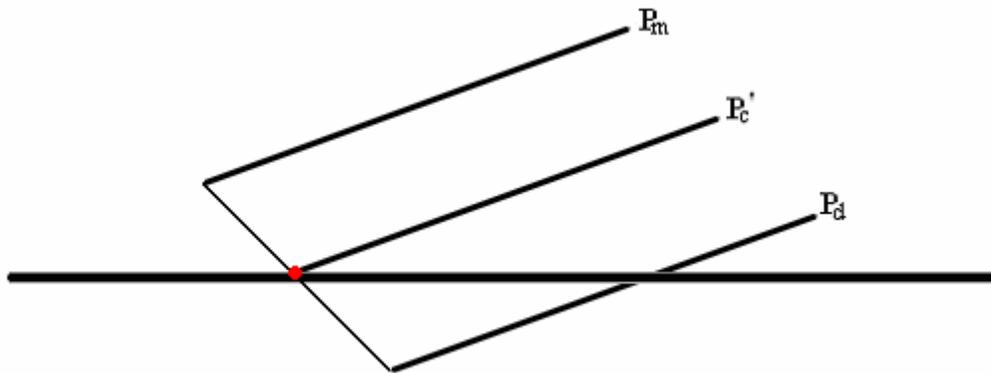


Figure 28 - Prédiction de la position  $P_c'$

Dans ce cas simple, il est facile de prédire  $P_c'$ . Cependant, il existe plusieurs cas complexes, comme le cas où la plate-forme fait une rotation. Afin de réduire le calcul de la consigne en position, une simplification est apportée. La consigne en position  $P_c$  est calculée en déplaçant  $P_d$  dans la direction normale au plancher jusqu'à ce que la totalité de la plate-forme soit au-dessus du plancher, tel que montré à la figure 29.

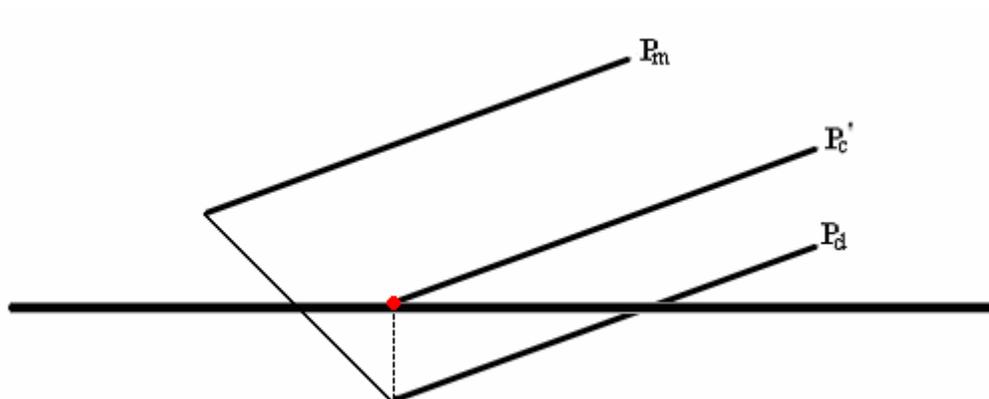


Figure 29 - Prédiction de la position  $P_c$

La différence entre  $P_c'$  et  $P_c$  est montrée sur la figure suivante.

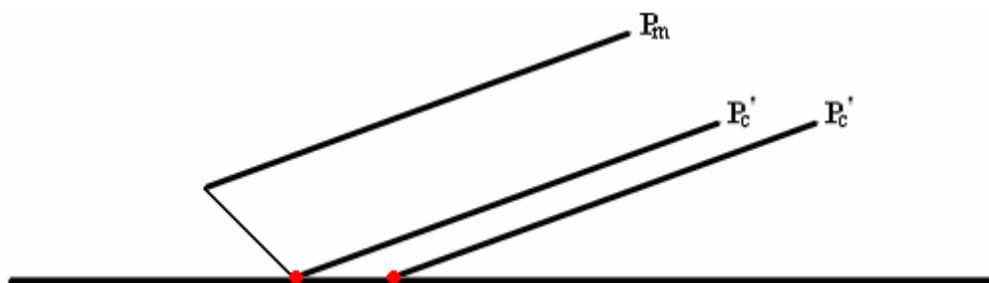


Figure 30 - Erreur entre la Position  $P_c'$  et  $P_c$

Cette différence est très petite puisque le temps qui s'écoule entre deux pas de simulation est très petit. En utilisant une fréquence de simulation de 500 Hz, le temps entre deux pas de simulation est de 2 ms. Le déplacement que le pied peut accomplir en ces 2 ms est donc très petit. Tel que mentionné dans les spécifications du système au chapitre 2, la vitesse maximale d'un pied lors de la marche est de 4 m/s. En 2 ms, un pied peut donc parcourir 8 mm. L'erreur entre  $P_c'$  et  $P_c$  dans l'exemple précédent, serait d'environ 3 mm horizontalement. Pour le prototype à 3 DDL, la vitesse maximale ne dépasse pas 1 m/s, ce qui conduit à une erreur maximale de 0,75 mm. Dans un cas plus général, la vitesse est d'environ 0,25 m/s, ce qui présente une erreur de 0,1875 mm. Les résultats présentés au chapitre 6 montrent que les sensations du plancher virtuel sont très bonnes malgré cette

simplification. Il faut noter que si la fréquence de simulation était augmentée, cette erreur serait diminuée proportionnellement à l'augmentation de fréquence.

Dans le schéma de contrôle, ces fonctions sont implantées par le module « génération de consigne ». La section 4.4.1 explique le fonctionnement du générateur de consigne tel qu'il a été implanté.

### **4.3.3 Contrôle de la position cartésienne de la plate-forme basé sur un contrôle articulaire**

Le contrôle en position peut être effectué dans le domaine articulaire ou dans le domaine cartésien. Cantin [19] suggère d'utiliser un contrôle en position dans le domaine articulaire plutôt que dans le domaine cartésien, car le contrôle de ce dernier n'est pas robuste. En effet, le contrôle dans le domaine cartésien utilise la position dans le domaine cartésien comme rétroaction et utilise les forces dans les câbles comme actionnement. Or, la position dans le domaine cartésien est évaluée par le PGD, qui n'est pas toujours un calcul stable et les forces dans les câbles ne sont pas toujours bien contrôlées. Malgré l'utilisation de capteurs de tension, il reste une erreur de mesure car il n'est pas facile de prescrire des forces dans les câbles. Finalement, cette commande est dite couplée étant donné que la position cartésienne est fonction de la longueur de chaque câble.

L'asservissement en position dans le domaine articulaire fonctionne comme suit. Connaissant la position cartésienne désirée de l'effecteur, et connaissant la position des points d'attache des moteurs et de l'effecteur, il est possible de calculer les longueurs de câble nécessaires pour prescrire la position désirée à l'effecteur. L'asservissement au niveau articulaire offre plusieurs avantages. Ce type d'asservissement est très facile à implanter et très robuste. Il se résume à asservir des moteurs en position angulaire tel que décrit par Desbiens [27]. De plus, le contrôleur en position effectue un asservissement des longueurs de câble de façon découplée. Si le système est parfaitement calibré, l'asservissement est pratiquement découplé.

En travaillant dans le domaine articulaire, il est facile de contrôler la position de la plate-forme sans aucune connaissance des forces appliquées dans les câbles. Il est donc possible d'utiliser des moteurs de qualité moyenne pour effectuer un contrôle en position de qualité.

#### **4.3.4 Conclusion**

L'utilisation de la stratégie de contrôle par prédiction du déplacement de la plate-forme offre plusieurs avantages. Premièrement, il s'agit d'une solution très simple. Elle est plus facile à mettre en œuvre que la commande hybride et que le contrôle dans le domaine cartésien. La réalisation d'un contrôle articulaire est très simple et offre un contrôle en position performant et précis. L'utilisation de la prédiction et du contrôle en position dans le domaine articulaire permet d'obtenir une solution qui ne permet aucun dépassement. Le système empêche systématiquement tout déplacement invalide. Finalement, il offre une grande stabilité. Il n'arrive jamais que le système s'emballé, car tous les calculs sont stables et exacts. Il n'y a aucune notion de singularité.

### **4.4 Explication détaillée des algorithmes de contrôle**

Cette section décrit en détail la façon dont sont implantées les différentes stratégies de commande.

Tel que discuté dans le deuxième chapitre, la mise en œuvre logicielle se fait grâce à l'environnement de développement RT-LAB et Simulink. Cet environnement permet de gérer l'ordonnancement des calculs avec un pas de simulation fixe. Le pas utilisé est de 2 ms, soit une fréquence de calcul de 500 Hz. Comme les applications haptiques requièrent en général des taux supérieurs à 300 Hz, ce taux est suffisant.

#### 4.4.1 Génération de consigne

Comme il a été mentionné dans la section précédente, la prédiction du déplacement suit l'équation 4.6. En pratique,  $f_r$  n'est pas une valeur constante, mais est plutôt une fonction de la vitesse de la plate-forme. Comme il est difficile d'estimer la forme de cette fonction, une table de correspondance (look-up table) peut être utilisée. Cette table de correspondance peut être construite avec un processus d'essai erreur selon les sensations à l'effecteur pour une plage de vitesse. De plus, le facteur de vitesse n'est pas exactement utilisé comme dans l'équation 4.6. En effet, il a été remarqué que si la totalité de la vitesse était utilisée pour le calcul du  $\Delta P$ , le système aurait trop d'inertie. Une portion de la vitesse  $v_0$  est donc utilisée. Un gain  $K_v$  représente cette portion. Tout comme la table de correspondance, ce gain doit être ajusté empiriquement. Un gain trop grand donne une inertie qui fait tendre l'objet à rester en mouvement, alors qu'un gain trop faible fait tendre l'objet à rester immobile. Cette façon de faire permet d'intégrer dans le système la perte de vitesse occasionnée par les forces de frottement statique et dynamique qu'un pied subit lors de son déplacement. Dans un système plus évolué, il faudrait modéliser ces forces et les intégrer aux calculs, tel que montré à l'équation 4.5. De cette façon, la totalité de  $v_0$  pourrait être utilisée et la table de correspondance pour  $f_r$  pourrait être omise. La figure 31 montre le détail du module « génération de consigne » de la figure 27.

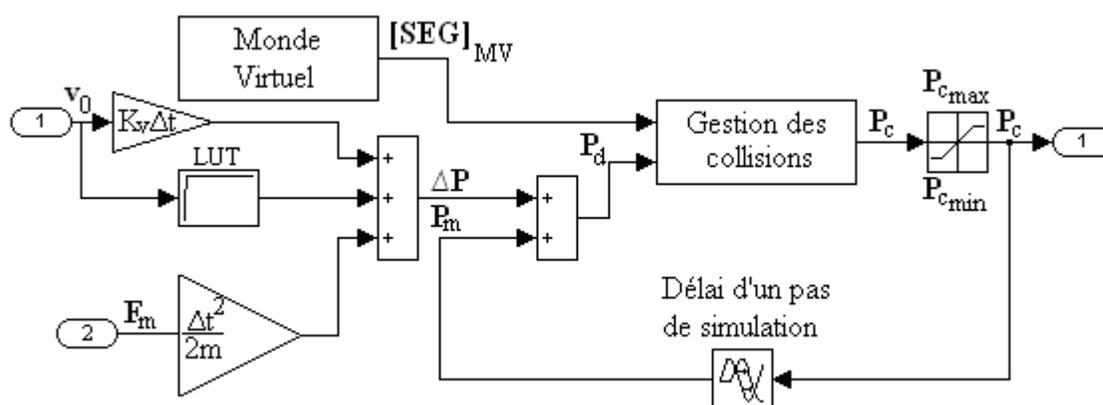


Figure 31 - Schéma détaillé du générateur de consigne

De plus, une saturation au niveau du débattement linéaire et angulaire a été ajoutée afin d'augmenter la stabilité du système. Le déplacement de la plate-forme est limité à  $\pm 0,5$  m horizontalement, à  $\pm 0,15$  m verticalement et à  $\pm 45$  degrés en rotation. Ces limitations sont cohérentes avec les spécifications du système, car la plate-forme est maintenue dans l'espace des configurations polyvalentes. La façon d'implanter cette limitation est de ne pas accepter un  $P_c$  à l'extérieur de ces bornes malgré la valeur calculée pour  $P_d$ .

La section qui suit explique en détail la façon dont est calculée  $P_c$  dans les cas où la plate-forme entre en collision avec un ou plusieurs segments du plancher virtuel.

#### 4.4.1.1 Description détaillée de la gestion de collision

Cet algorithme est utilisable dans le cas où le monde virtuel est constitué d'un enchaînement de segments droits. Dans cet ouvrage, deux cas pouvant s'appliquer dans un environnement 2D sont présentés.

A) Cas où la plate-forme est en collision avec un segment.

- 1) Exprimer la position des extrémités de la plate-forme ( $P_{pcpf}$ ) dans le repère du segment.
- 2) Calculer la profondeur de pénétration pour chaque extrémité de la plate-forme.

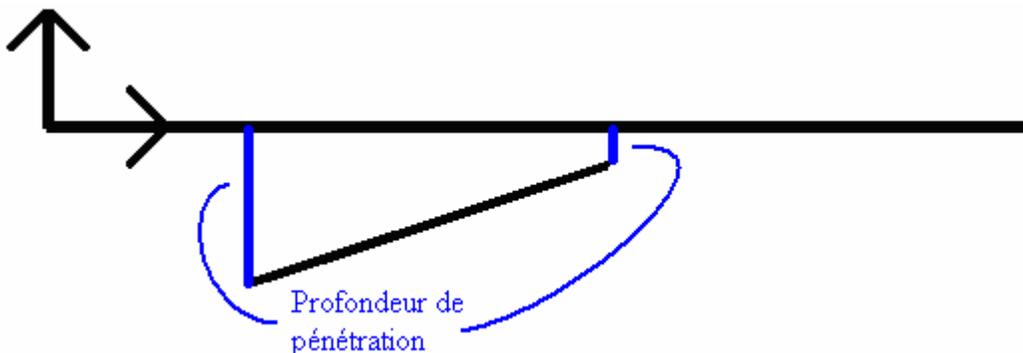


Figure 32 - Calcul des profondeurs de pénétration

- 3) Déterminer la profondeur de pénétration maximale.
- 4) Calculer le déplacement de la plate-forme dans le repère du segment. Ceci correspond à augmenter la hauteur de la plate-forme dans la direction normale au segment d'une quantité équivalente à la profondeur de pénétration.

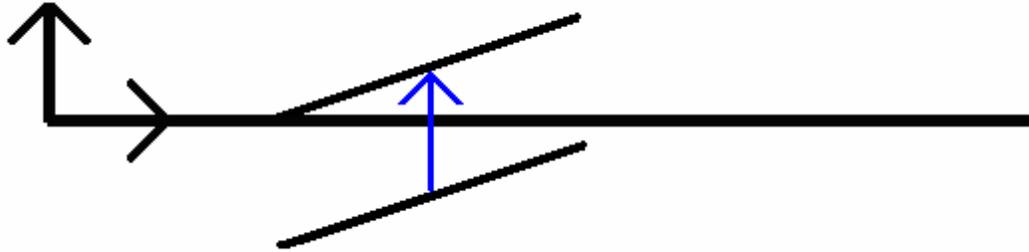


Figure 33 - Correction de la profondeur de pénétration

- 5) Exprimer la position à commander à la plate-forme ( $P_c$ ) dans le repère monde réel.

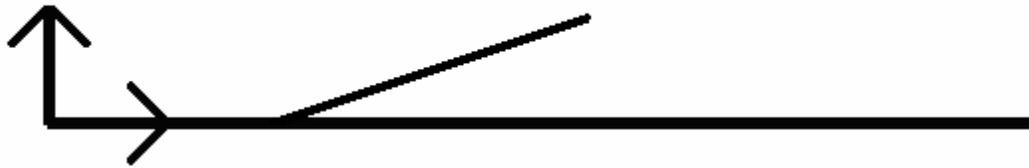
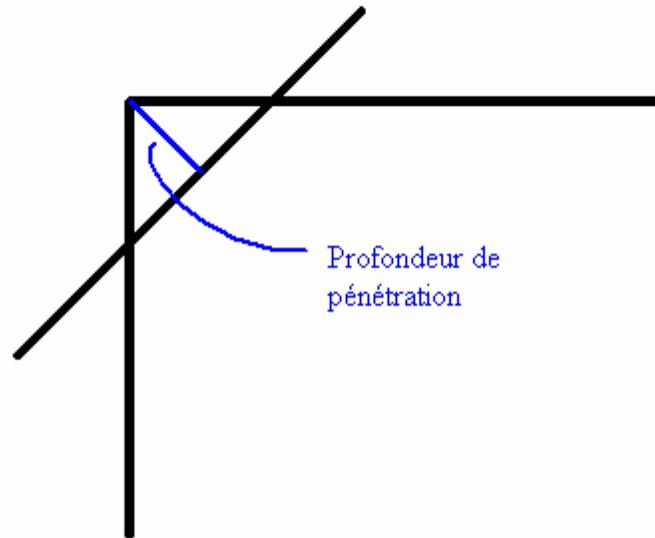


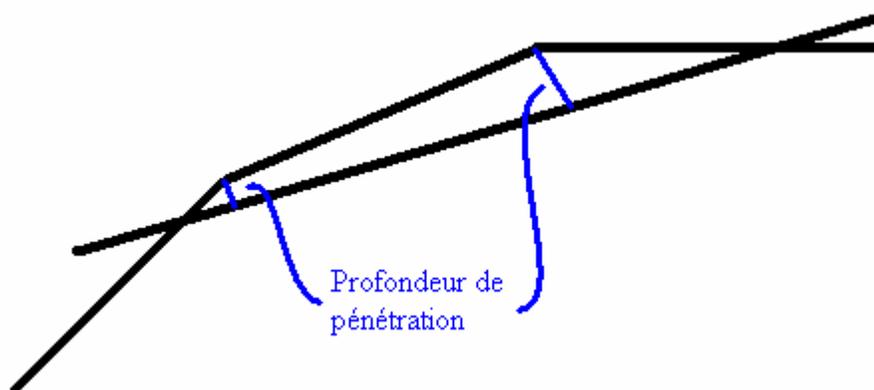
Figure 34 - Résultat final d'une collision avec un segment

B) Cas où la plate-forme est en collision avec plusieurs segments.

- 1) Exprimer la position des extrémités des segments dans le repère de la plate-forme.
- 2) Calculer la profondeur de pénétration pour chaque extrémité.



