

GREG BILLETTE

**ROBOT PARALLÈLE À CÂBLES SIMULANT DES
CONTACTS RIGIDES**

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

FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2010

Abstract

The research project presented in this Master's thesis was conducted for the obtention of a Master's degree in Mechanical Engineering. The goal of the research was to produce a haptic device with a cable robot that was capable of reproducing sharp and rigid contacts during a virtual reality simulation. A sword fighting simulator was built in order to serve as a test-bench because a simulation such as this requires the kind of contacts that this research strives to build.

The bulk of the work that was done was concentrated on building prototype reels for a cable mechanism. These reels were conceived for the purpose of creating impacts by triggering the collision of two metallic parts. The ensuing vibrations would then travel to the user from the reels by way of the cables and the end-effector and would therefore give the sensation of hitting a solid object. The mechanisms that were created are very innovative and show much promise. The operating principles as well as the creative process that took place in order to develop these reels will be detailed in this thesis. Also, the performance of these mechanisms are evaluated and a list of recommendations is given in order to create a more advanced prototype.

Résumé

Le projet de recherche qui est présenté dans ce mémoire a été réalisé dans le cadre d'une maîtrise en génie mécanique. Le but de ces recherches était de réaliser un mécanisme haptique avec un robot à câbles ayant la capacité de reproduire des contacts brusques et rigides durant une simulation en réalité virtuelle. Un simulateur de combat d'épée élémentaire a donc été construit pour servir de banc d'essai puisque ce genre de simulation nécessite ces genres de contacts.

La majeure partie du projet était consacrée à l'élaboration des prototypes d'enrouleurs du mécanisme à câbles. Ces enrouleurs ont été conçus pour créer des impacts en induisant la collision de deux petites pièces métalliques. Les vibrations créées ainsi voyagent des enrouleurs vers l'utilisateur par l'entremise des câbles et l'effecteur et donnent ainsi la sensation de frapper un objet rigide. Les mécanismes ainsi créés sont très innovateurs et démontrent beaucoup de potentiel. Le fonctionnement de ces enrouleurs, ainsi que le processus de conception qui a mené à l'élaboration de ceux-ci est détaillé tout au long de ce mémoire. De plus, la performance de ces mécanismes est évaluée et il y a une liste de recommandations pour créer un prototype plus avancé.

Avant-propos

“Lorsque je serai mort, je vais laisser mon corps à la science fiction”

— *Steven Wright*

Ayant complété ce mémoire, je suis constamment porté à revisiter le cheminement qui m’a amené là où je suis rendu. Il est étonnant de constater que ma première intention était de devenir pompier. Une technique, un baccalauréat, une maîtrise et sept ans plus tard je ne suis pas en mesure de vous expliquer ce qui s’est passé. Une chose est certaine, je ne suis pas très bon dans la planification à long terme. Je pense que j’ai plutôt toujours suivi mon instinct et fait ce qui me passionnait.

Travailler dans un laboratoire de robotique était un peu déconcertant pour moi au départ étant donné les nombreuses preuves concernant une éventuelle destruction de l’humanité par des forces robotiques rebelles¹. Par contre, peu importe les conséquences, il y aura toujours des individus qui seront prêts à réaliser ce malheur pour faire de l’argent. Alors je me suis dit : Pourquoi pas moi aussi !

Je dois dire que travailler au laboratoire de robotique était un vrai plaisir pour moi. Je voudrais premièrement remercier «Le Boss», le professeur Clément Gosselin pour

¹Terminator 1,2, 3 et 4 ; La Matrice ; Battlestar Galactica ; I, Robot ; Dune et Dr Who

m'avoir accepté dans son laboratoire et de m'avoir attribué ce projet. Aussi, je tiens à remercier Thierry, Simon et Boris pour tout leur soutien ainsi que tous les membres du laboratoire pour avoir fait en sorte que ce lieu de travail soit aussi agréable.

Merci beaucoup à mes parents pour leur soutien et pour m'avoir fourni une adresse en Ontario pour ainsi ne pas avoir à payer 600\$ par année pour une assurance médicament qui ne couvre même pas ma seule dépense médicale, soit un pot d'Advil à 8\$ par année.

Durant la dernière année, une merveilleuse femme est entrée dans ma vie. Je voudrais remercier ma copine Marianne pour tout son soutien et son encouragement. Bien qu'elle ne comprenait pas très bien ce que je faisais durant ma maîtrise, elle savait que mes études mèneraient éventuellement à un gros salaire et une grosse maison. Je dois dire que j'ai toujours aimé les filles qui savent comment garder les yeux droits sur le but.