(a) Cas 1 : Coin d'une marche

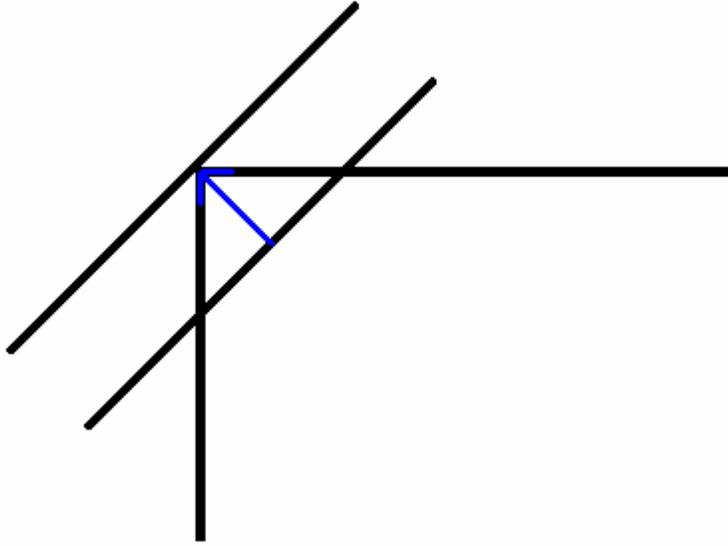


(b) Cas 2 : Surface convexe

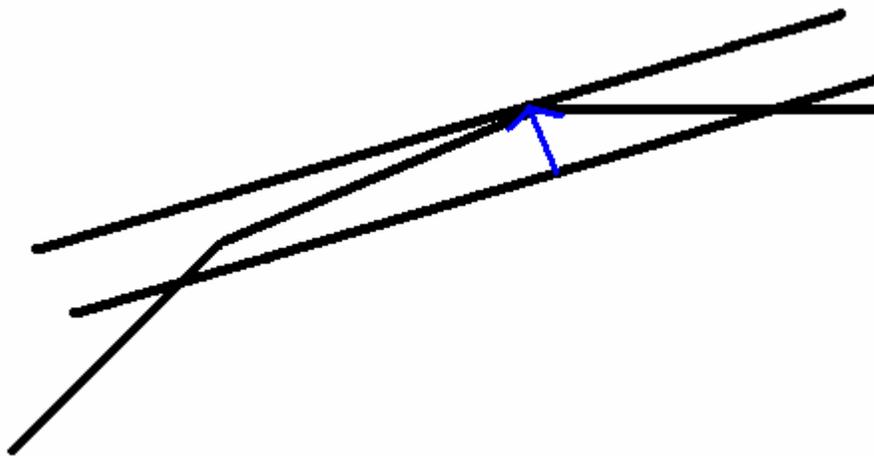
Figure 35 - Calcul des profondeurs de pénétration

- 3) Déterminer la profondeur de pénétration maximale.
- 4) Calculer le déplacement de la plate-forme dans le repère de la plate-forme. Ceci correspond à augmenter la hauteur de la plate-forme dans la direction

normale à la plate-forme d'une quantité équivalente à la profondeur de pénétration.



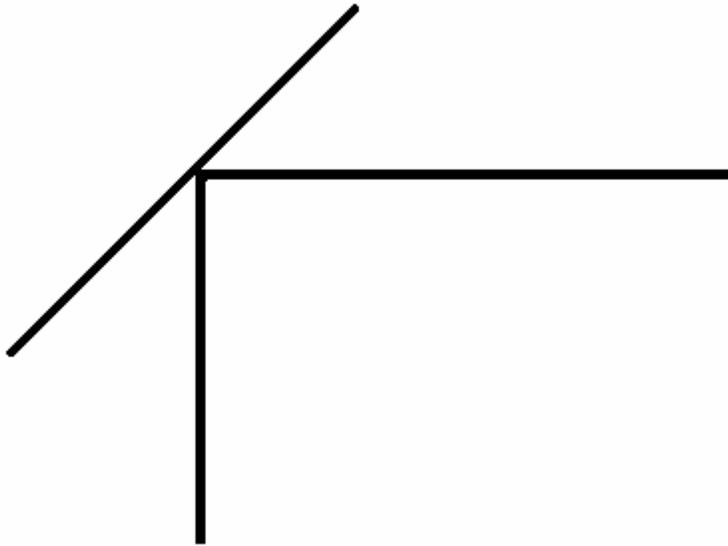
(a) Cas 1 : Coin d'une marche



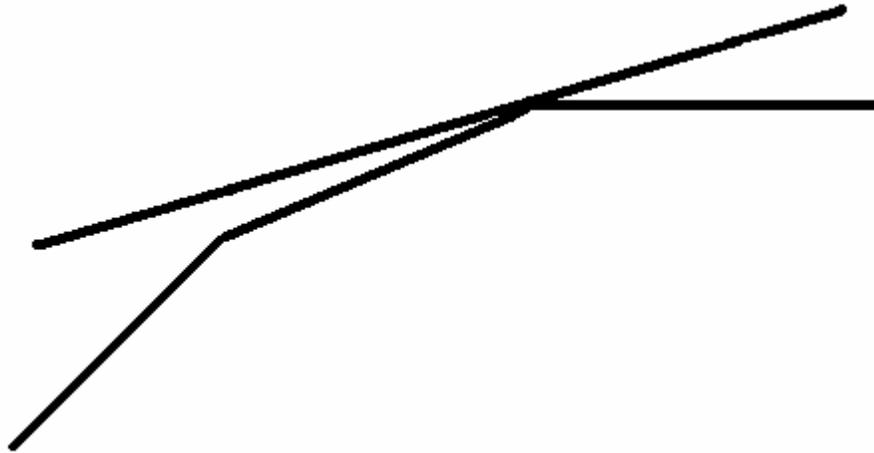
(b) Cas 2 : Surface convexe

Figure 36 - Correction de la profondeur de pénétration

- 5) Exprimer la nouvelle position de la plate-forme ( $P_c$ ) dans le repère du monde réel.



(a) Cas 1 : Coin d'une marche



(b) Cas 2 : Surface convexe

Figure 37 - Résultat final d'une collision avec plusieurs segments

Cet algorithme offre une solution simple et efficace pour gérer la plupart des situations où la plate-forme entre en contact avec son environnement. Cet algorithme est très facilement transformable pour le système à 6 DDL. Par contre, pour un tel système, il pourrait être

souhaitable de consulter la littérature pour déterminer si cette méthode est suffisante ou si une méthode plus complexe est requise.

#### 4.4.2 Contrôle moteur global

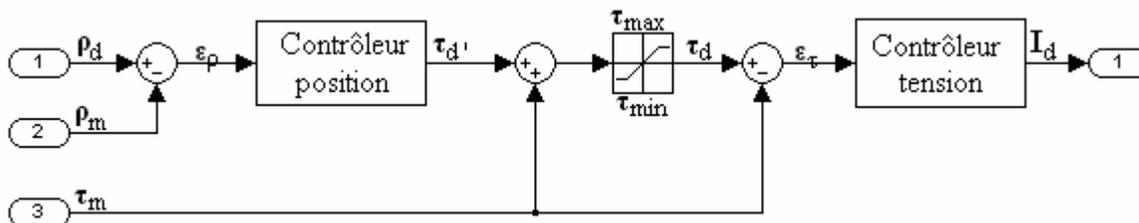


Figure 38 - Schéma détaillé du contrôleur moteur

Le schéma précédent présente le détail du module « contrôleur moteur » de la figure 27. Il contient deux systèmes de contrôle montés selon une architecture pseudo-cascade tel que décrit par Pomerleau [28]. L'architecture pseudo-cascade permet d'asservir un procédé selon une certaine consigne tout en respectant certaines contraintes.

Dans le cas du mécanisme à câbles, le contrôleur en position ( $\rho$ ) génère une tension désirée ( $\tau_d'$ ) dans le câble selon l'erreur ( $\epsilon_\rho$ ) entre la position mesurée ( $\rho_m$ ) et la consigne ( $\rho_d$ ). L'erreur entre la tension mesurée ( $\tau_m$ ) et la tension désirée ( $\tau_d$ ) génère une erreur de tension ( $\epsilon_\tau$ ) qui est utilisée par le contrôleur en tension pour générer le courant dans le moteur ( $I_d$ ). Les composants entre les deux contrôleurs, comprenant la sommation de  $\tau_d'$  et  $\tau_m$ , le saturateur et la soustraction de  $\tau_m$  à  $\tau_d$ , permettent de transmettre la tension désirée ( $\tau_d'$ ), si cette dernière respecte les contraintes ( $\tau_{min}$ ,  $\tau_{max}$ ). Dans le cas contraire, elle transmet la contrainte (supérieure ou inférieure, selon le cas). La section 4.4.2.1 présente le détail du contrôle en position, alors que la section 4.4.2.2 décrira en détail le contrôle en tension.

#### 4.4.2.1 Contrôle moteur en position

Le schéma qui suit donne les détails de mise en œuvre du module « contrôleur position » de la figure 38.

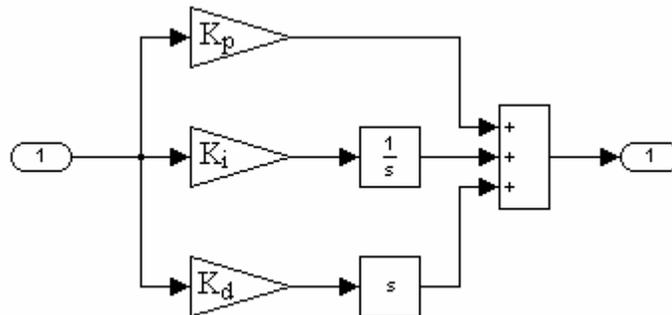


Figure 39 - Schéma détaillé du contrôle moteur en position

Le contrôleur en position est très simple. Il s'agit d'un contrôleur PID (Proportionnel-Intégrateur-Dérivateur). Ce type d'asservissement apporte cependant un problème : la redondance d'actionnement cause un risque de couplage inter-moteur. Un contrôleur de type PID causerait un problème puisque les intégrateurs de deux contrôleurs antagonistes intégreraient la perturbation de l'autre sans limite. La conséquence serait que les deux câbles correspondant deviendraient en hypertension. Pour palier à ce problème, le contrôle implanté pour la position du moteur est de type PD (Proportionnel-Dérivateur). Dans le cas d'un contrôleur de type PD, s'il y a deux moteurs antagonistes, les câbles se stabilisent à mi-chemin de la consigne de chacun. Il faut noter que si le système est bien calibré, cet effet est très minime. L'hypothèse suivante a été posée. En enlevant l'élément intégrateur des contrôleurs et en ayant un système très bien calibré, l'effet du couplage devient négligeable. Le fait d'éliminer l'intégrateur du contrôleur apporte un problème, c'est-à-dire que l'erreur statique nulle n'est pas garantie. Le contrôle ne protège pas contre les perturbations extérieures, comme le poids de la personne sur les plates-formes. Le poids de la personne sur l'effecteur fait tirer sur les câbles en éloignant ces derniers de leur consigne. La mise en œuvre d'une correction de cette perturbation peut par contre être réalisée en

utilisant une mesure de cette perturbation fournie par le capteur de force. Cette proposition de correction est énoncée dans l'annexe F.

#### **4.4.2.2 Contrôle moteur en tension**

Le contrôleur en tension dans les câbles permet de limiter la tension dans les câbles lors du fonctionnement du système. La section qui suit présente un survol du fonctionnement du contrôleur en tension et des gains qu'il apporte au système. Ce contrôleur a été testé, mais n'est pas utilisé dans la version finale du prototype à 3 DDL. Il sera par contre, d'une aide importante dans la réalisation du système à 6 DDL.

#### **Fonctionnement**

Le système de contrôle en tension est constitué de deux éléments : un capteur de tension pour chaque câble et un système de contrôle logiciel. Tel que mentionné dans la section sur le contrôle moteur, le contrôle en tension est inclus dans une stratégie de contrôle pseudo-cascade. Tant que la tension dans le câble est à l'intérieur des limites, le contrôleur asservit la tension selon la tension demandée par le contrôleur en position. Au moment où la tension dans le câble devient à l'extérieur des bornes, le contrôleur asservit la tension dans le câble dans les limites permises.

#### **Avantages**

Le contrôleur en tension offre plusieurs avantages. Premièrement, il permet de conserver une tension minimale dans les câbles. De cette façon, dans les cas où un câble perdrait sa tension et risquerait de faire perdre l'enroulement uniforme ou bien risquerait d'aller s'enrouler autour de l'arbre moteur, le câble reste en tension et permet la continuité du bon fonctionnement du système. Deuxièmement, il permet d'augmenter les vitesses et les accélérations maximales permises par le système. Sans les contrôleurs en tension, pour conserver une tension minimum dans les câbles il faut imposer un courant minimum pour chaque moteur. De cette façon, les câbles sont toujours en tension. Dans ce cas, les moteurs

travaillent de façon antagoniste et les moteurs ne peuvent pas dérouler les câbles. Lorsque la plate-forme se déplace dans une direction, certains moteurs tirent plus fort pour déplacer la plate-forme et dérouler les câbles des autres moteurs. Avec les contrôleurs en tension, il n'y a plus de courant minimum dans les moteurs. Un moteur peut même avoir un courant négatif et dérouler son propre câble dans la mesure où la tension dans le câble est maintenue par le reste du système. Il est donc possible d'accélérer les déplacements de la plate-forme. Troisièmement, l'utilisation des contrôleurs de tension permet d'augmenter la précision du contrôle des câbles. Le système actuel utilise des moteurs de mauvaise qualité. Ces moteurs n'ont pas tous le même comportement face à un même courant. En effet, il y a beaucoup de friction et de perturbation dans les moteurs. En utilisant ces contrôleurs, il est possible d'avoir un meilleur contrôle des tensions dans les câbles. Ce meilleur contrôle de tension permettra d'implanter un correcteur de perturbation tel qu'énoncé dans l'annexe F. Enfin, un très grand avantage des contrôleurs en tension est le suivant. Il permettra d'aider à la gestion des interférences entre les câbles. Bien que ce problème n'a pas été décrit dans le présent mémoire, le système à 6 DDL devra offrir une protection face à ce problème. La solution envisagée est la suivante. Il suffit d'avoir une redondance de câbles et d'utiliser uniquement les câbles qui ne sont pas en interférence avec les autres. Pour ceux qui sont en interférence, il suffit de les contrôler en tension afin de conserver un minimum de tension dans chacun d'eux de façon à être prêt à réagir dès qu'ils ne seront plus en interférence. L'utilisation des contrôleurs en tension permettra d'accomplir cette fonction.

### Détails de mise en œuvre

Le schéma suivant donne les détails de la mise en œuvre du module « contrôleur tension » de la figure 38.

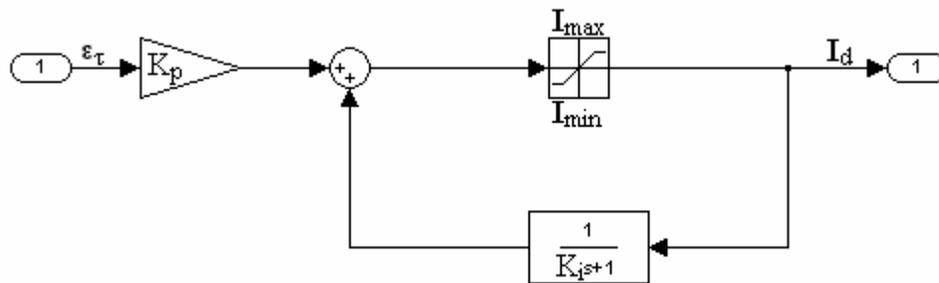


Figure 40 - Schéma détaillé du contrôle moteur en tension

Le contrôleur en tension est très simple, il s'agit d'un contrôleur PI avec anti-reset. L'anti-reset permet de limiter la sortie aux valeurs de l'élément de saturation. De cette façon, si l'actuateur ne réussit pas à atteindre la consigne, l'intégrateur du contrôleur saturera aux limites au lieu d'intégrer à l'infini.

Le fonctionnement est le suivant. Le contrôleur en tension reçoit l'erreur sur la tension ( $\epsilon_\tau$ ) et produit le courant nécessaire ( $I_d$ ) au moteur pour produire la tension désirée ( $\tau_d$ ) dans le câble. L'élément de saturation procure une limite [ $I_{\min}$ ,  $I_{\max}$ ] à la sortie du contrôleur.

Pour des raisons techniques, il est nécessaire d'avoir la possibilité de remettre à zéro l'intégrateur de ce contrôleur. Par exemple, lors de la remise en marche des moteurs ou lors de changement de mode de contrôle. Pour cette raison, le contrôleur implanté est une variante de la figure 38. Par contre, ces deux schémas sont équivalents et le comportement produit est le même.

Pour permettre la remise à zéro, il faut isoler l'intégrateur de la fonction de transfert initiale :

$$\frac{1}{K_i s + 1}$$

Le schéma suivant montre la façon d'isoler l'intégrateur.

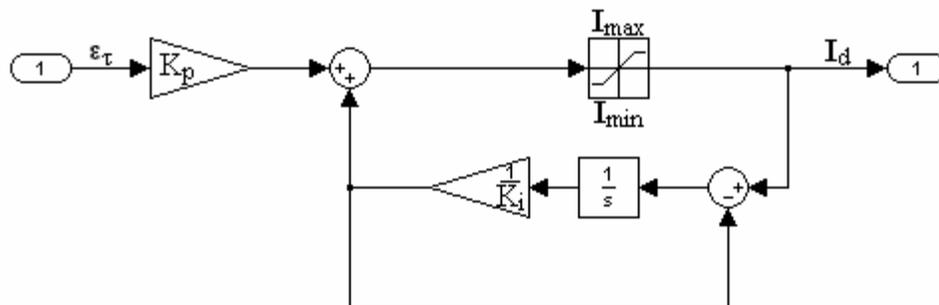


Figure 41 - Version modifiée du schéma détaillé du contrôle moteur en tension

#### 4.4.3 Modèle de simulation physique

Pour réaliser des essais de simulation hors ligne, il faut avoir un modèle de la physique du système. Dans le cas d'un mécanisme à câbles, la physique se résume à gérer l'évolution des mesures de longueur des câbles ( $\rho$ ) et, par le fait même, la position de l'effecteur ( $P_m$ ). Cette évolution est fonction des couples appliqués aux câbles ( $\tau$ ). Afin de s'assurer que les torques demeurent positifs, il est nécessaire d'ajouter un saturateur à l'entrée du modèle physique.