J'aimerais remercier les gagnants du prix Igg Nobel, Dominique M.R. Georget, R. Parker, et Andrew C. Smith de Norwich en Angleterre qui ont fait une analyse rigoureuse des propriétés des céréales imbibées de lait. Leurs recherches font en sorte que mon projet de simulateur d'épée ressemble au seul espoir pour un futur prospère de l'humanité. Je tiens aussi à remercier le peuple de l'Éthiopie, qui était le premier à cultiver le café après avoir été témoin des effets de cette plante sur leurs troupeau de chèvres. Bien que les nombreux cafés que j'ai bus durant ma maîtrise ne m'ont aucunement aidé à être productif et travailler plus longtemps et au contraire, m'ont probablement nu plus qu'autre chose, je tiens à dire qu'ils étaient tout de même agréables.

Table des matières

Abstract	i
Résumé	ii
Avant-propos	iii
Table des matières	v
Liste des tableaux	viii
Liste des figures	ix
Liste des symboles	xi
Introduction	1
1 L'haptique et les mécanismes haptiques	3
1.1 Un bref historique des mécanismes haptiques.	3
1.2 Les capacités sensorielles de l'humain	6
1.2.1 L'effet de la température sur la détermination des matériaux touchés	6
1.2.2 Le sens kinesthésique	7
1.2.3 Les mécanorécepteurs humains	7
1.3 Artifices pour tromper les sens	9
1.3.1 Donner la sensation de température d'un certain matériau	9
1.3.2 Produire des efforts dans les muscles de l'utilisateur	10
1.3.3 Stimuler les mécanorécepteurs	11

1.4	Les interfaces haptiques	13
1.4.1	Les robots	15
1.4.2	Les robots à câbles	17
2	Conception du mécanisme d'impact	21
2.1	Une expérience révélatrice	22
2.1.1	Expérience du mur sans frein	23
2.1.2	Expérience du mur avec frein	24
2.1.3	Les leçons apprises	25
2.2	Le principe de fonctionnement du mécanisme d'impact	28
2.2.1	Le prototype d'interface haptique	28
2.2.2	Les enrouleurs	30
2.2.3	Le fonctionnement des embrayages	31
2.2.3.1	Le mécanisme en mode libre	32
2.2.3.2	Le mécanisme en mode contact	32
2.2.4	Une petite note sur les embrayages	37
2.2.5	Avantages et inconvénients du mécanisme	38
3	Commande de l'interface haptique	39
3.1	Le robot maître	40
3.1.1	Le problème géométrique direct	40
3.1.2	La tension dans les câbles	41
3.2	Le robot virtuel	43
3.2.1	Orientation de l'épée virtuelle	46
3.2.1.1	Initialisation des équations de Lagrange	47
3.2.1.2	Effet du ressort et de l'amortisseur	50
3.2.1.3	Résolution des équations	51
3.2.1.4	Une dernière petite étape	52
3.2.2	La dynamique des impacts	53
3.3	Stratégie générale de contact pour une interface à 6 ddl	55
4	Évaluation des enrouleurs et discussion des améliorations requises	59
4.1	Évaluation des contacts	60
4.1.1	Élaboration du banc de test	60
4.1.2	Montage	61
4.1.3	Impact sur deux axes	63
4.1.4	Impact sur trois axes	64
4.1.5	Résultat des expériences	64

4.1.5.1	Expériences à deux câbles	64
4.1.5.2	Expériences à trois câbles	65
4.1.6	Discussion des mesures	66
4.2	Discussion des améliorations requises pour les enrouleurs	68
4.2.1	Les embrayages	69
4.2.2	Capteur de position pour la butée virtuelle	72
4.2.3	Les butées	74
4.2.4	Autres modifications mécaniques nécessaires	75
Conclusion		78
Bibliographie		80
A Les plans de fabrications des enrouleurs		83
A.1	Modification au design initial	102
A.2	Fiches techniques des pièces commandées	105
B Le programme de contrôle de l'interface		116
B.1	Les composantes de l'interface haptique à câbles	116
B.2	Communication entre les noeuds et l'ordinateur	121
B.3	Composants de l'interface de contrôle	122
B.4	Composants du programme du noeud maître.	125
B.5	Composants du programme du noeud esclave.	127

Liste des tableaux

1	Nomenclature générale	xi
2	Nomenclature des robots à câbles	xii
3	Nomenclature des repères mobiles et des coordonnées généralisées . . .	xii
1.1	Valeurs empiriques pour les fréquences et les périodes d'atténuation de vibrations (tiré de Okamura et Dennerlein [20])	13
4.1	Tableau synthèse des mesures	66