Il y a deux façons d'implanter le modèle physique. La première façon est implantée dans le domaine articulaire alors que la deuxième est dans le domaine cartésien.

Dans le premier cas, le système fait la double intégration de la tension dans les câbles ( $\tau$ ), pondérée par un facteur d'inertie du câble ( $I_{nc}$ ), afin de calculer une variation de longueur

de câble ( $\rho$ ). L'état des longueurs de câble est transmis au calcul du PGD afin de déterminer la position de l'effecteur ( $P_m$ ).

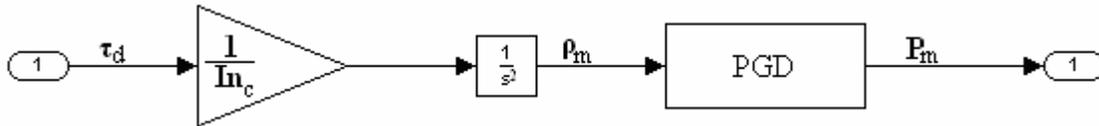


Figure 42 - Schéma détaillé du modèle physique du système dans le domaine articulaire

Dans le deuxième cas, on calcule la matrice Jacobienne ( $J$ ) du système à partir de la position de la plate-forme. Selon le principe de la dualité cinématique/statique, la matrice Jacobienne permet de convertir les tensions ( $\tau_d$ ) dans les câbles en forces cartésiennes ( $F_m$ ) appliquées à la plate-forme. En faisant la double intégration de ces forces, il est possible de calculer une variation de déplacement de la plate-forme dans le domaine cartésien. On obtient ainsi la position de la plate-forme ( $P_m$ ).

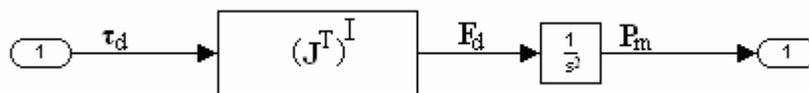


Figure 43 - Schéma détaillé du modèle physique du système dans le domaine cartésien

Ces deux modèles offrent une bonne représentation de la réalité. La solution dans le domaine cartésien donne l'avantage de ne pas avoir à calculer le PGD qui se fait de façon analytique ou itérative. Il nécessite cependant le calcul de la matrice Jacobienne.

#### 4.4.4 PGI et PGD

Le calcul du PGI est effectué en conformité aux équations présentées dans le chapitre 3. Pour sa part, le calcul du PGD permet d'évaluer la position de l'effecteur en fonction des variables articulaires ( $\rho$ ). Le calcul du PGD peut être effectué de plusieurs façons. Il peut être fait de façon analytique ou avec une procédure itérative. La procédure itérative

demande un temps de calcul assez important. Étant donné la configuration matérielle actuellement disponible (PIII-500Mhz), la procédure itérative demande une bonne portion du temps de calcul. La procédure analytique est beaucoup plus rapide, mais elle n'est pas robuste aux erreurs de mesure des variables articulaires. Enfin, s'il arrivait qu'un câble soit relâché ou qu'un câble soit trop grand ou trop court dû à un mauvais calibrage ou initialisation du système, le résultat du PGD serait invalide.

Il existe une autre façon d'évaluer la position courante. Elle fait appel à la simplification suivante. Le pas de simulation est très petit, ce qui implique que le déplacement de la plate-forme commandé par le générateur de consigne entre deux pas de temps sera très petit. La différence de consigne entre deux pas de simulation est si petite qu'il est possible de supposer que la plate-forme atteindra la position désirée en un pas de temps. La position mesurée au temps  $t$  sera donc égale à la position commandée au temps  $t-1$ .

$$P_{m,(t)} = P_{c,(t-1)} \quad 4.8$$

Cette mise en œuvre du « PGD » a été réalisée et ne semble pas affecter la sensation au niveau de l'effecteur.

#### **4.4.5 Calcul de la force dans le monde réelle $[F]_{MR}$**

Cette section décrit comment sont transformées les données fournies par le capteur de force.

La première transformation des mesures du capteur est un filtrage des données. La mesure du capteur est bruitée et un filtre passe-bas de premier ordre est utilisé. La constante de temps requise pour le filtrage a été déterminée expérimentalement. Cette constante de temps est de 0,1 seconde. Étant donné que le système est utilisé par le pied ou la main de l'utilisateur, l'évaluation de la qualité du système repose sur les sensations perçues par ce dernier. Cette évaluation étant très subjective, il a été jugé qu'il valait mieux régler les paramètres du filtre expérimentalement plutôt que théoriquement.

La deuxième transformation des mesures est une transformation de repère. Les forces mesurées par le capteur de force sont exprimées dans son propre repère. Pour le calcul de la génération de consigne de la plate-forme, il est nécessaire de connaître les forces dans le repère monde réel. La transformation entre ces deux repères est définie par la matrice de rotation  $\mathbf{Q}$ . Il suffit d'appliquer un changement de repère entre la force mesurée dans le repère de la plate-forme au repère monde réel.

$$[\mathbf{F}]_{MR} = \mathbf{Q}[\mathbf{F}]_{PF}$$

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents composants de l'architecture et explique le détail des algorithmes de contrôle utilisés. Les algorithmes sont basés sur plusieurs simplifications qui permettent d'implanter un contrôle similaire à un contrôle hybride, mais de façon beaucoup plus simple. Par ailleurs, tous les algorithmes sont facilement applicables au système à 6 DDL. Lors de la réalisation des algorithmes de contrôle en position, diverses sources d'erreur au niveau mécanique et logiciel ont été découvertes. Le chapitre suivant présente ces erreurs et les solutions implantées.

## **Chapitre 5**

### **Calibrage et précision du positionnement de la plate- forme**

Lors du développement du contrôle en position, tel qu'expliqué dans le chapitre précédent, le positionnement de la plate-forme ne se faisait pas bien, même en utilisant un algorithme de contrôle en position adéquat. Trois problèmes étaient à l'origine de ces erreurs de positionnement. Premièrement, les systèmes d'enroulement utilisés n'avaient pas de guide pour enrouler les câbles uniformément. Deuxièmement, le type de câble utilisé influençait grandement la précision de la mesure de longueur. Finalement, la technique d'estimation des points d'attache des moteurs ( $P_{pam}$ ) était inadéquate. Ce chapitre présente les trois solutions mises en œuvre pour corriger ces erreurs.

## 5.1 Système de guidage de l'enroulement du câble

Tel que décrit précédemment, le système de mesure de la longueur du câble ne donne pas une mesure précise et reproductible lorsque l'enroulement n'est pas uniforme. Les deux figures suivantes montrent le cas d'un enroulement uniforme et le cas d'un enroulement non uniforme.



a) Enroulement uniforme

b) Enroulement non uniforme

Figure 44 - Enroulement uniforme et non-uniforme

Comme la mesure de la longueur est déterminée par le déplacement angulaire de l'arbre du moteur, la façon d'enrouler le câble affecte ce déplacement. Si le câble s'enroule sur plusieurs épaisseurs, le diamètre d'enroulement change et ne peut être modélisé. Même si le diamètre du câble est petit, le diamètre d'enroulement change suffisamment pour entraîner des erreurs. Une erreur moyenne de mesure de longueur d'environ 2 mm par tour d'enroulement est observée. En outre, il faut environ sept tours de cylindre pour couvrir l'ensemble de l'espace de travail du prototype à 3 DDL. L'erreur accumulée pour sept tours d'enroulement peut donc atteindre 14 mm. Cette erreur n'est pas tolérable puisqu'il faut positionner l'effecteur au millimètre près. Avec le nouveau système d'enroulement, cette erreur est complètement éliminée.

## 5.2 Étirement longitudinal et écrasement radial des câbles

L'élimination de l'erreur d'enroulement non uniforme a permis de découvrir une autre cause d'erreur de mesure. Selon son coefficient d'étirement longitudinal, un câble peut s'étirer lorsqu'il est mis sous tension sans que l'encodeur de position de l'arbre moteur ne puisse mesurer cette variation. Par ailleurs, un câble peut s'écraser dans le sens de son diamètre lors de son enroulement autour d'un cylindre. L'écrasement radial cause une diminution du diamètre d'enroulement, influençant ainsi la mesure de longueur.

L'utilisation de câbles miniatures d'acier tressés réduit fortement ces deux causes d'erreur. Ils possèdent un coefficient d'élasticité plus petit que les câbles de cerf-volant. L'élongation est de 0,2% lorsque la tension dans le câble correspond à 10% de la force de résistance à la rupture. La force de résistance à la rupture des câbles utilisés est de 295 N (30 kg) alors que les efforts maximums pouvant être prescrits par le mécanisme à câble sont de 29,5 N (3 kg). L'élongation dans les pires conditions pour le prototype à 3 DDL est de 0,3 mm. De plus, étant donné leur structure, les câbles d'acier tressés ne subissent pas ou peu d'écrasement radial. Le test qui suit permet de démontrer le gain de précision sur la mesure de longueur fourni par l'utilisation des câbles d'acier.

Le test utilisé pour estimer l'erreur de mesure est le suivant. Initialement, le câble est complètement déroulé du cylindre et la mesure de longueur du câble est initialisée à 3,6 m. Par la suite, le moteur impose une tension dans le câble et enroule les 3,6 m de câble autour du cylindre. Une autre mesure de longueur est prise lorsque le câble est complètement enroulé. La mesure recherchée est de 0 m. L'erreur de mesure est calculée entre la mesure recherchée (0 m) et la mesure prise.

Ce test est effectué pour différentes tensions d'enroulement. La tension varie entre 4 N et 16 N; 16 N étant la charge nominale utilisée pour le prototype à 3 DDL. La figure suivante montre l'erreur de mesure en fonction de la tension d'enroulement pour les câbles de cerf-volant (en bleu) et pour les câbles d'acier (en rouge).

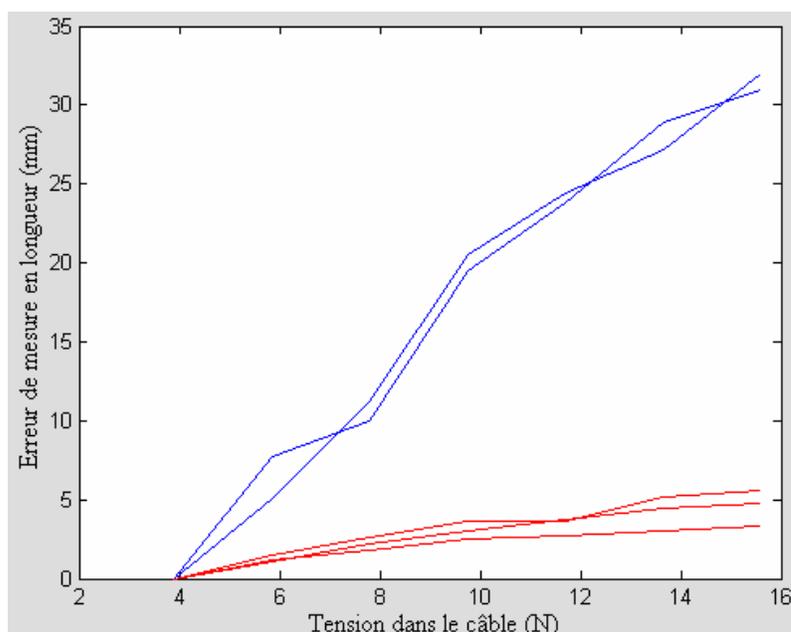


Figure 45 - Erreur de mesure de longueur en fonction de la tension dans les câbles

Le graphique montre que les câbles d'acier présentent une meilleure tolérance à la tension d'enroulement réduisant ainsi l'erreur de mesure. Le facteur de gain est de 4 à 6 réduisant l'erreur de mesure de 30 mm à moins de 5 mm.

Cette figure ne présente pas l'erreur absolue de mesure, mais bien l'erreur accumulée pour 3,6 m d'enroulement. Pour évaluer la précision de mesure absolue du prototype à 3 DDL, il faut effectuer les calculs suivants : la plage dynamique d'enroulement est de 1,05 m, l'erreur accumulée sera réduite d'environ un facteur 3. Elle sera donc sous les 1,5 mm. Un autre facteur à considérer est le suivant : l'erreur est relative à une mesure prise à tension nulle. Si l'initialisation des longueurs de câble s'effectue en utilisant une tension qui est au centre de la plage dynamique des tensions, soit 16 N, l'erreur sera diminuée de moitié. Finalement, si l'initialisation de la longueur des câbles se fait au centre de l'espace de travail, les câbles seront initialisés au centre de leur plage dynamique. La variation de longueur sera donc de plus ou moins la moitié de la plage dynamique du câble. Il faut encore diminuer de moitié l'erreur accumulée. Le résultat final est donc une erreur

accumulée sous les 0,375 mm, ce qui est le tiers de la précision recherchée. La précision de la mesure de longueur est donc au millimètre près, soit  $\pm 0,375$  mm.

### 5.3 Calibrage

Cette section présente une procédure de calibrage qui permet d'effectuer une estimation rapide et efficace de la position des points d'attache des moteurs.

L'image suivante présente un rappel de ce que sont les points d'attache des moteurs ( $P_{pam}$ ) et les points d'attache plate-forme ( $P_{papf}$ ). La mesure de longueur de câble ( $\rho$ ) nécessaire pour imposer une position cartésienne à l'effecteur est la même que la distance entre  $P_{pam}$  et  $P_{papf}$ .

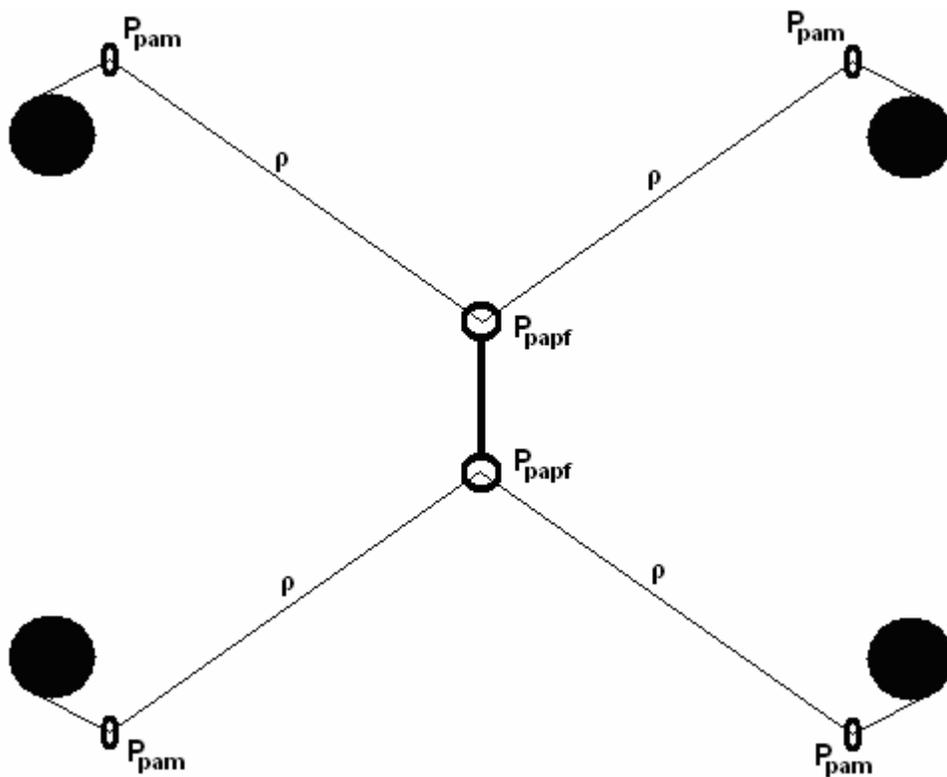


Figure 46 - Rappel du PGI

L'exactitude de l'estimation de la position des points d'attache des moteurs affecte l'exactitude du calcul des  $\rho$  et affecte ainsi l'exactitude du positionnement de l'effecteur. Si la position d'un point d'attache d'un moteur est mal estimée, son  $\rho$  est mal estimé. Le système prescrirait alors une mesure de longueur légèrement plus ou moins grande que la mesure nécessaire. Ceci ferait en sorte que ce câble serait sans tension ou avec trop de tension, ce qui causerait un déplacement de l'effecteur en s'éloignant de la position désirée.

Par le passé, deux techniques étaient utilisées pour estimer les points d'attache des moteurs. La première est d'utiliser un ruban à mesurer. L'utilisation de cet outil est moyennement concevable dans le contexte d'un mécanisme plan. Par contre, pour un mécanisme en trois dimensions, l'utilisation du ruban à mesurer est plus problématique. Il est difficile d'obtenir une précision meilleure qu'au centimètre près. Il faut aussi beaucoup de temps et de précaution pour effectuer ces mesures. Cantin [19] a développé une procédure de calibrage à l'aide d'un capteur de position externe : un OptoTrack<sup>®</sup>. L'avantage de l'OptoTrack<sup>®</sup> est sa précision de mesure de l'ordre de 0,1 mm. Cependant, l'OptoTrack<sup>®</sup> est un instrument qui est très coûteux et qui requiert un long temps d'installation. De plus, si l'OptoTrack<sup>®</sup> n'est pas gardé en permanence à côté du mécanisme à câble, un changement mineur à la configuration des moteurs entraîne la réinstallation de l'OptoTrack<sup>®</sup>.

La nouvelle technique de calibrage ne repose sur aucun capteur externe. La procédure est simple, efficace et rapide à exécuter. Cette nouvelle procédure requiert de choisir des points de référence dont la position dans le référentiel du mécanisme est connue. Pour ce faire, il suffit d'évaluer les distances entre les œillets et les points de référence choisis. La précision de l'estimation des points d'attache des moteurs dépend de la précision des mesures de longueur qu'on peut obtenir avec le système. Enfin, aucune connaissance à priori de la position des points d'attache des moteurs n'est nécessaire.

### **5.3.1 Prise de données**

La procédure suivante montre comment effectuer la prise de mesure.

- 1) Attacher les câbles les uns aux autres afin de réaliser un effecteur ponctuel. Il est plus facile de déplacer l'effecteur sur des points de référence connus que de déplacer un effecteur complexe dans des poses (position et orientation) connues.
- 2) Initialiser la longueur des câbles en plaçant l'effecteur à un endroit où la longueur des câbles est connue. Cette étape requiert au moins la connaissance des distances entre les points d'attache des moteurs et un point de référence.
- 3) Déterminer les points de référence. L'utilisation de points sur le plancher est recommandée. Il est très facile de connaître la position de ces points de référence dans le repère du mécanisme à câble.
- 4) Amener successivement l'effecteur ponctuel sur les points de référence et calculer les longueurs de câble entre le point de référence et les points d'attache des moteurs.

### 5.3.2 Description de l'algorithme

Cet algorithme consiste essentiellement à optimiser la position estimée des points d'attache des moteurs de telle sorte que les distances entre la position estimée des points d'attache et les points de référence respectent approximativement les mesures de longueur prises. Le critère à minimiser est le suivant :

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \left( \|\mathbf{P}_{pam,i} - \mathbf{P}_{ref,j}\| - \rho_{i,j} \right)^2 \quad 5.1$$

où  $m$  est le nombre de moteurs,

$n$  est le nombre de points de référence,

$\mathbf{P}_{ref,j}$  est le  $j^{\text{ième}}$  point de référence,

$\rho_{i,j}$  est la longueur de câble mesurée entre  $\mathbf{P}_{pam,i}$  et  $\mathbf{P}_{ref,j}$ .

Avec le PGI, il est possible de trouver analytiquement une équation permettant de calculer instantanément la position des œillets en fonction des longueurs de câble. Connaissant la position du point d'attache, il est possible de déterminer la longueur de câble entre ce dernier et tout point de l'espace. Inversement, en connaissant les longueurs de câbles pour atteindre des points de référence, il est possible de trianguler la position des points d'attache. Il faut un minimum de trois points de référence non colinéaires en deux dimensions et quatre points en trois dimensions. Le problème d'utilisation de l'approche analytique est de ne pas pouvoir considérer les erreurs de mesure reliées à la longueur de câble.

Une procédure itérative est plus adaptée. Il est possible d'estimer les points d'attache des moteurs en trouvant un système d'équations basé sur le PGI et en résolvant ce système d'équations.

Cette section décrit une autre façon d'estimer la position des points d'attache des moteurs. Cette technique suit une approche intuitive et elle peut se comparer à une notion relative aux réseaux de neurones, soit le « K-means ». Voici le détail des étapes pour estimer les positions.

1- Initialiser la position des poids.

Les poids sont la position des points d'attache des moteurs. Les points de référence sont les points utilisés pour la cueillette des données. Les positions réelles sont les positions recherchées, elles ne sont pas connues et ne sont pas nécessaires au calcul. Elles ne sont là que pour expliquer les étapes du calcul.

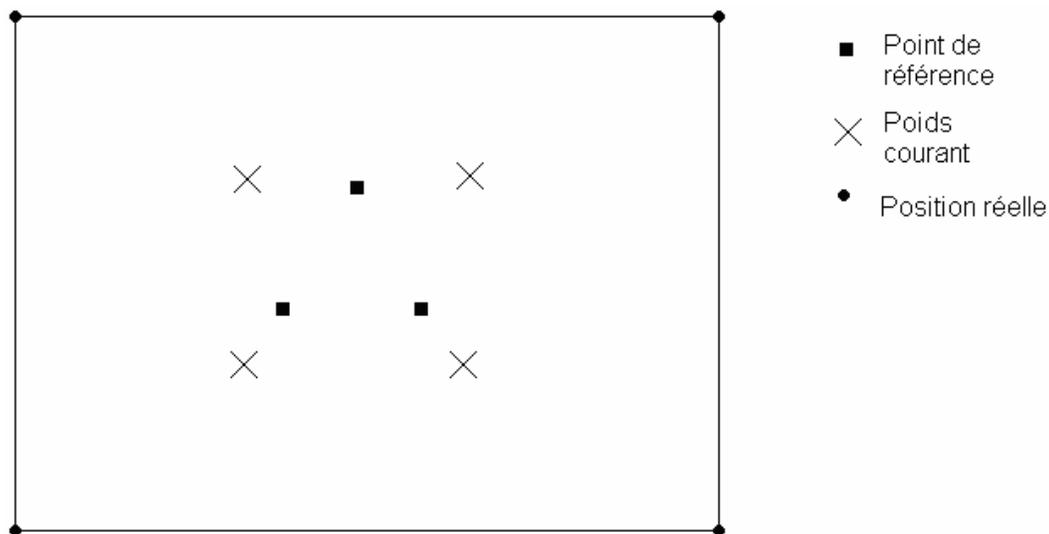


Figure 47 - Étape 1 : Initialisation des poids

Idéalement, il faut initialiser la position des poids dans la direction des points recherchés. Par contre, s'ils ne sont aucunement connus, il est possible de les initialiser de façon arbitraire et l'algorithme pourra converger. Par contre, il est important de définir les poids initiaux à l'extérieur de l'enveloppe convexe formée par les points de références. L'image suivante présente cette enveloppe.

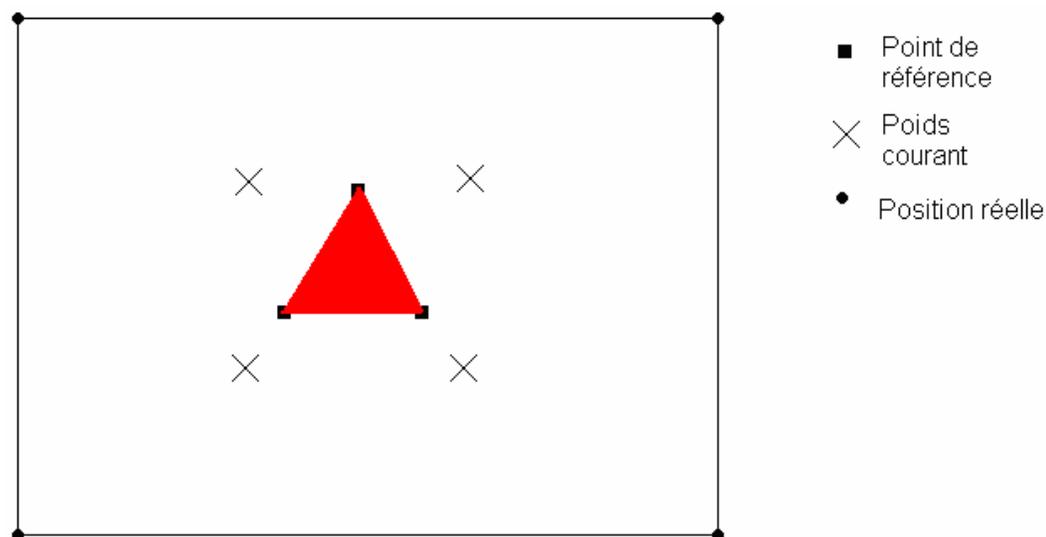


Figure 48 - Étape 1 : Enveloppe convexe pour initialisation des poids

2- Calculer par méthode de regroupement, la direction de recherche. Il s'agit du gradient de la fonction.

Le calcul du gradient se base sur la notion suivante : en utilisant le poids courant, est-ce que la distance calculée entre l'estimation du point d'attache du moteur et le point de référence correspond à la mesure expérimentale. Si la distance théorique est plus petite que la mesure expérimentale, on doit éloigner le poids. Si la distance théorique est plus grande, il faut rapprocher le poids. L'éloignement ou le rapprochement se fait dans la direction définie par le segment de droite entre le point de référence utilisé et le poids courant. La méthode de regroupement permet d'intégrer l'information d'erreur pour chacun des points de référence afin de mettre à jour le poids. Il faut par contre pondérer la participation de l'erreur de chacun de façon à ce que le point de référence qui cause le plus d'erreur soit prépondérant. Il est suggéré de pondérer selon le carré de l'erreur. Dans l'exemple ci-dessous, il y a 3 points de référence qui permettent de calculer 3 vecteurs de mise à jour du poids. Comme le point de référence en bas à gauche possède une plus grande erreur, il doit avoir un vecteur de correction plus important que les autres.

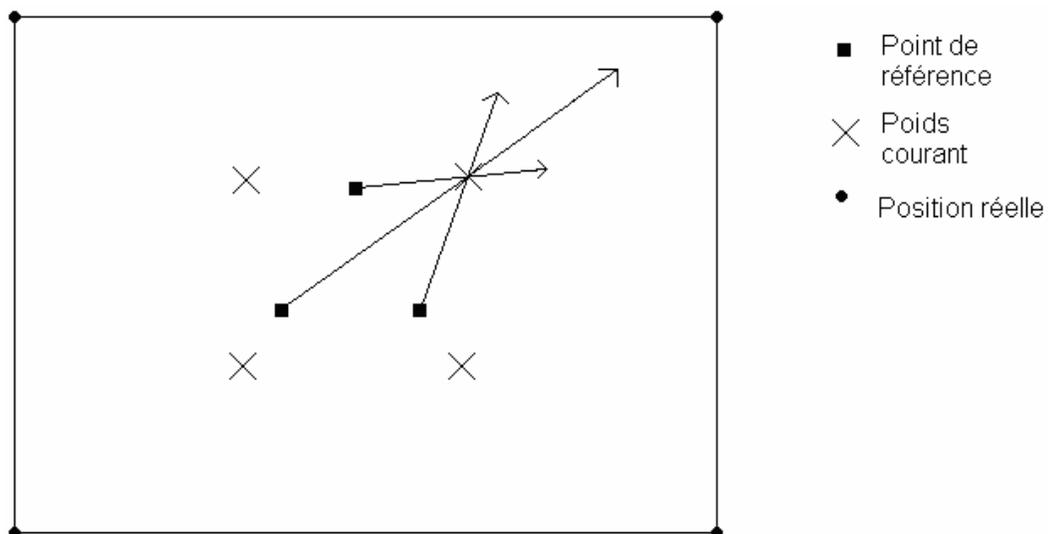


Figure 49 - Étape 2 : Calcul des composantes du gradient

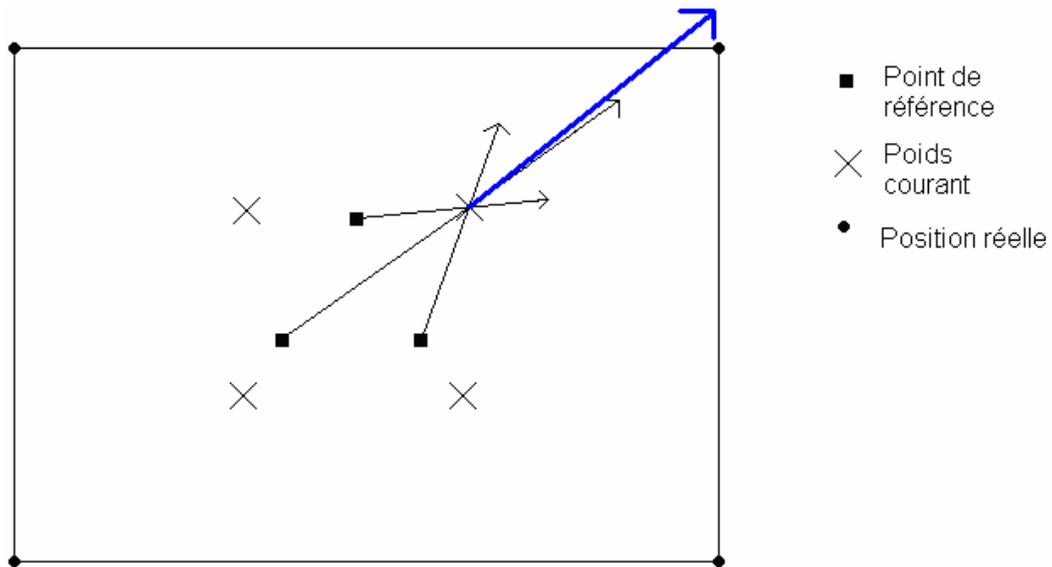


Figure 50 - Étape 2 : Calcul du gradient

Le gradient est déterminé par la somme des vecteurs de mise à jour. Sur la figure 50, le gradient est représenté par le vecteur en bleu.

En procédant par la méthode de regroupement, il y a prise en compte de tous les points de référence pour chaque mise à jour de la position du poids. Ceci a pour effet d'accélérer la vitesse de convergence. Le gradient représente ici la direction de recherche. Il faut ensuite déterminer la grandeur du pas à effectuer dans la direction de recherche.

3- Déterminer le module du pas à effectuer dans la direction du gradient.

Il faut trouver le module du pas à effectuer dans la direction de recherche. Le gradient montre dans quelle direction il faut déplacer le poids pour minimiser l'erreur. Le graphique suivant montre l'évolution typique de la mesure d'erreur en fonction de la distance parcourue dans la direction de recherche.

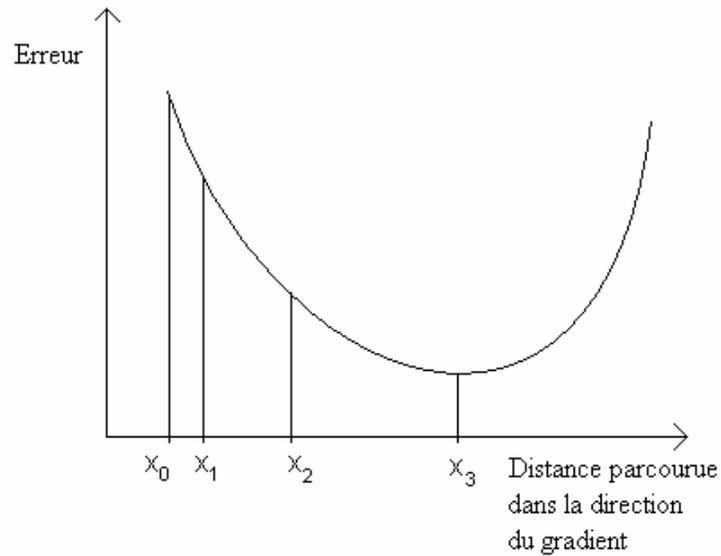


Figure 51 - Étape 3 : Calcul du pas à effectuer dans le direction du gradient

L'algorithme du « Golden Section Search » permet de trouver un minimum le long de cette direction de recherche. Cet algorithme consiste à se déplacer graduellement le long du gradient tant que la fonction d'erreur diminue. Lorsque la courbe d'erreur se met à remonter, on cesse la recherche. Dans l'exemple suivant, on voit la courbe d'erreur diminuer jusqu'à  $x_3$ . Le poids est alors mis à jour en utilisant ce minimum trouvé.

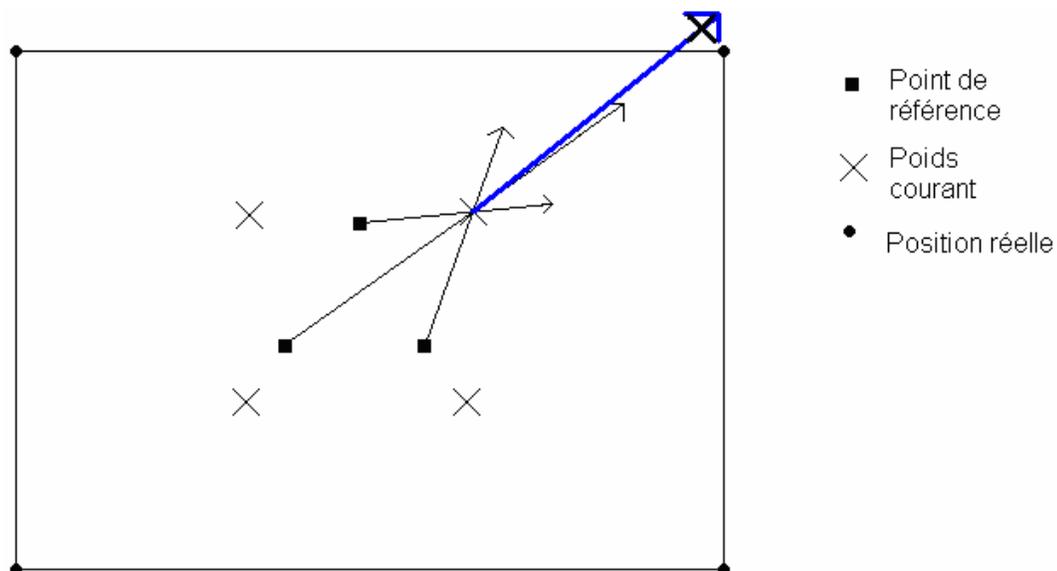


Figure 52 : Étape 3 : Mise à jour du poids

Recommencer à l'étape 2 afin de mettre à jour chacun des poids. Il faut itérer de l'étape 2 à l'étape 3 jusqu'à ce que la position des poids varie moins qu'un certain seuil. À ce stade, l'algorithme a convergé.

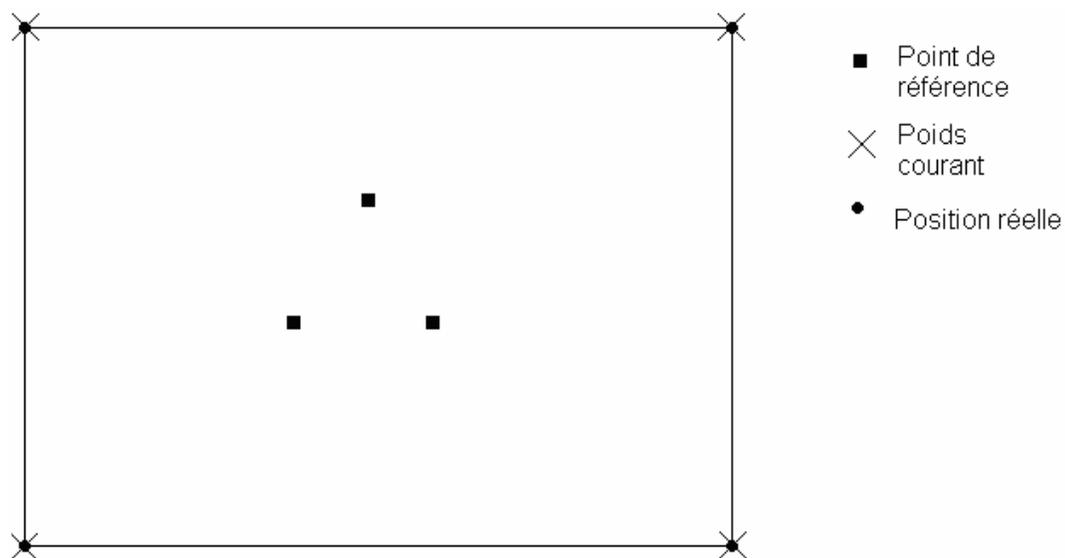


Figure 53 - Convergence de l'algorithme

La procédure décrite précédemment permet de déplacer le poids dans l'espace de l'erreur jusqu'à ce qu'un optimum soit trouvé. L'espace de l'erreur pour l'exemple présenté est montré à la figure suivante.