Liste des figures

1	Nomenclature du robot à câble (réel)	xiii
2	Les coordonnées généralisées	xiii
1.1	Exemples d'amplitudes transitoires de vibration. (Dessinés à partir des valeurs du tableau 1.1.)	14
1.2	Différence entre l'architecture sérielle et parallèle.	16
1.3	PHANTOM Premium 3.0 à 6 ddl. (Tiré du site http://www.immersion.com)	17
1.4	Novint Falcon. (Tiré du site http://home.novint.com)	18
1.5	Différence entre un robot parallèle et un robot parallèle à câbles.	19
2.1	Le premier montage expérimental.	22
2.2	Expérience du mur virtuel	23
2.3	La réponse voulue.	26
2.4	Interface haptique conventionnelle.	27
2.5	Interface haptique avec nouvelle stratégie.	28
2.6	Nouveau concept d'interface haptique.	29
2.7	Un enrouleur.	31
2.8	Détection des contacts.	32
2.9	Vue de proche : Les Butées	33
2.10	Schema d'un enrouleur lorsqu'il n'y a aucun contact	34
2.11	État des butées en temps normal	34
2.12	État des butées en mode «contact»	35
2.13	Le mouvement des butées.	36

3.1	Commande de l'orientation de l'épée	44
3.2	Detection des contacts modifiée.	45
3.3	Contrôleur pour l'orientation de l'épée	47
3.4	Un interface haptique à câble avec 6 ddl	56
3.5	Les deux effecteurs de l'interface à 6 ddl	57
4.1	Le montage expérimental	62
4.2	Application d'une force sur deux axes	63
4.3	Application d'une force sur deux axes	64
4.4	Résultat des mesures d'impact	65
4.5	Vue de face : enrouleur	69
4.6	Vue de proche : enrouleur	70
4.7	Guide à câble à rouleaux	77
B.1	L'étiquetage des enrouleurs	118
B.2	Les composantes physiques de l'interface haptique	120
B.3	La communication entre les noeuds et l'ordinateur	121
B.4	L'interface de control	123
B.5	L'environnement virtuelle avec Virtual Reality Toolbox TM	124
B.6	L'environnement virtuel de base fait avec Matlab TM	124
B.7	Le noeud de calcul maître	126
B.8	Le noeud de calcul esclave	128

Liste des symboles

TAB. 1: Nomenclature générale

a	Un vecteur
$\ \mathbf{a}\$	La norme du vecteur a
$\hat{\mathbf{a}}$	Vecteur unitaire dans la direction du vecteur a
B	Une matrice

TAB. 2: Nomenclature des robots à câbles

$\hat{\mathbf{e}}_x$	Vecteur unitaire selon la direction x dans le repère absolu
$\hat{\mathbf{e}}_y$	Vecteur unitaire selon la direction y dans le repère absolu
$\hat{\mathbf{e}}_z$	Vecteur unitaire selon la direction z dans le repère absolu
$\boldsymbol{\rho}_{ri}$	Vecteur du i^e câble du robot maître (réel)
$\boldsymbol{\rho}_{vi}$	Vecteur du i^e câble du robot virtuel
\mathbf{r}_i	Position de la i^e bobine
\mathbf{p}_{ri}	Position du bout de l'épée réelle
\mathbf{p}_{rc}	Position du point de contact sur l'épée réelle
\mathbf{p}_{rm}	Position du centre de masse de l'épée réelle
\mathbf{p}_{ro}	Position du début de l'épée réelle
\mathbf{p}_{vi}	Position du bout de l'épée virtuelle
\mathbf{p}_{vc}	Position du point de contact sur l'épée virtuelle
\mathbf{p}_{vp}	Projection du point \mathbf{p}_{ri} sur l'épée virtuelle
\mathbf{p}_{vo}	Position du début de l'épée virtuelle
\mathbf{M}	Une matrice de masse généralisée

TAB. 3: Nomenclature des repères mobiles et des coordonnées généralisées

$\hat{\mathbf{e}}_n$	Vecteur unitaire selon la direction de la normale au point de contact imminent
$\hat{\mathbf{e}}_{ra}$	Vecteur unitaire selon la direction normale à $\hat{\mathbf{e}}_n$ et $\hat{\mathbf{e}}_{r\ell}$
$\hat{\mathbf{e}}_{r\ell}$	Vecteur unitaire selon la direction de la lame de l'épée virtuelle
\dot{q}_{r1}	vitesse du point \mathbf{p}_{rm} dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_n$
\dot{q}_{r2}	vitesse du point \mathbf{p}_{rm} dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{ra}$
\dot{q}_{r3}	vitesse du point \mathbf{p}_{rm} dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{r\ell}$
\dot{q}_{r4}	vitesse angulaire dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_n$
\dot{q}_{r5}	vitesse angulaire dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{ra}$
\dot{q}_{r6}	vitesse angulaire dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{r\ell}$
$\hat{\mathbf{e}}_{va}$	Vecteur unitaire selon la direction normale à $\hat{\mathbf{e}}_n$ et $\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}$
$\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}$	Vecteur unitaire selon la direction de la lame de l'épée réel
\dot{q}_{v1}	vitesse du point \mathbf{p}_{vm} dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_n$
\dot{q}_{v2}	vitesse du point \mathbf{p}_{vm} dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{va}$
\dot{q}_{v3}	vitesse du point \mathbf{p}_{vm} dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}$
\dot{q}_{v4}	vitesse angulaire dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_n$
\dot{q}_{v5}	vitesse angulaire dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{va}$
\dot{q}_{v6}	vitesse angulaire dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}$

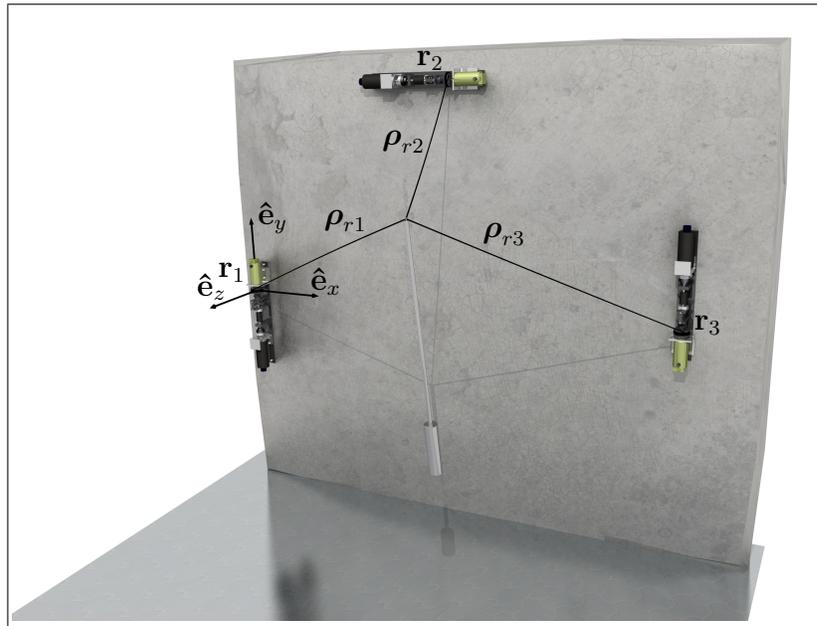


FIG. 1: Nomenclature du robot à câble (réel)

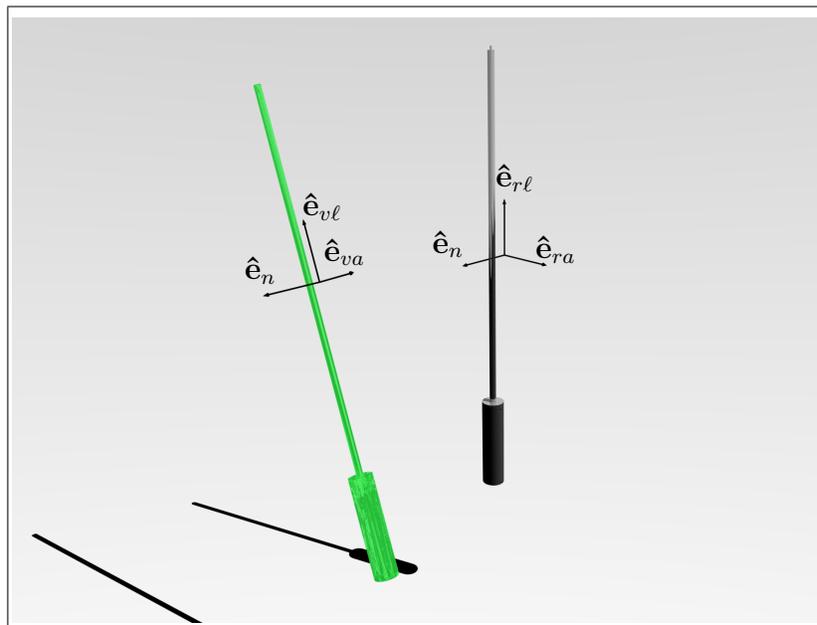


FIG. 2: Les coordonnées généralisées

Introduction

Les recherches présentées dans ce mémoire visent à contribuer à l'avancement technologique dans le domaine de l'haptique. Ce domaine relativement nouveau cherche à augmenter le réalisme des simulations en réalité virtuelle en stimulant les sens de l'utilisateur qui normalement ne sont pas sollicités dans des simulations conventionnelles, soit le sens du toucher. La robotique est un domaine de recherche qui est bien placé pour fournir des solutions pour ce nouveau domaine, principalement en raison du fait que depuis plusieurs années, de nombreux chercheurs ont voulu améliorer la coopération humain-robot pour ainsi mieux intégrer les robots dans des lieux de travail et ainsi augmenter la productivité. Les recherches en coopération se sont donc adaptées naturellement au domaine de l'haptique.