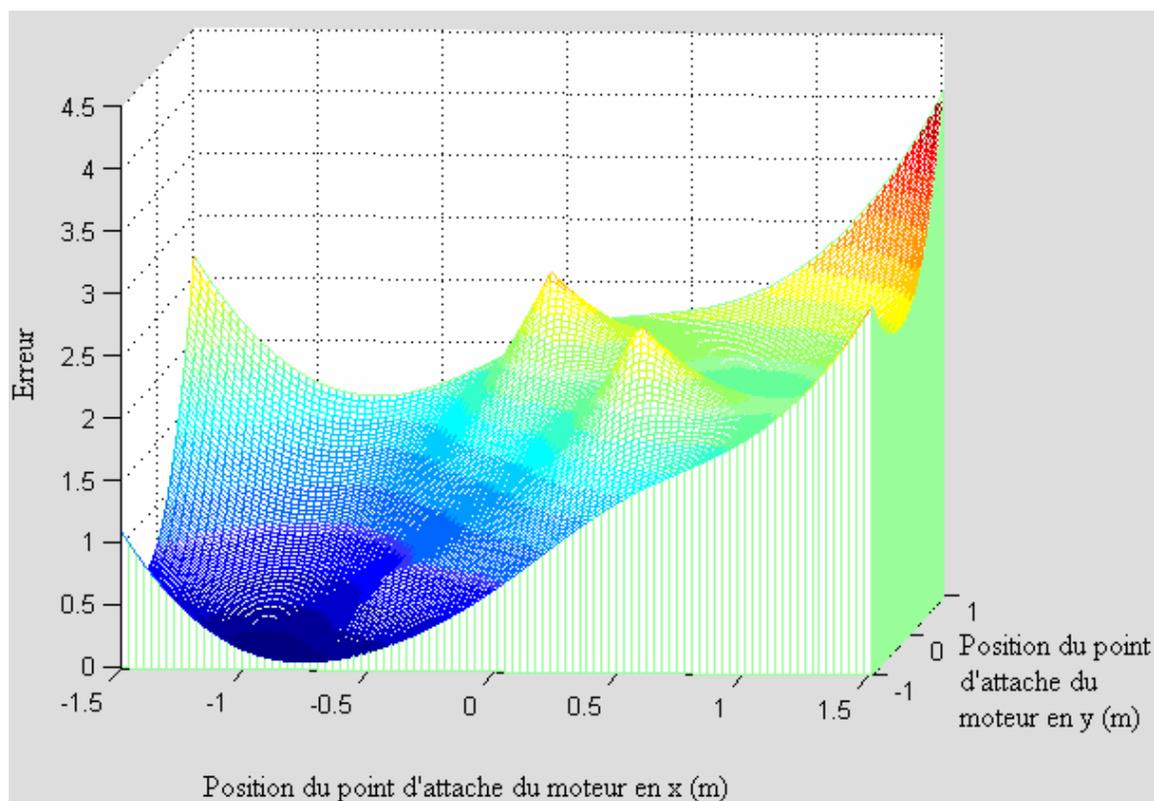


Figure 54 - Courbe d'erreur en fonction de la position estimée de l'oeillet

Une élévation basse correspond à une erreur basse. Il est possible de voir une zone de basse erreur à proximité de la solution recherchée. En suivant le gradient de la fonction au fur et à mesure des itérations, il est possible de converger vers cette solution.

### 5.3.3 Résultats

Une étude de cas théorique est présentée pour montrer la convergence de l'algorithme. Un de ces cas est présenté ici. Il s'agit d'un cas en deux dimensions où l'on veut évaluer la

position de quatre points d'attache des moteurs. Les moteurs sont montés sur une cage de dimension suivante :  $X = [-1, 1]$  et  $Y = [-0,6, 0,6]$ .

Il est possible d'observer sur la figure suivante l'évolution des poids au fur et à mesure des itérations. La figure présente une vue de dessus de la cage. Plus le nombre d'itération augmente, plus les poids sont foncés, tendant vers le noir. Au centre, il y a l'estimation initiale des positions. Malgré le fait que les estimations initiales sont très mauvaises, l'algorithme converge bien et rapidement. Les valeurs recherchées sont les coins d'un rectangle ayant les coordonnées suivantes :  $[-1, -0,6]$ ,  $[1, -0,6]$ ,  $[1, 0,6]$ ,  $[-1, 0,6]$ .

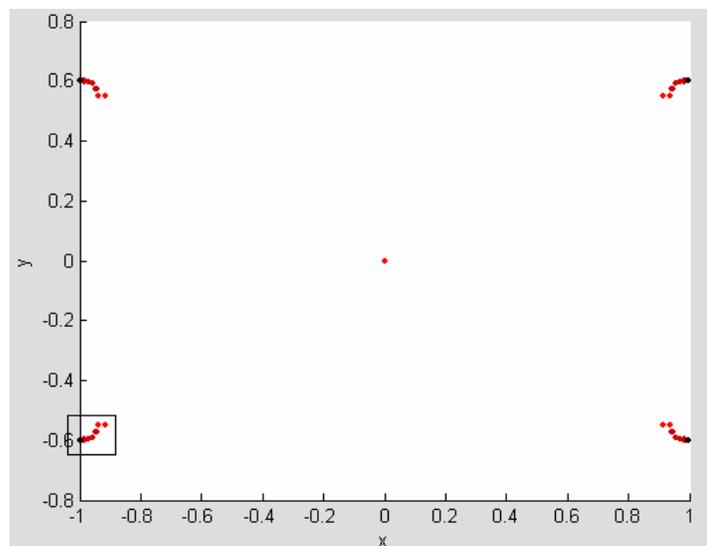


Figure 55 - Convergence des poids au fil des itérations

La zone encadrée par un rectangle est agrandie et présentée dans le graphique suivant. Il est possible de constater l'évolution des poids jusqu'à l'atteinte de la valeur finale qui est ici la valeur réelle :  $[-1, -0,6]$ .

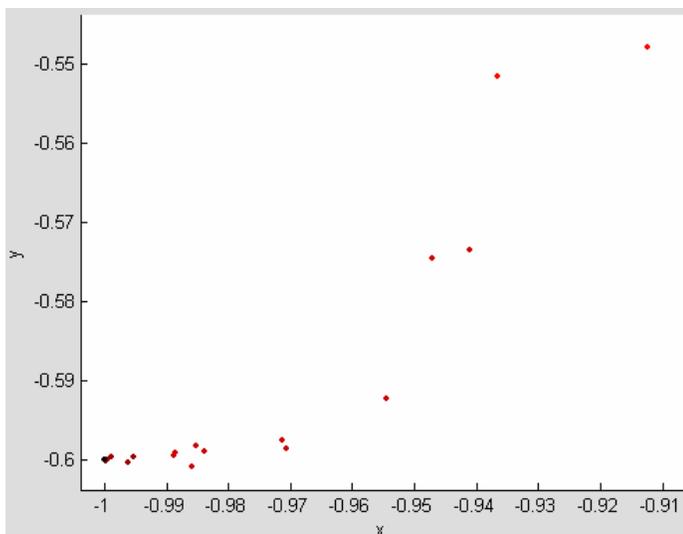


Figure 56 - Convergence des poids au fil des itérations (vue agrandie)

La figure suivante présente l'évolution de l'erreur cartésienne (distance entre la position réelle et la position estimée) en fonction du nombre d'itération. La convergence est très rapide. Il ne suffit que de quelques itérations pour obtenir un résultat satisfaisant. Par ailleurs, l'algorithme ne requiert pas beaucoup de calcul, ce qui permet de calibrer en moins d'une seconde.

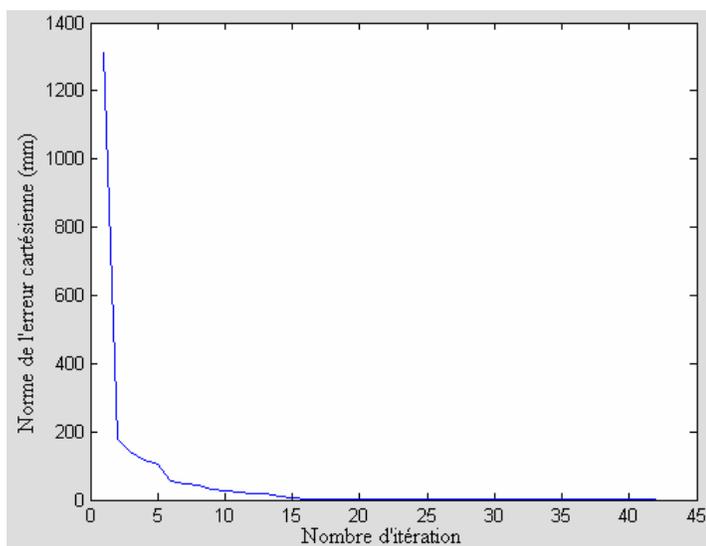


Figure 57 - Norme de l'erreur cartésienne en fonction du nombre d'itération

### 5.3.4 Limitation

Le cas théorique présenté précédemment montre qu'il est possible de converger vers la position du point d'attache réel. Il s'agit d'un cas théorique où la précision sur la mesure des longueurs est parfaite. En réalité, il y a toujours des erreurs.

Une étude théorique est conduite pour évaluer la précision de l'estimation en fonction de la précision de la mesure de longueur. La figure suivante montre la courbe d'erreur d'estimation de la position des points d'attache en fonction de la précision de la mesure de longueur.

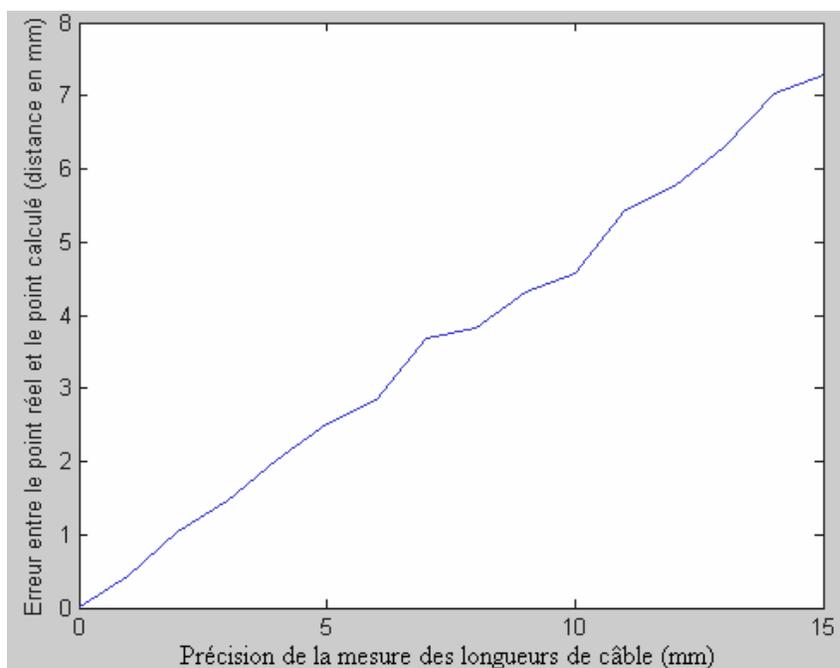


Figure 58 - Erreur entre le point réel et le point estimé en fonction de la précision de la mesure de longueur du câble

Cette figure montre que la précision de l'estimation des points d'attache des moteurs est proportionnelle à la précision des mesures de longueur. Une erreur moyenne de 1 mm sur la mesure de longueur de câble permet d'évaluer à 0,5 mm la position réelle de l'œillet. En pratique, l'erreur de mesure pour le prototype à 3 DDL est autour de 1 mm.

### 5.3.5 Validation

Afin de valider la méthode, il faut être en mesure de connaître la position exacte de l'œillet. Pour ce faire, une méthode de validation est mise au point. La position de l'œillet ne peut pas être mesurée à l'aide d'un instrument de mesure tel un ruban à mesurer. Il faut donc une méthode détournée pour déterminer la position de l'œillet. La méthode utilisée permet de ramener la mesure du point d'attache dans le plan quadrillé où il est facile de faire des mesures.

Pour une longueur de câble donnée, il suffit de tracer un arc de cercle guidé par le bout du câble. Le bout fixe du câble se trouve au centre du cercle et ce centre coïncide avec le point d'attache du moteur.

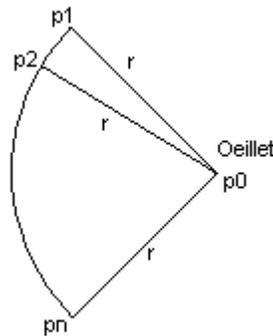


Figure 59 - Validation de l'algorithme en traçant un arc de cercle

Pour déterminer le centre du cercle, il suffit de l'estimer à l'aide des points mesurés sur le cercle. Cette estimation est effectuée en utilisant une optimisation par les moindres carrés :

$$\min_{x_0, y_0, r} f(x_0, y_0, r) = \sum_{i=1}^n (p_i - p_0)^t (p_i - p_0) - r^2,$$

où  $p_0 = [x_0, y_0]$ .

### 5.3.6 Résultat de la validation

Voici les résultats de la validation de la méthode de calibrage. Le tableau suivant présente les coordonnées des points sur l'arc de cercle formé par le câble.

Tableau 9 - Points mesurés sur l'arc de cercle

X (mm)	Y (mm)
0,00	179,20
- 2,72	169,58
- 5,26	159,54
- 7,42	149,55
- 9,39	139,65
-11,31	129,88
-13,08	119,87
-14,28	109,89
-16,60	89,50
-17,53	69,84
-17,93	49,76
- 7,66	-49,76
17,16	-129,66
59,87	-209,75

Le point d'attache du moteur, estimé à l'aide de l'optimisation par les moindres carrés avec ces données, est de [453,0813, 49,7647] en mm.

Le tableau suivant présente les points de référence utilisés ainsi que les mesures de longueur entre le point d'attache du moteur et les points de référence.

Tableau 10 - Mesure de longueur pour chacun des points de référence

X (mm)	Y (mm)	$\rho$ (mm)
-0,1	0,15	0,5604
0	0,15	0,4633
0,1	0,15	0,3671
-0,1	0	0,5535
0	0	0,4545
0,1	0	0,3564
-0,1	-0,15	0,5869
0	-0,15	0,4943
0,1	-0,15	0,4057

L'estimation du point d'attache du moteur calculée avec la procédure de calibrage est de [452,1862, 49,9689]. L'erreur entre les deux mesures est de 0,9181 mm.

### 5.3.7 Conclusion sur le calibrage

La précision atteinte grâce à la procédure de calibrage est très intéressante. La précision est meilleure d'un facteur 10 par rapport à la mesure au ruban à mesurer et est équivalente par rapport à la méthode avec OptoTrack<sup>®</sup>. Cette conclusion est valide si la précision de la mesure de longueur est bonne. Pour ce qui est du gain en temps, la nouvelle approche est meilleure que les deux autres.

## 5.4 Conclusion

Ce chapitre présentait trois techniques utilisées pour améliorer la précision du positionnement de l'effecteur. Premièrement, un mécanisme d'enroulement uniforme a été réalisé. Deuxièmement, l'utilisation de câble d'acier a permis de réduire les problèmes d'étirement longitudinal et d'écrasement radial des câbles. Finalement, la procédure de calibrage permet d'améliorer l'estimation des points d'attache des moteurs.

## **Chapitre 6**

### **Résultats**

Ce chapitre présente les résultats obtenus avec le prototype à 3 DDL. Il présente les résultats de simulation concernant la génération de consigne en 2D et 3D. Puis, il présente les résultats réels obtenus avec le prototype à 3 DDL.

## 6.1 Résultats de simulations

Cette section présente la performance de l'algorithme de gestion des collisions. Il s'agit d'essais de simulation qui permettent d'observer le comportement d'une plate-forme lorsqu'elle entre en interférence avec un plancher virtuel. Cette section fait appel à des vidéos qui sont présentés sur le cédérom d'accompagnement. L'annexe E renferme les informations concernant l'utilisation du media.

### 6.1.1 Génération de consigne 2D

Le premier scénario présente une plate-forme à 3 DDL dans le plan. Il permet de visualiser la position de la plate-forme dans le monde réel et dans le monde virtuel ainsi que le positionnement des segments composant le plancher virtuel. La configuration des câbles n'est pas celle utilisée pour le prototype. Ces tests ont été effectués avant l'identification de la configuration finale du prototype. Néanmoins, peu importe la configuration des câbles, les résultats auraient été identiques puisque les algorithmes de gestion de collision sont indépendants de la configuration des câbles. Ces derniers n'utilisent que la position de la plate-forme.

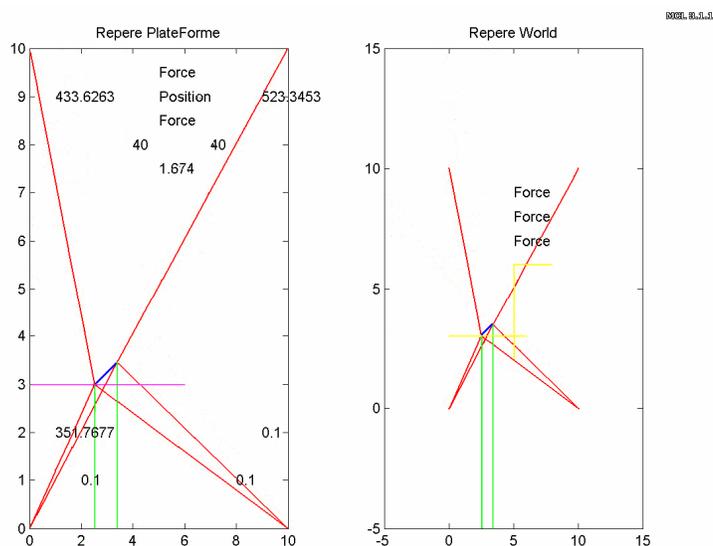


Figure 60 - Démo Simulation 2D

À la figure 60, il est possible de voir la plate-forme (bleu), les câbles (rouge), les forces appliquées à la plate-forme (vert), les segments composants le plancher virtuel (jaune) et le segment en interférence avec la plate-forme (rose). La direction des vecteurs de force (vert) montre la direction des forces appliquées à la plate-forme alors que leur module montre l'amplitude de cette force. Il est aussi possible de voir à quoi correspondent, par rapport à la commande hybride, les contraintes en position ou en force imposées à la plate-forme. De haut en bas, il est possible de voir les contraintes en x, en y et en rotation. Les autres informations ne sont pas essentielles à la compréhension de ce qui suit.

Le premier scénario se retrouve sur le cédérom d'accompagnement sous l'appellation « *I) Démo Simulation 2D.avi* ». Ce scénario présente le comportement de la plate-forme avec plusieurs segments composant le plancher virtuel. Le système peut gérer des segments dans des orientations quelconques. Il peut aussi gérer le cas où la plate-forme entre en contact avec deux segments simultanément.