Le mandat donné à l'auteur de ce texte était de trouver un moyen d'utiliser un mécanisme à câbles en tant qu'interface haptique. De plus, le mécanisme devait être en mesure de produire des contacts qui sont brusques et rigides. Plus précisément, l'interface devait servir en tant que simulateur de combat d'épée, qui est comme nous savons, une activité qui nécessite la simulation de contacts très rigides. Les mécanismes à câbles sont relativement nouveaux en robotique. Ils ont l'avantage d'avoir de grands espaces de travail et ils sont généralement capables d'atteindre de grandes vitesses en raison de leurs effecteurs de faibles inerties. Par contre, ils ont le désavantage d'être peu rigides et cela vient compromettre leur habileté à produire des rendus haptiques crédibles. Le but du projet est donc de produire des contacts haptiques rigides en

utilisant un mécanisme qui n'est pas communément reconnu comme étant rigide.

La partie difficile de ce projet venait du fait qu'il fallait combiner deux domaines de recherche relativement nouveaux, soit l'haptique et les mécanismes à câbles. Les exemples de mécanismes similaires ne sont pas très abondants. Par contre, ce désavantage pouvait aussi être vu comme un avantage. En effet, étant donné que l'auteur n'était pas bombardé d'une multitude d'idées préconçues, il était moins bloqué par des paradigmes. Cela lui a permis de trouver la solution innovante qui est présentée dans ce texte.

Pour bien comprendre l'haptique, il fallait comprendre le sens du toucher de l'être humain. Dans le premier chapitre de ce mémoire, il y aura un compte-rendu des recherches effectuées à cet égard. Ces recherches ont permis de bien comprendre le phénomène et ont même permis d'établir un banc d'essai pour évaluer la performance du mécanisme conçu durant ce projet. Aussi dans ce chapitre, il y a une revue de divers types de mécanismes haptiques construits dans le passé qui ont quand même fourni des idées pour concevoir l'interface.

Dans le deuxième chapitre, un enrouleur sera présenté comme solution pour générer des contacts haptiques qui sont rigides. L'idée du mécanisme vient en grande partie des nombreuses expériences qui ont été effectuées au début du projet. Son fonctionnement mécanique sera détaillé au long de ce chapitre. Dans le troisième chapitre, c'est toute la commande de l'interface haptique qui sera expliquée en détail. Cette méthode de commande, selon l'auteur, fournit une nouvelle méthode de génération de contact haptique qui a beaucoup de potentiel.

Finalement, dans le dernier chapitre, une évaluation de la performance sera montrée et discutée. Aussi, il y aura une liste de suggestions pour améliorer les enrouleurs qui pourraient ainsi servir à quiconque voudrait produire un prototype d'interface haptique à câbles plus avancé.

Chapitre 1

L'haptique et les mécanismes haptiques

Dans ce chapitre, il y aura premièrement un examen du sens du toucher de l'humain. Par la suite, diverses méthodes pour tromper ce sens seront examinées. Finalement, il y aura une revue des divers types de technologies utilisées dans le domaine de l'haptique.

1.1 Un bref historique des mécanismes haptiques.

L'être humain est doté de plusieurs « capteurs » afin qu'il puisse observer son environnement du mieux qu'il peut. Ces sens, qui ont été développés durant son évolution,

l'ont aidé à survivre et à développer son intelligence. L'efficacité et la complexité de ces sens font en sorte qu'il est difficile de les tromper. Dans le domaine de l'haptique, c'est ce que nous cherchons à faire.

Les premiers sens que les humains ont essayé de tromper étaient l'ouïe et la vision. Depuis la préhistoire, les chasseurs essayaient d'imiter les cris de leurs proies afin de les attirer. Au XIX^e siècle il y eut un mouvement artistique qui avait comme but de peindre le portrait d'un sujet sur un tableau de façon à ce que celui soit le plus fidèle possible au sujet réel. C'est justement ce que l'on a appelé le Réalisme.

C'est aussi durant le XIX^e siècle que les premiers instruments pour enregistrer et jouer des sons ont été inventés. Un fait intéressant : Le phonautographe était le premier appareil à être capable d'enregistrer des sons. Les sons étaient enregistrés mécaniquement, c'est-à-dire que les vibrations du son étaient amplifiées mécaniquement et faisaient vibrer un stylet qui gravait ces vibrations sur une feuille de papier. Évidemment, aucun appareil de l'époque n'était capable de lire ces enregistrements, mais dernièrement il a été possible d'analyser numériquement un de ces enregistrements et recréer la mélodie. Par conséquent, la plus ancienne reproduction sonore de l'humanité dure dix secondes et l'on peut y entendre une voix féminine qui chante « Au clair de la lune ». De nos jours, nous avons des systèmes « surround sound » à six canaux étant capables de reproduire la sphère d'ouïe de l'humain. Nous sommes donc en mesure d'écouter cette même chanson comme si nous étions dans un opéra et que la femme qui la chantait était juste devant nous.

De façon semblable, la télévision a commencé avec la photographie en noir et blanc pour ensuite devenir des films muets. Ensuite, c'est des écrans cathodiques qui ont été utilisés pour recréer des images en couleur. Finalement, de nos jours ce sont des écrans à cristaux liquides qui sont utilisés pour reproduire des images très convaincantes. Comme par exemple : la merveille technologique qui se retrouve dans le salon de l'auteur de ce texte.

Nous vivons maintenant à une période de l'histoire où il a été jugé pertinent de tromper d'autres sens. C'est évidemment le but des recherches présentées dans ce mémoire. Avec les années qui ont passé, nos sociétés ont réalisé que les simulations étaient un très bon moyen d'entraîner des personnes afin qu'elles puissent accomplir certaines des nombreuses nouvelles tâches complexes qui ont été créées. Un des meilleurs exemples

pour illustrer ceci sont les simulateurs d'avion. Étant donné la difficulté qu'un pilote éprouve lorsqu'il dirige son avion dans une couverture de nuages il a été jugé nécessaire de développer des simulateurs afin d'éviter les pertes de vie et les bris de matériel. Ces premiers simulateurs, qui ont été construits dans les années '30, étaient activés avec des actionneurs pneumatiques et donnaient donc une sensation rudimentaire de voler. Il s'agissait donc de ce que l'on pourrait désigner comme les tout premiers mécanismes haptiques.

Les simulateurs de vol qui sont fabriqués de nos jours sont nettement plus sophistiqués. Dans ces appareils, plusieurs sens sont stimulés. Il y a un écran géant qui prend la forme de la fenêtre avant de l'avion, des haut-parleurs qui simulent les sons de l'appareil et un robot parallèle qui fait bouger le faux habitacle pour donner l'impression que le pilote se retrouve dans un avion en mouvement. Ces machines donnent alors un bon exemple de mécanismes qui combinent plusieurs méthodes pour tromper les sens et elles nous montrent aussi à quel point l'haptique peut augmenter le réalisme d'une simulation.

C'est donc une agglomération d'information que l'on cherche à transmettre à l'utilisateur afin d'augmenter le réalisme de la simulation. Nous savons depuis longtemps que la combinaison d'une trame sonore avec une vidéo aide à la compréhension de ce qui est présenté. Dans le cas d'une simulation de tâche qui nécessite un certain effort physique, il a été prouvé que l'ajout d'information tactile aide à la réalisation de cette tâche. Cependant, il se peut, comme dans le cas des jeux vidéo, que l'on cherche tout simplement à augmenter l'immersion du joueur dans son environnement virtuel.

Il est évident que pour avoir une simulation parfaite il faudrait incorporer une forme de stimulation pour tous les sens, y compris l'odorat et le goût. Par contre, ces derniers ne sont pas le sujet de cette étude¹. Le but de ce travail est plutôt d'avancer la recherche dans le domaine de l'haptique. Particulièrement sur ce qui porte sur les retours de force de l'environnement virtuel envers l'utilisateur.

¹En fait, les artifices pour tromper les sens de l'odorat et du goût n'ont pas fait l'objet de beaucoup d'études.

1.2 Les capacités sensorielles de l'humain

Lorsqu'on parle du sens du toucher, on peut habituellement parler de trois sens qui sont distincts. Cependant, l'information obtenue par ces trois sens est combinée par le cerveau pour aider l'humain à bien identifier les objets qu'il perçoit et les forces qu'il ressent. La première de ces perceptions du toucher est le sens thermique. En plus de nous donner la météo courante, le sens thermique est aussi capable de nous donner de l'information sur l'objet que l'on touche. Le deuxième du toucher est le sens kinesthésique et c'est la sensation des efforts dans les muscles, les tendons et les articulations. Le troisième sens est le sens tactile. Dans ce cas-ci, c'est la déformation de la peau qui est captée par de petits mécanorécepteurs.