### **6.1.2 Génération de consigne 3D**

Les deuxième et troisième scénarios montrent la gestion des collisions pour un système à 6 DDL. Ces scénarios présentent le comportement de la plate-forme 3D avec son environnement qui peut être un plancher droit ou une pente. L'intérêt de ces scénarios est de montrer qu'il est possible de porter les algorithmes en 3D. Afin de faciliter la visualisation de la simulation, les animations présentent une vue 3D, une vue de dessus, une vue de côté et une vue d'arrière. La plate-forme est toujours dessinée en bleu, les planchers en rose et les câbles en rouge.

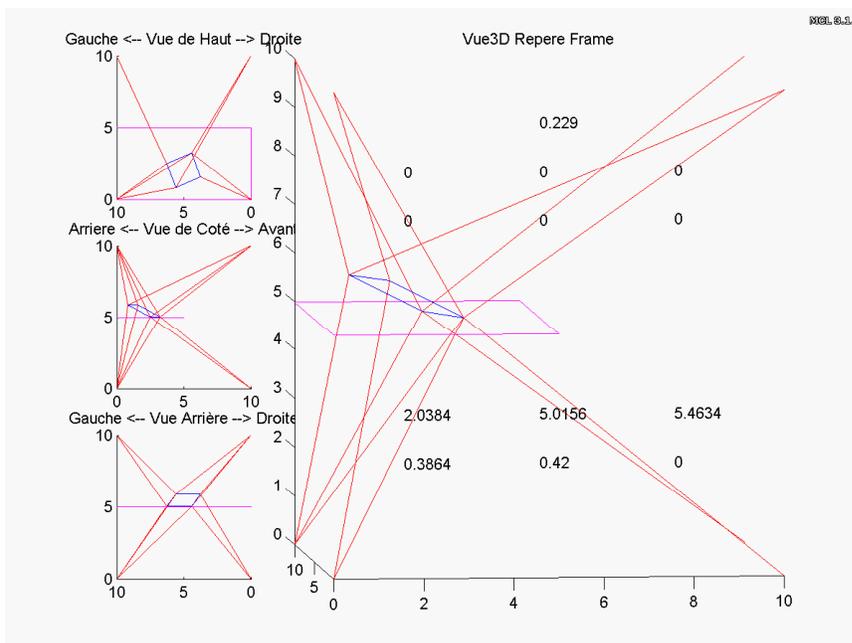


Figure 61 - Démo Simulation 3D - Mouvements divers

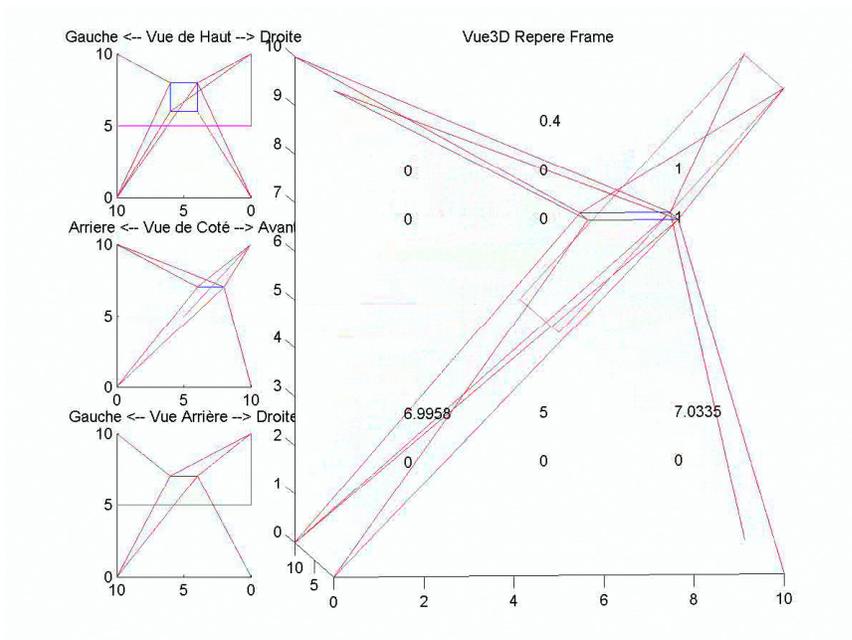


Figure 62 - Démo Simulation 3D - Glissement sur pente

Ces scénarios se retrouvent sur le cédérom d'accompagnement sous les appellations « 2) *Démo Simulation 3D - Mouvements divers.avi* » et « 3) *Démo Simulation 3D - Glissement sur pente.avi* »

### 6.1.3 Conclusion sur la gestion des collisions

Comme ces vidéos le montrent, la gestion de collision de la plate-forme avec son environnement en 2D ou en 3D fonctionne adéquatement.

## 6.2 Résultats réels de la commande hybride

Cette section présente différents résultats obtenus avec le prototype à 3 DDL. Un rappel est fait sur les objectifs du prototype. Le prototype doit montrer qu'il est possible d'utiliser un mécanisme à câble pour implanter une interface de locomotion. Le prototype doit permettre le déplacement libre de la plate-forme dans l'environnement et de faire ressentir à l'utilisateur la topographie du monde virtuel.

Étant donné la nature du projet, il est nécessaire de présenter les résultats sous forme de vidéos. Ces vidéos permettent de visualiser les résultats atteints avec le montage et les algorithmes de contrôle. La meilleure façon de percevoir la qualité du système est d'en faire l'usage. Puisqu'il n'est pas possible d'utiliser le montage à la lecture de ce mémoire, la meilleure alternative est de visionner ces vidéos afin de percevoir comment réagit le système en fonction des forces appliquées par l'utilisateur et en fonction du monde virtuel. Il est aussi possible de s'imaginer quelles sensations peuvent être ressenties par l'utilisateur de l'interface de locomotion. Par conséquent, il est fortement recommandé de consulter ces vidéos.

### 6.2.1 Rigidité de la plate-forme

La quatrième vidéo présente la rigidité de la plate-forme alors que la consigne en position de la plate-forme est constante. Ce scénario se retrouve sur le cédérom d'accompagnement sous l'appellation « *4) Démo Réelle Rigidité.avi* ». Il est possible de remarquer que même si des efforts sont appliqués à la plate-forme, elle résiste en conservant la position prescrite.

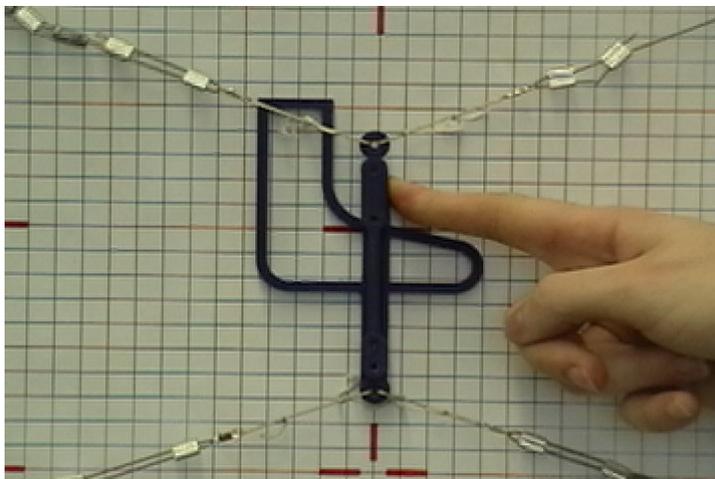


Figure 63 - Démo Réelle Rigidité

## 6.2.2 Contrôle en position

La cinquième vidéo présente la qualité de l'asservissement en position.

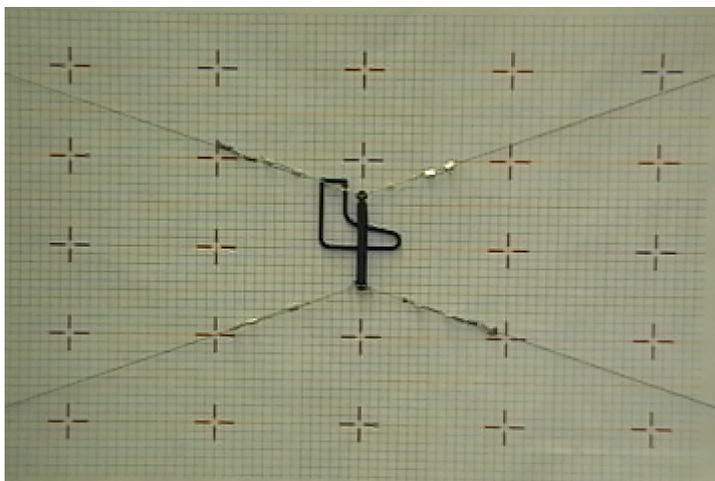


Figure 64 - Démo Réelle - Asservissement en position

Ce scénario se retrouve sur le cédérom d'accompagnement sous l'appellation « 5) *Démo Réelle - Asservissement en position.avi* ».

Il est possible d'observer sur cette vidéo la capacité du système à positionner l'effecteur très précisément. Les consignes fournies au système sont une sélection des croix de référence. À titre indicatif, les croix sont espacées de 15 cm horizontalement et de 10 cm verticalement. De plus, il est possible de remarquer la fluidité et la douceur des déplacements de la plate-forme, particulièrement lors des déplacements horizontaux. Pour les déplacements horizontaux, une génération de trajectoire de degré 5 a été implantée tel qu'énoncé par Gosselin [22]. Il serait possible d'en faire autant pour les déplacements verticaux afin d'obtenir un déplacement tout aussi doux.

### 6.2.3 Contrôle en force

La sixième vidéo montre le résultat de la mise à jour de la consigne en fonction des forces perçues par le capteur d'effort. Cette vidéo montre en quelque sorte le contrôle en force nulle de l'effecteur.

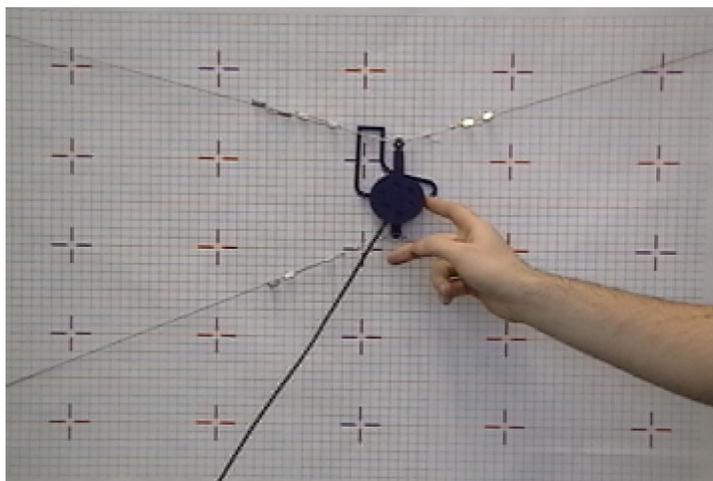


Figure 65 - Démo Réelle - Asservissement en force

Ce scénario se retrouve sur le cédérom d'accompagnement sous l'appellation « **6) Démo Réelle - Asservissement en force.avi** ».

Il est possible de remarquer à quel point il est facile de déplacer l'effecteur selon les trois degrés de liberté. Le système prend en compte les forces de l'utilisateur pour déplacer la plate-forme. Le déplacement est proportionnel à la force appliquée par l'utilisateur. La vidéo démontre que c'est par le capteur de force que cette tâche est accomplie. Lorsque l'utilisateur tente de déplacer l'effecteur sans utiliser le capteur de force, la plate-forme est maintenue en place par l'asservissement en position. La vidéo présente aussi combien le système est sensible aux intentions de l'utilisateur. Même si les forces appliquées à l'effecteur sont minimales, la plate-forme suit les intentions de l'utilisateur. Dans cette vidéo, le gain  $K_v$ , tel que discuté dans la section 4.4.1, est nul. Il est possible de remarquer que dans ce cas, la plate-forme tend vers l'immobilité, malgré la bonne sensibilité aux efforts externes, la plate-forme offre une inertie au mouvement.

La septième vidéo présente le cas où  $K_v$  n'est pas nul. Il est possible de remarquer dans cette vidéo que la plate-forme semble beaucoup plus facile à bouger. La valeur  $K_v$  mise à 0,8. Cette valeur a été fixée de façon empirique de façon à minimiser l'inertie au mouvement sans trop donner d'inertie à la plate-forme. En effet, une valeur de 1 pour  $K_v$  a pour conséquence d'avoir une plate-forme qui ne veut pas s'immobiliser. Une valeur de 0,8 permet l'atténuation complète de la vitesse de la plate-forme en environ 1 seconde.

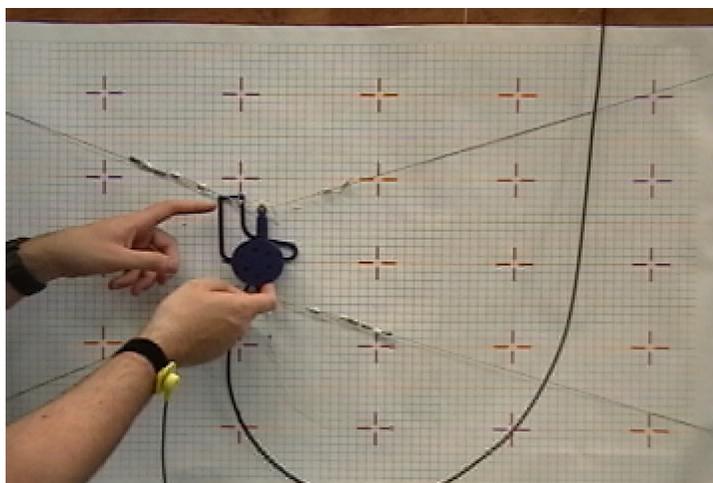


Figure 66 - Démo Réelle - Asservissement en force

Ce scénario se retrouve sur le cédérom d'accompagnement sous l'appellation « 7) *Démo Réelle - Asservissement en force avec facteur de vitesse.avi* ».

#### 6.2.4 Gestion des interférences entre la plate-forme et son environnement

Les trois vidéos suivantes présentent la gestion des interférences de la plate-forme avec son environnement.

##### a) Multi-segments et une plate-forme à 2 DDL

La huitième vidéo montre l'effecteur se déplaçant dans un environnement défini par plusieurs segments. Dans cette vidéo, seulement 2 DDL sont pris en compte. La plate-forme est en quelque sorte un effecteur ponctuel et l'orientation peut donc être quelconque malgré la présence d'un plancher.

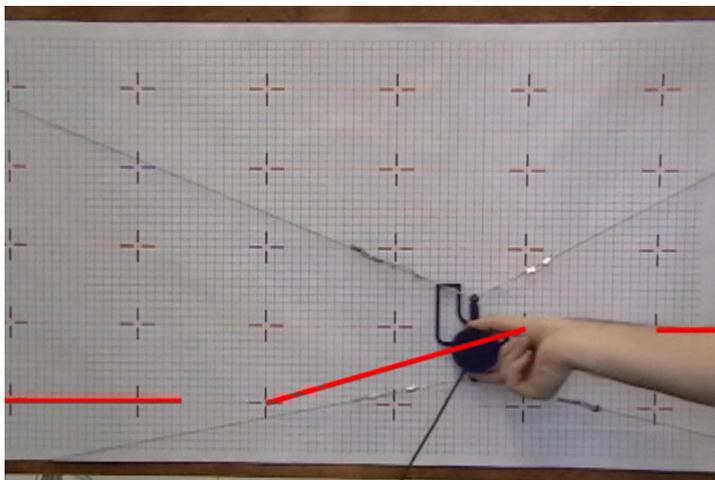


Figure 67 - Démo Réelle - Génération de consigne dynamique à 2 DDL

Ce scénario se retrouve sur le cédérom d'accompagnement sous l'appellation « 8) *Démo Réelle - Génération de consigne dynamique à 2 DDL.avi* ». Il est possible de remarquer que le pied peut se déplacer librement dans l'environnement virtuel (commande en force

nulle) jusqu'à ce qu'il entre en interférence avec l'environnement virtuel. À partir de ce moment, le déplacement de la plate-forme est limité (commande en position) dans la direction de la contrainte. Son déplacement est limité dans la direction normale au plancher (commande en position) et est aidé dans la direction tangentielle au plancher (commande en force nulle). La plate-forme est régie par l'algorithme de prédiction de trajectoire qui imite le comportement de la commande hybride.

b) Un segment et une plate-forme à 3 DDL

Les neuvième et dixième vidéos montrent l'effecteur se déplaçant dans un environnement contenant un seul segment horizontal. Cette fois-ci, l'effecteur est un pied à part entière, c'est-à-dire que l'orientation de la plate-forme est contrainte par l'orientation du segment. Cette vidéo permet de visualiser comment le pied de l'utilisateur arrive à se déplacer dans l'environnement en sentant la présence du plancher et en pouvant s'y appuyer.

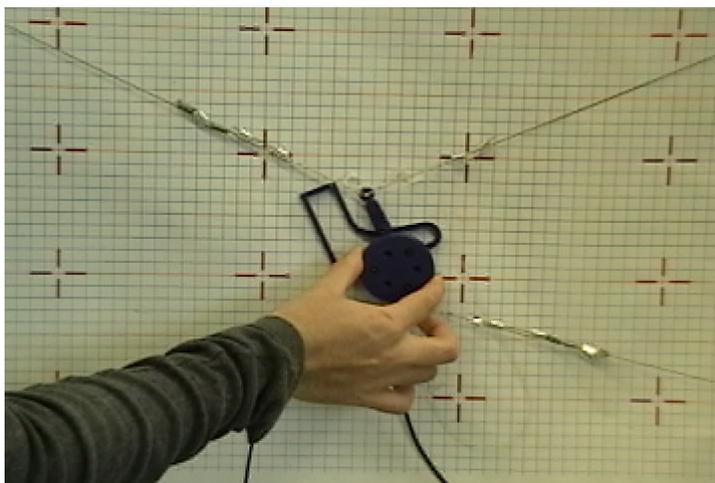


Figure 68 - Démo Réelle - Génération de consigne dynamique à 3 DDL

Ces scénarios se retrouvent sur le cédérom d'accompagnement sous les appellations « **9) Démo Réelle - Génération de consigne dynamique à 3 DDL.avi** » et « **10) Démo Réelle - Génération de consigne dynamique à 3 DDL avec facteur de vitesse.avi** ». Pour la vidéo 10, un gain  $K_v$  de 0,8 est utilisé alors que pour la vidéo 9, aucun gain  $K_v$  n'est utilisé.