Dans cette section, nous allons examiner chacun de ces trois sens ainsi que l'information qui est perçue par ces sens.

1.2.1 L'effet de la température sur la détermination des matériaux touchés

Lorsqu'ils sont touchés, la plupart des matériaux donnent la sensation d'être froids même s'ils sont à la température de la pièce. C'est le cas pour les métaux. Plus rarement, comme dans le cas du nylon, certains matériaux donneront la sensation d'être chauds. C'est une autre méthode que l'on utilise quotidiennement et sans le savoir afin de déterminer le type de matériau que nous touchons.

Dans [10] et [9] il a été déterminé que cette sensation ne provenait pas d'une température plus basse, mais plutôt d'une différence de taux de transfert de chaleur qui se produit très rapidement lorsque la peau d'une personne touche un objet quelconque. Cette différence de taux de transfert de chaleur serait causée en grande partie par la capacité thermique C_p de chaque matériau. C'est pour cette raison que les métaux, qui ont une grande capacité thermique, provoquent une variation du taux de transfert thermique sur la peau d'une personne et donnent donc une sensation de froid.

1.2.2 Le sens kinesthésique

Le sens kinesthésique donne à l'humain la capacité de percevoir les efforts dans ses muscles[11] et lui fournit aussi la position de ses membres. Il a été déterminé que la sensation ne provenait pas de capteurs situés dans les muscles et que cette sensation serait plutôt générée à partir des commandes de notre système moteur.

Il serait intéressant de mentionner que l'habileté d'un être humain à mesurer les forces ne dépend pas seulement du sens kinesthésique, mais aussi du sens tactile. Par exemple, pour une tâche de discrimination de poids de différentes masses dans une main humaine. Si la main est supportée par une table et qu'un poids se situe dans la paume, ce seront les mécanorécepteurs de la main qui seront en mesure de faire la discrimination des poids. Par contre, il a été déterminé dans [25] que la discrimination est plus précise dans le cas où la main est non supportée et que par conséquent le sens kinesthésique est sollicité en tandem avec le sens tactile.

La sollicitation du sens kinesthésique est le but premier de la plupart des interfaces haptiques. Pour ces mécanismes, on cherche toujours à produire un torseur souvent noté par \mathbf{w} envers les muscles de l'utilisateur. Ce vecteur à six éléments, qui comprend à la fois les forces et les couples, doit être appliqué par un mécanisme externe.

1.2.3 Les mécanorécepteurs humains

Dans la peau glabre² de chaque personne, il se trouve une multitude de mécanorécepteurs capables de mesurer les déformations de la peau. Ces récepteurs sont donc sollicités à chaque fois qu'un objet entre en contact avec la peau d'une personne et ils peuvent donc nous donner de l'information sur l'objet touché, soit sa forme, sa texture ainsi que la force d'impact avec cet objet au moment du contact. En tout, il y a deux types d'unités récepteurs, nommés SA et FA, avec deux sous-types chacune. Elles font toutes partie du système nerveux et elles envoient de l'information au cerveau par l'entremise de petits signaux électriques envoyés dans les nerfs afférents³. Pour les unités

²La peau sans poil. Par ex. : les doigts, les paumes des mains et les lèvres.

³Les nerfs afférents transmettent l'information du corps vers le cerveau, les nerfs efférents transmettent du cerveau vers le corps.

SA, le taux de signaux envoyé est proportionnel à une amplitude de force sur la peau tandis que pour le cas des unités FA il s'agit plutôt d'une proportionnalité avec la fréquence d'une force sur la peau[6].

L'unité SA mesure la force de déformation de la peau qui est maintenue un certain moment. Les deux sous-types se nomment tout simplement SAI et SAII. En termes un peu plus médicaux, il s'agit des cellules de Merkel pour le sous-type SAI. Pour le sous-type SAII il s'agit des terminaisons de Ruffin.

Les unités SAI ont une surface effective d'environ 10 mm^2 et sont plutôt réceptrices pendant les incréments d'une force sur la peau. Par exemple : L'augmentation de la force de serrage de la main sur un objet. Pour ce qui est des unités SAII, elles sont beaucoup moins denses que les unités SAI mais elles sont réceptrices aux stimulations éloignées. Elles sont plutôt sensibles lorsqu'une force est maintenue sur la peau de façon statique. De plus, étant donné qu'elles couvrent une plus grande surface que les unités SAI, l'information qu'elles envoient au cerveau est liée au profil de la pression qui est exercée sur la peau en trois dimensions. Ces unités sont donc capables d'envoyer au cerveau le profil d'un objet qui est tenu dans la main de la personne.