### 6.2.5 Démonstration de vitesse

Jusqu'à présent, les vidéos présentaient l'interface fonctionnant à basse vitesse afin de pouvoir visualiser les différents résultats. La dernière vidéo permet de constater la vitesse à laquelle l'interface de locomotion peut fonctionner. Ce scénario se retrouve sur le cédérom d'accompagnement sous les appellations « *11) Démo Réelle - Asservissement en force à grande vitesse.avi* »

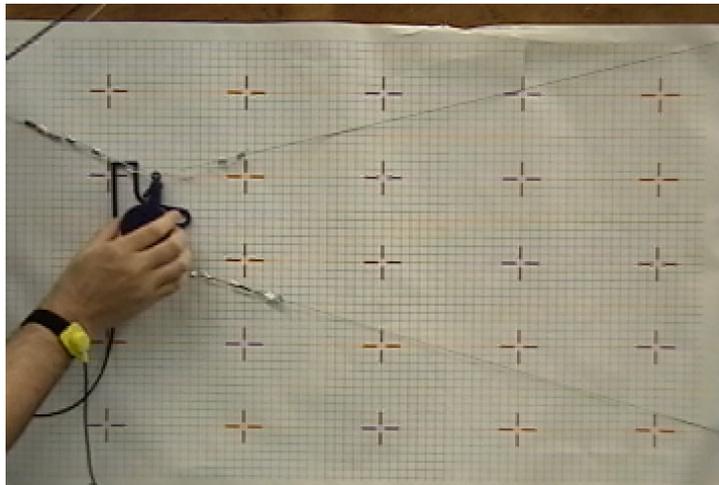


Figure 69 - Démo Réelle - Asservissement en force à grande vitesse

Il est possible de remarquer que le système réagit bien à haute vitesse et que les câbles restent toujours en tension. La plate-forme se déplace selon les intentions de l'utilisateur et elle a peu d'inertie. L'utilisateur réussit donc à déplacer la plate-forme même à haute vitesse.

Tel que discuté dans le chapitre 2, les spécifications du système grandeur nature demandaient de permettre le déplacement du pied à une vitesse de 4 m/s. Dans le cas du prototype, étant donné que le facteur d'échelle est de  $\frac{1}{4}$ , le prototype doit pouvoir parcourir 1 m/s. Dans la vidéo 11, la plate-forme peut parcourir jusqu'à 1,3 m/s, ce que respecte cette spécification.

### **6.2.6 Conclusion sur les résultats des algorithmes de commande**

Les différentes vidéos présentées permettent de visualiser la performance fournie par le prototype à 3 DDL. Le système possède une grande rigidité aux efforts externes et il est asservi en position avec une grande précision. De plus, le système montre sa grande sensibilité face aux efforts fournis par l'utilisateur par le biais du capteur d'effort. De plus, le système gère les situations où la plate-forme entre en contact avec l'environnement virtuel faisant ressentir à l'utilisateur sa topographie. Finalement, le système fonctionne aussi bien à grande vitesse qu'à basse vitesse, l'utilisateur reste toujours en contrôle de la plate-forme qui suit ses intentions tant qu'elle n'entre pas en contact avec l'environnement virtuel.

## **6.3 Conclusion**

Cette section a permis de démontrer l'efficacité des algorithmes de génération de consigne. Elle a également permis de montrer qu'il est possible de réaliser une interface de locomotion en utilisant un mécanisme à câbles. De plus, elle a permis de démontrer l'efficacité des algorithmes de commande en présentant les résultats obtenus avec le prototype à 3 DDL. La plate-forme peut donc se déplacer librement dans son environnement virtuel et l'utilisateur peut ressentir la topographie de cet environnement.

# **Conclusion**

Les deux objectifs du projet étaient de présenter l'architecture matérielle et logicielle d'une interface de locomotion utilisant un mécanisme à câbles et de montrer qu'il est possible d'utiliser un mécanisme à câble pour réaliser une interface de locomotion. Les chapitres 1 à 6 ont présenté l'atteinte de ces objectifs.

## **Résumé des travaux**

Le chapitre 1 a présenté les différentes architectures d'interface de locomotion ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients. Il a présenté aussi la liste des fonctionnalités souhaitables pour une interface de locomotion.

Le chapitre 2 a présenté la solution proposée, le cahier des charges ainsi que l'architecture matérielle et logicielle. Ce chapitre a décrit le premier objectif du mémoire, définir l'architecture matérielle et logicielle de l'interface de locomotion.

Le chapitre 3 a permis d'établir les notions préalables à la compréhension du chapitre 4.

Le chapitre 4 a présenté les différentes stratégies de commande afin de mettre en œuvre le prototype de l'interface de locomotion. Il a présenté, tant de façon générale que détaillée, les différentes stratégies de génération de consigne et de commande en position. Les algorithmes proposés reposent sur des principes simples, ils sont stables et efficaces. En plus de leur simplicité, ils rendent possible la réalisation de l'interface de locomotion : permettre à l'utilisateur de l'interface de se déplacer dans un monde virtuel et de ressentir sa topographie.

Le chapitre 5 a présenté trois solutions pour palier à divers problèmes de précision de la commande en position. La réalisation du mécanisme d'enroulement, l'utilisation des câbles d'acier ainsi que l'utilisation d'une procédure de calibrage ont permis d'obtenir une commande en position très précise.

Finalement, le chapitre 6 a montré l'efficacité des algorithmes de génération de consigne par des essais de simulation. Il a présenté aussi les résultats obtenus avec le prototype d'interface de locomotion. Il a permis de voir l'efficacité du prototype quand aux algorithmes de génération de consigne et de commande en position. Les résultats obtenus avec le prototype permettent de conclure qu'il est possible d'utiliser un mécanisme à câbles pour réaliser une interface de locomotion. Le deuxième objectif du mémoire est ainsi atteint.

## **Travaux futurs et perspectives d'exploitation de l'interface de locomotion**

La prochaine étape du projet consiste à réaliser un prototype de grandeur réelle à 6 DDL. Pour atteindre cet objectif, il faudra trouver un moyen de limiter et de réduire l'effet de l'interférence entre les câbles. Il faudra aussi implanter un algorithme de rappel pour garder l'utilisateur au centre de l'espace de travail. Il faudra finalement convertir tous les algorithmes décrits dans ce mémoire au scénario à 6 DDL. Pour améliorer les performances et la qualité de l'expérience de réalité virtuelle, d'autres travaux pourraient être réalisés. Ces travaux

sont décrits en détails dans l'annexe F. De plus, cette section décrit des perspectives d'exploitation autres que celles décrites en introduction.

## Bibliographie

- [1] Macedonia, M.R., Zyda, M.J., Pratt, D.R., Barham, P.T., and Zeswitz, S., “NPSNET : A Network Software Architecture for Large Scale Environments”, Presence, Vol. 3, No.4, 1994, p. 265-287.
- [2] Brogan, D.C. Metoyer, R.A., and Hodgins, J.K., “Dynamically Simulated Characters in Virtual Environments”, SIGGRAPH 97, 1997, p.216.
- [3] Iwata, H., “Artificial Reality for Walking About Large Scale Virtual Space”, Human Interface News and Report 5.1, 1990, p. 49-52.
- [4] Iwata, H., Fujii, T., “Virtual Perambulator : A Novel Interface Device for Locomotion in Virtual Environments”, Proc. IEEE VR Annual Symposium, 1996, p.60-65.
- [5] VR Systems UL, <http://www.vr-systems.ndtilda.co.uk/sphere1.htm>.
- [6] Hollerbach, J.M., “Locomotion and Haptic Interfaces to Virtual Environments”, Intl. Conf. Field and Service Robotics: Robotics Applications for the Next Millenium, Pittsburgh, Aug. 1999, (#3 – Y)
- [7] Noma, H., Miyasoto, T., “Design for Locomotion Interface in a Large Scale Virtual Environment, ATLAS: ATR Locomotion Interface for Active Self-Motion”, Proc. ASME Dynamic Systems and Control Division, VOL. DSC-64, Anaheim, CA, Nov. 1998, p.111-118.

- [8] Van der Eerden, W.J., Otten, E., Even-zohar, O., “CAREN : Computer-Assisted Rehabilitation Environment”, in *Medicine Meets Virtual Reality*, J.D. Westwood et al. (Eds.), IOS Press, 1999, p. 373-378.
- [9] Darken, R., Cockayne, W., Carmein, D., “The Omni-Directional Treadmill : A Locomotion Device for Virtual Worlds”, *Proceedings of UIST’97*, 1997, p. 213-221.
- [10] Iwata, H., “Walking about virtual environments on an infinite floor”, *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, 1999, p. 286-293.
- [11] Lorenzo, M. et.al. OSIRIS. *SIGGRAPH’95 Visual Proceedings*, 1995, p.129.
- [12] SARCOS Biport. Hollerbach, J.M., “Locomotion interfaces”, *Handbook of Virtual Environments Technology*, K.M. Stanney, ed., Lawrence Erlbaum Associates, inc., 2002, pp. 239-254.
- [13] Iwata, H., “Walking about virtual environments on an infinite floor”, *Proceedings of IEEE Virtual Reality*, 1999, p. 286-293.
- [14] Roston, G.P., & Peurach, T. “A whole body kinesthetic display device for virtual reality applications”, In *Proc. IEEE Intl. Conf. Robotics and Automation*, 1997, p. 3006-3011.
- [15] Winter, D.A., “The Biomechanics and Motor Control of Human Gait : Normal, Elderly and Pathological”, Second Edition, University of Waterloo Press, 1991.
- [16] Winter, D.A., “Biomechanics of Human Movement”, N.Y. : John Wiley & Sons, 1990. QP 303.W59
- [17] Reid, L.D. et Nahon, M. A., “Flight Simulation Motion-Base drive algorithms : Part 1-Developing and testing the equations”, University of Toronto : Institute for aerospace studies, 1985, p 3.8, Tableau 3.2.
- [18] Gouttefarde, B., “On the properties and the determination of the wrench-closure workspace of planar parallel cable-driven mechanisms”, *Proceedings of DETC’04*, Salt Lake City, 2004.
- [19] 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, octobre 2004.
- [20] Côté, G., “Analyse et conception de mécanismes parallèles actionnés par câbles”, *Mémoire de maîtrise*, Université Laval, octobre 2003.

- [21] Barette, G., “Analyse des mécanismes parallèles actionnés par câbles”, Mémoire de maîtrise, Université Laval, octobre 2000.
- [22] Gosselin, C.M., “Éléments de robotique GMC-17693”, Notes de cours, Département de génie mécanique, Université Laval, 2003, 186p
- [23] Gosselin, C.M., “Mécanique des manipulateurs GMC-64388”, Notes de cours, Département de génie mécanique, Université Laval, 2004. 154p.
- [24] Christensen, R., Hollerbach, J.M., Xu, Y., and Meek, S., “Inertial force feedback for the Treadport locomotion interface”, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 9, 2000, pp.1-14.
- [25] Goldfarb, D. et Idnani, A., “A numerically stable dual method for solving strictly convex quadratic programs”, Journal of Mathematical programming, Vol. 27, No. 4, 1983, pp 1-33.
- [26] Powell, M.J.D., “On the quadratic programming algorithm of Goldfarb and Idnani”, Math. Prog. Study, 25, 1985, p.46-61.
- [27] Desbiens, A., “Systèmes et commande linéaires GEL-19963”, Notes de cours, Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval, 2001, 414p.
- [28] Pomerleau, A., “La commande de procédés industriels GEL-17598”, Notes de cours, Département de génie électrique et de génie informatique, Université Laval, 1997, 414p.

## **Annexe A**

### **Synthèse des caractéristique des interfaces de locomotion**

Les tableaux qui suivent présentent une synthèse des caractéristiques des interfaces de locomotion ainsi que les manœuvres qu'elles permettent. La légende utilisée est la suivante :

N/D : Non-Déterminé

G : Grand

M : Moyen

P : Petit

O : Oui

N : Non

S : Simple

C : Complexe

Tableau 11 – Caractéristiques générales des interfaces de locomotion

	Pédaler	Plate-forme pour pieds	Marcher en place	Sphère	Tread-Port	ATLAS	Caren	ODT	Torus	NELI
Degrés de libertés	2	3	2	2	3	2	6	2	2	6
Complexité de réalisation	S	S	S	C	S	S	C	C	C	C
Complexité de contrôle	S	C	S	S	C	C	C	C	C	C
Marcher Naturellement	N	O	N	O	O	O	O	O	O	O
Tourner naturellement	N	N	N	O	N	N	N	O	O	?
Topologies variables (O/N)	N	O	N	N	O	N	O	N	N	O
Sécurité	O	O	O	N	O	O	O	O	O	O
Sensation de la topographie	O	O	N	N	N	O	O	N	O	O
Accélération tolérables	G	G	G	P	M	M	M	M	M	M
Temps d'adaptation	?	?	?	?	?	?	?	G	?	?
Tracking system Pieds	Directe	Directe	Directe	Directe	Mesurée	Mesurée	Mesurée	Mesurée	?	Directe
Tracking system Center de masse	N/D	?	N/D	Directe	Directe	Mesurée	Mesurée	Directe	?	Directe
Tracking system	Mécanique	Mécanique	Magnétique	Mécanique	Mécanique	Optique	Magnétique	Mécanique	Magnétique	Mécanique

	Pédaler	Plate-forme pour pieds	Marcher en Place	Sphère	Tread-Port	ATLAS	Caren	ODT	Torus	NELI
Stratégie pour tourner	Angle aux hanches	?	Angle aux hanches	Naturelle	Mesure d'écart au centre de l'espace de travail	Angle aux hanches ou pieds	?	Naturelle	?	Naturelle
Vitesse maximale (m/s)	Sans limite	N/D	Sans limite	N/D	5	N/D	N/D	2	1,2	N/D

Tableau 12 - Manoeuvrabilité des interfaces de locomotion

	Pédaler	Plate-forme pour pieds	Marcher en place	Sphère	Tread Port	ATLAS	Caren	ODT	Torus	NE LI
Marcher	N	O	N	O	O	O	O	O	O	O
Courir	N	O	N	O	O	O	O	O	O	N
Genoux	N	N	N	O	O	O	O	N	O	N
Ramper	N	N	N	O	O	O	O	N	O	N
Sauter	N	?	O	?	O	O	O	O	O	?
Côté	N	O	O	O	O	O	O	O	O	O
Se pencher	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?
Pente	O	O	O	?	O	O	O	N	?	O
Escalier	N	O	N	N	N	N	N	N	N	O
Bruit	?	?	?	?	?	?	?	O	?	N

## **Annexe B**

### **Seuils de perception des accélérations**

Afin de déterminer les spécifications de dimensionnement du système, il est nécessaire d'avoir une idée des seuils de perception des accélérations linéaires. Il faut implanter une stratégie de rappel à l'origine afin de permettre de simuler le déplacement dans un environnement aux dimensions infinies à l'aide d'un système aux dimensions finies. Ce rappel consiste à appliquer une force ramenant l'utilisateur vers le centre de l'espace de travail. La force maximale qu'on peut appliquer à l'utilisateur a un impact direct sur la détermination des dimensions du système. Cette force maximale ne doit pas être trop grande. La personne se rendra compte qu'elle est ramenée. Elle ne doit pas être trop petite, car cela impliquerait d'avoir un espace de travail trop grand. Afin de déterminer ces forces maximales, une

recherche dans la littérature a été conduite sur les seuils de perception des accélérations linéaires. Il a été possible de déduire les spécifications du système à partir de ces seuils.

Le tableau 11 présente les seuils de perception des accélérations qui ont été trouvés dans Reid et Nahon [17]. Reid et Nahon ont déterminé que les seuils de perception sont dépendants de l'activité mentale des usagers. Si les usagers se concentrent à identifier les accélérations, les seuils sont trois fois moins élevés que s'ils sont en train d'effectuer un travail mental autre. De plus, s'il y a présence de repères visuels (visual cues), le seuil de tolérance peut être encore plus grand. Par contre, aucun facteur de gain n'est clairement fourni dans ce cas.

Tableau 13 - Seuils de perception des accélérations linéaires

	Avant- Arrière	Gauche- Droit	Haut-Bas
Seuils de perception de l'accélération (avec attention portée sur les accélérations) (m/s <sup>2</sup> )	0,17	0,17	0,28
Seuils de perception de l'accélération (sans attention portée sur les accélérations) (m/s <sup>2</sup> )	0,51	0,51	0,84

## Annexe C

### Calcul de l'espace de travail

La section qui suit présente une technique pour déterminer l'espace de travail nécessaire à partir d'un modèle de course et des seuils de perception des accélérations.

Christensen et al. [24] propose un modèle de course :

$$v(t) = v_m (1 - e^{(-k_v t)}).$$

En intégrant l'équation, on déduit :

$$x(t) = v_m \left( t + \frac{e^{(-k_v t)} - 1}{k_v} \right)$$

où  $k_v$  est un facteur de réaction du marcheur et  $v_m$  est la vitesse maximale de marche.

Winter [15] suggère que la vitesse moyenne de la marche chez une personne normale est de 1,375 m/s. Il faut environ  $\frac{1}{2}$  seconde pour atteindre cette vitesse de croisière. Pour se donner une marge de manœuvre, la valeur de vitesse de croisière utilisée dans le calcul sera de 1,5 m/s. Les paramètres  $v_m$  et  $k_v$  sont fixés en fonction de ces informations.

La figure 70 montre l'évolution de la vitesse (en rouge) de la personne en fonction du temps et l'évolution de la position (en bleu) de la personne en fonction du temps. On remarque que si aucun rappel n'est implanté, la personne s'éloigne rapidement du centre de l'espace de travail.

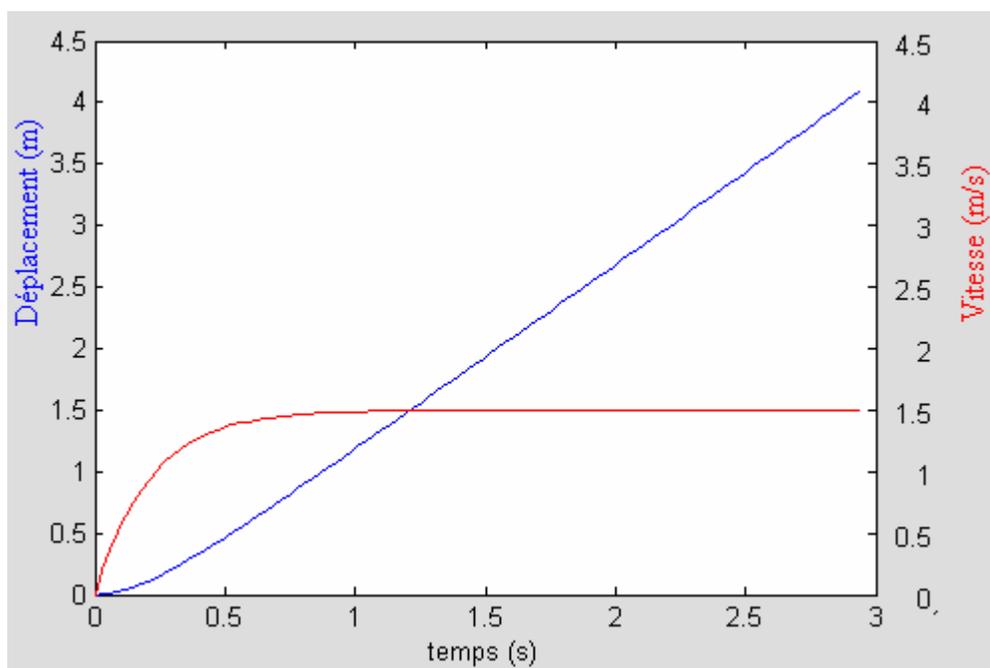


Figure 70 - Vitesse (rouge) et position (bleu) de l'utilisateur en fonction du temps sans le rappel

Il est possible de calculer le déplacement causé par le rappel en se basant sur l'équation suivante :

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2},$$

où  $x_0$  et  $v_0$  sont nuls et  $a$  est une valeur constante fixée selon les seuils de perception. Selon les seuils de perception de Reid et Nahon dans la direction arrière-avant,  $a = 0,5 \text{ m/s}^2$ .

Le déplacement total de l'utilisateur est le déplacement dû à son propre déplacement duquel on soustrait le déplacement de rappel :

$$x(t) = v_m \left( t + \frac{e^{(-k_v t)} - 1}{k_v} \right) - \frac{at^2}{2}.$$

La figure 71 montre le déplacement (en bleu) de la personne en fonction du temps et sa vitesse (en rouge) avec le rappel.

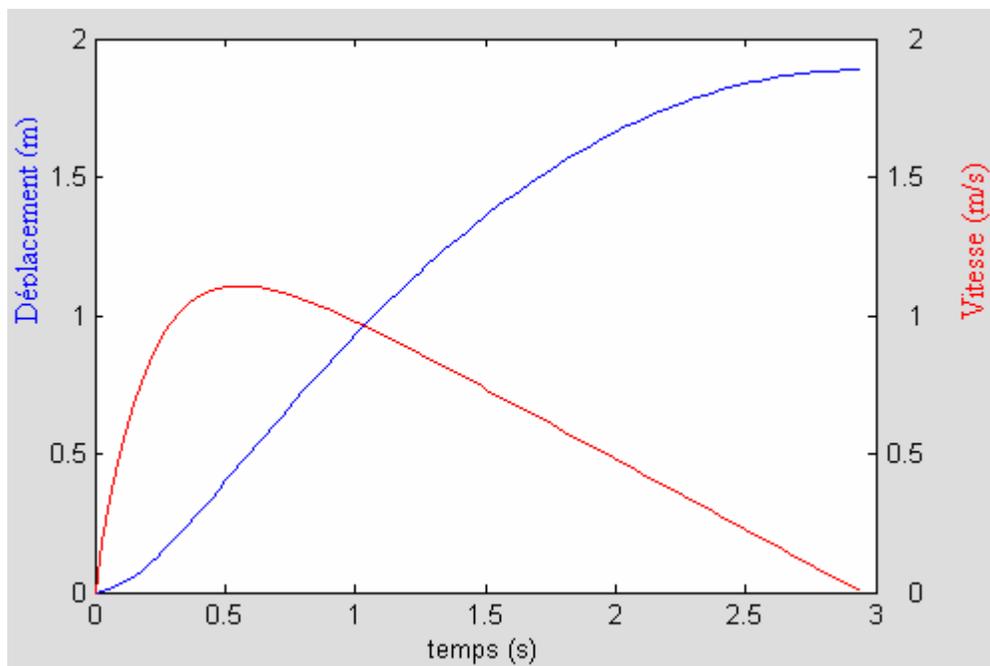


Figure 71 – Vitesse (rouge) et position (bleu) de l'utilisateur en fonction temps avec le rappel

Il est possible de voir que la vitesse atteint la valeur 0 autour de 3 secondes. Il faut donc 3 secondes avant que le rappel réussisse à arrêter l'éloignement de la personne du centre de

l'espace de travail. Pendant ces 3 secondes, il a réussi à parcourir 1,875 mètres. Ce sont ces 1,875 mètres qui définissent l'espace de travail requis par le système.

## **Annexe D**

### **Programmation quadratique**

La programmation quadratique est un algorithme d'optimisation avec contraintes. Il permet, entre autres, de solutionner un système d'équations sous-déterminé avec respect de contraintes. Comme il a été trouvé à l'équation (3.15), il existe plusieurs solutions de forces articulaires permettant d'appliquer une même force cartésienne à l'effecteur. Une solution intéressante est la solution à norme minimale, i.e.: la solution qui respecte le système d'équations pour lequel la norme des forces dans le câble est la plus petite. Cette solution est idéale du point de vue du contrôle car il empêche les actionneurs de travailler de façon antagoniste. Elle est donc idéale d'un point de vue énergétique. Cette solution doit aussi respecter les tensions minimale et maximale admissibles dans les câbles. Sous forme d'équations, le problème à résoudre est le suivant :

$$\min_{\boldsymbol{\tau}} \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau}^T \mathbf{W} \boldsymbol{\tau}, \quad (3.19)$$

soumis à

$$\mathbf{F} = \mathbf{J}^T \boldsymbol{\tau}, \quad (3.20)$$

et à

$$\tau_{\min} \leq \tau \leq \tau_{\max} \quad (3.21)$$

où  $\mathbf{W}$  est une matrice de poids qui peut être la matrice identité si on ne veut privilégier aucun câble.

L'algorithme de Goldfarb et Idnani [25] mis en œuvre de Powell [26] est un excellent exemple de programmation quadratique.

## **Annexe E**

### **Explication du fonctionnement des vidéos**

Un cédérom accompagne ce mémoire. Sur ce cédérom, il est possible de retrouver les vidéos référencées dans le chapitre des résultats. Les fichiers sont numérotés dans l'ordre chronologique du mémoire et ils portent le même nom que la référence dans ce chapitre. Le logiciel recommandé pour l'écoute des vidéos est Windows Media Player. Il est aussi recommandé de copier les fichiers hors du cédérom pour une écoute plus fluide.

## **Annexe F**

### **Explication détaillée des travaux futurs**

Cette section décrit les améliorations qui devraient être apportées au système. Les améliorations peuvent être au niveau du matériel ou du logiciel. Elle présente aussi des exemples d'utilisation de l'interface de locomotion ou des dérivés de l'interface.

#### **F.1 Améliorations matérielles**

Premièrement, plusieurs améliorations pourraient être apportées au système d'enroulement. Tout d'abord, les moteurs pourraient être changés au profit de moteurs plus puissants, sans brosse (Brushless), qui ont une réponse en couple linéaire au courant fourni (moteurs linéaires) et qui ont peu de friction statique et dynamique. Deuxièmement, les guides

d'enroulement devraient être revus, car il y a un petit espacement entre le guide et la cage de l'enrouleur, ce qui permet aux câbles d'en sortir, à l'occasion. Finalement, lorsque le bon fonctionnement des enrouleurs sera validé par un usage fonctionnel à long terme, il pourrait être bon d'encapsuler les enrouleurs dans une boîte fermée et insonorisée. Ceci permettrait de réduire le bruit produit par les enrouleurs.

Maintenant, voici les améliorations à apporter au niveau de l'effecteur. Premièrement, il serait pratique d'avoir un socle d'entreposage de l'effecteur (Effector Socket). Ce socle permettrait de maintenir l'effecteur dans une pose de référence connue. De cette façon, lors de l'initialisation du système, il ne serait pas nécessaire d'aller positionner à la main l'effecteur à une position de référence. Il y aurait ainsi un gain de temps et de précision. À la fin d'une expérience, le système pourrait déplacer l'effecteur vers le socle facilitant ainsi la prochaine expérience.

Dans ce mémoire, il n'a pas été discuté comment seraient harnachés les pieds sur les plateformes. Le mécanisme d'harnachement devrait être un mécanisme similaire à une attache de botte de ski de fond. Ceci permettrait d'avoir un degré de liberté passif au niveau de la jointure du pied et des orteils. Le pied serait attaché par le bout des orteils et le talon serait libre de la plate-forme. L'utilisateur pourrait lever le talon tout en appliquant une force avec ses orteils sur la plate-forme. La figure suivante permet de visualiser le mode d'harnachement.

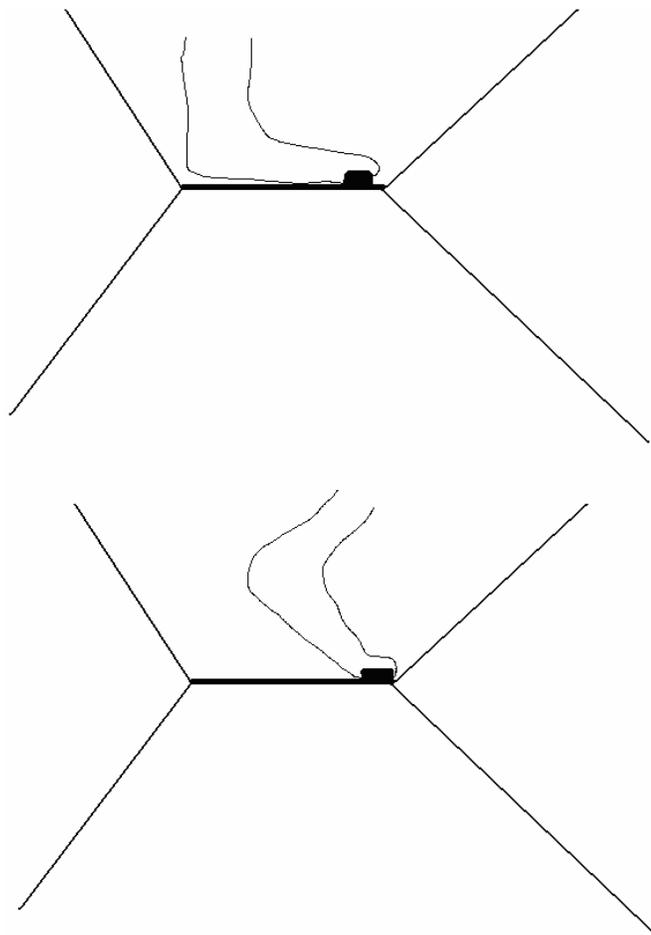


Figure 72 - Mode d'harnachement du pied sur la plate-forme

Le capteur de force serait situé au niveau des orteils afin de toujours être en mesure de capter les intentions de l'utilisateur.

Un autre ajout pourrait être fait au niveau de l'harnachement du pied. Le mécanisme d'attache devrait être en mesure de se détacher du pied dans le cas où il y a une trop grande force de torsion. Le mécanisme d'attache d'une botte de ski alpin est un excellent exemple.

Voici maintenant une proposition au niveau de l'architecture globale du système. Au lieu que le pied repose directement sur la plate-forme, il devrait reposer sur une table tournante permettant un degré de liberté autour de l'axe de la jambe. Cette table tournante reposerait

sur la plate-forme et serait motorisée. Ceci pourrait permettre d'obtenir de plus grands angles d'azimut pour les pieds. De plus, en découplant l'angle d'azimut du contrôle des plates-formes par câble, le mécanisme pourrait être utilisé que pour contrôler les plates-formes sur 5 DDL. Étant donné que le DDL relié à l'azimut des pieds est le plus contraignant face à l'espace des configurations polyvalentes, il serait possible d'obtenir des gains pour les débattements sur tous les autres axes.

Des améliorations sur divers plans sont maintenant présentées. Le harnais de sécurité permettant de garder l'utilisateur dans les airs en cas de problème devrait être relié à un bouton panique. De cette façon, lors de la chute de l'utilisateur, le système devrait se mettre à l'arrêt. Une autre idée est d'ajouter des câbles actifs entre les plates-formes. De cette façon, il serait possible de produire des forces vers l'intérieur des pieds. Cette composante de force est la plus difficile à produire avec l'architecture courante, car elle nécessite d'avoir des câbles qui se croisent.

Maintenant, voici une idée concernant la gestion des interférences. Pour pouvoir permettre le croisement des jambes, il faudrait doubler les câbles intérieurs (2 câbles par plate-forme). Pour chaque doublon de câbles d'une plate-forme, le doublon se retrouve de part et d'autre du câble correspondant sur l'autre plate-forme. De cette façon, on sélectionne le câble qui n'est pas en interférence selon la position du pied de la deuxième plate-forme.

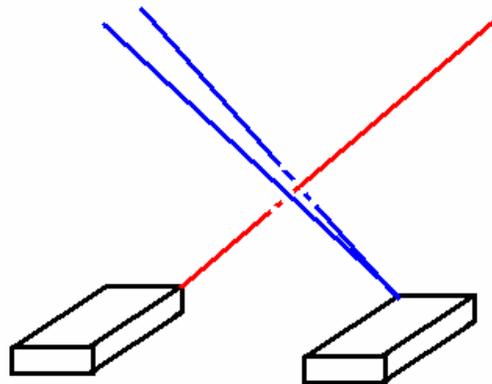


Figure 73 - Duplication des câbles intérieurs pour réduire l'interférence

Finalement, la dernière idée concerne la réalisation d'une interface de locomotion de deuxième génération. Cette idée permettrait d'avoir un azimut pour les hanches de  $\pm 180$  degrés. Les moteurs seraient montés sur les extrémités d'un cylindre. Ce cylindre est mobile en étant monté sur le rail d'un autre cylindre fixe. Le cylindre mobile peut tourner sur le cylindre fixe. Un seul moteur supplémentaire est nécessaire. Lorsque l'utilisateur effectue une rotation, le cylindre se tourne dans la même direction que l'utilisateur de façon à garder l'utilisateur en tout temps dans l'orientation où l'espace de travail est optimal.

## **F.2 Améliorations logicielles**

Cette section présente différentes modifications qui pourraient être apportées au système logiciel afin d'améliorer les performances de l'interface de locomotion.

Le premier type d'amélioration est au sujet des sensations fournies par le système. Afin de bien faire ressentir l'interaction du pied avec son environnement, il faudrait implanter un coefficient de friction statique et dynamique virtuel. Les forces de friction devraient limiter le déplacement tangentiel du pied sur le plancher en fonction de la force normale appliquée, permettant d'appuyer le pied sur le plancher. De plus, ceci pourrait permettre de simuler différents types de plancher : asphalté, vase, glace, etc. De plus, il serait possible de simuler des coefficients de friction différents dans les différents axes. Ceci permettrait de simuler, par exemple, un patin sur la glace nécessitant un grand coefficient de friction perpendiculaire à la lame et un petit coefficient de friction parallèle à la lame.

Le deuxième type d'amélioration concerne l'ajout d'une fonctionnalité. Comme le système est très limité sur l'angle de rotation d'azimut, il serait possible de détecter les intentions de tourner de l'utilisateur. Par exemple, si la personne oriente son pied ou sa jambe dans une orientation proche des limites d'orientation, on pourrait interpréter cela comme une intention de rotation et faire tourner l'avatar de l'utilisateur dans le monde virtuel. Une stratégie similaire est utilisée dans le « SARCOS TreadPort » [6].

Le troisième type d'amélioration concerne l'évaluation des seuils de perception des accélérations. Ce mémoire présente des seuils de perception d'accélération. Ces seuils ont été déterminés dans un contexte différent (simulateurs de vol) que celui de l'interface de locomotion. Il serait intéressant d'évaluer avec une plus grande exactitude les seuils de perception. Par exemple, il serait possible de faire des tests d'accélération sur tapis roulant. Idéalement, un harnais pourrait être utilisé pour montrer les gains quant aux seuils d'accélération qu'il est possible d'avoir avec ce dernier. Finalement, il serait possible d'évaluer l'impact réel de la présence de références visuelles (visual cues).

Tel que mentionné précédemment, les contrôleurs moteurs n'ont pas d'intégrateur, ce sont des PD. Si l'utilisateur applique de très grandes forces à la plate-forme, il peut la faire quitter sa consigne sans que les moteurs ne puissent réagir. Le correcteur de perturbation pourrait agir ainsi : l'utilisateur applique une force à l'effecteur qui est mesurée par le capteur de force. Cette force peut être contrebalancée en appliquant des tensions dans les câbles. Les contrôleurs en tension permettront d'appliquer ces forces en utilisant par exemple, l'algorithme de programmation quadratique tel que discuté à l'annexe D.

### **F.3 Perspectives d'exploitation de l'interface de locomotion**

Cette section présente des exemples d'utilisation de l'interface de locomotion.

Premièrement, en collaboration avec l'ajout des coefficients de friction, il serait possible de simuler une faible friction dans une direction et une grande friction. De cette façon, il serait possible de simuler un patin sur la glace. L'interface pourrait donc être utilisée pour l'entraînement de patineurs de vitesse.

Deuxièmement, il serait possible de simuler l'escalade de glace ou de roche en changeant la configuration des moteurs en les plaçant sur un prisme rectangulaire orienté en hauteur. Il serait possible de simuler la sensation de rentrer les bottes d'escalades dans la glace, de

s'appuyer sur les plates-formes et de grimper ainsi le mur de glace. Il pourrait aussi être intéressant d'ajouter des mécanismes pour les mains.

Finalement, après la mise en œuvre d'un mécanisme de rappel, il serait facile de réaliser un simulateur de tapis roulant.

## **F.4 Ordre des priorités**

Voici dans quel ordre les prochaines étapes de réalisation de l'interface de locomotion grandeur nature devraient être réalisées :

- 1) Réaliser l'algorithme de rappel en 3 DDL,
- 2) Gérer les interférences en 3 DDL. Avoir un cinquième câble et choisir les quatre câbles actifs en fonction de l'interférence avec un objet réel ou virtuel et un câble,
- 3) Intégrer des coefficients de friction statique et dynamique,
- 4) Convertir les algorithmes en 6 DDL et réaliser le prototype à 6 DDL,
- 5) Développer un générateur de consigne en 6 DDL,
- 6) Gérer les interférences en 6 DDL,
- 7) Réaliser une deuxième plate-forme,
- 8) Réaliser un harnais servant pour le rappel des hanches,
- 9) Interfacier avec un écran de RV (HMD ou écran).