Le deuxième type d'unité se nomme FA pour « Fast Acting » et comme il a été mentionné plus haut, elles sont sensibles à des stimulus de plus hautes fréquences que les unités SA. Alors, ces unités sont donc sensibles aux changements de déformation de la peau. De plus, nous pouvons deviner que les deux sous-types se nomment FAI, autrement connu sous le nom de corpuscule de Meissner et FAII, aussi connu sous le nom de corpuscule de Pacini.

Tout comme les unités SAI, les unités FAI ont une petite surface effective et sont plutôt réceptrices aux forces initiales d'un contact sur la peau. Les unités FAII, quant à elles, sont sensibles aux vibrations temporaires. Elles ont un emplacement de faible densité sur la peau tout comme les unités SAII et elles sont sensibles au stimulus éloigné. Puisque ce sont des récepteurs qui sont sensibles aux fréquences de vibration, il est intéressant de noter que G. Westling et R.S. Johanson ont trouvé que ces unités sont sensibles aux fréquences de vibration qui varient de 50 à 500 Hz[27]. De plus, Toma et Nakajima ont ajouté que lorsque les fréquences de vibration augmentent au-delà de 60 à 100 Hz, la sensibilité augmente pour atteindre une valeur maximale vers 250 Hz. Lorsque les vibrations tombent en dessous de 60 Hz, il faut une plus grande force de

contact afin d'obtenir une bonne sensibilité[23].

1.3 Artifices pour tromper les sens

1.3.1 Donner la sensation de température d'un certain matériau

Comme il a été décrit dans la section 1.2.1, la température d'un objet, ou plutôt sa température apparente, nous donne de l'information sur ses matériaux qui le constitue. Lorsqu'une interface haptique est construite à partir d'un robot ou un autre mécanisme, on s'arrange toujours pour que l'effecteur qui sera tenu par l'utilisateur soit fabriqué avec les mêmes matériaux que l'objet qui doit être simulé. C'est le cas si on veut faire un simulateur d'automobile. Pour ce cas, on a qu'à utiliser un vrai volant d'automobile (ou une copie similaire) comme commande et le tour est joué.

Certaines personnes ont expérimenté afin d'obtenir une interface qui peut refroidir ou réchauffer la main ou un doigt d'un utilisateur précisément pour des fins de simulation de discrétisation de matériau. Dans [3] ainsi que dans la plupart des cas, un module Peltier⁴ est utilisé pour créer cet effet puisqu'il est possible d'atteindre des montées ou des descentes de température de l'ordre de 10 à 20 °C/s sur une plage de -5 à 50 °C.

La première stratégie de simulation, qui fait appel à l'utilisation d'objets qui ressemblent le plus possible aux objets virtuels, sera la stratégie utilisée pour ce projet. L'utilisateur tiendra donc une épée en métal alors il ne sera pas nécessaire de manipuler la température apparente de l'épée. Il est à noter que cette stratégie est viable aussi à cause du fait que l'utilisateur n'a jamais besoin de déposer l'épée ou d'interagir avec d'autres objets.

⁴Les modules Peltier utilisent la thermoélectricité, plus particulièrement l'effet Peltier-Seebeck, pour créer un transfert de chaleur. Ce même effet est aussi responsable du fonctionnement des thermocouples.

1.3.2 Produire des efforts dans les muscles de l'utilisateur

La stratégie qui consiste à faire en sorte que l'utilisateur tienne un objet similaire ou identique à l'objet virtuel a un autre avantage que celui décrit au paragraphe précédent. En effet cette stratégie peut subvenir en partie aux besoins du sens décrit à la sous-section 1.2.2. Le simple fait d'utiliser un objet ayant des propriétés physiques (masse et inertie) identiques à l'objet virtuel vu par l'utilisateur fait en sorte que ces propriétés n'ont pas besoin d'être simulées, chose qui est souvent difficile à faire.

Presque tous les simulateurs en réalité virtuelle cherchent à produire des forces sur l'utilisateur d'une façon ou d'une autre. On pourrait par exemple chercher à limiter les mouvements de celui-ci de façon à ce qu'il ne puisse pas passer à travers un mur virtuel ou même un plancher, dans le cas d'une interface de locomotion. Dans d'autres cas, on pourrait vouloir créer la sensation de mouvement envers l'utilisateur. C'est le cas pour les simulateurs d'avion, d'hélicoptère et même d'automobile. Il est évident que pour créer ces forces, il nous faut un mécanisme quelconque. C'est ici que la robotique entre en jeu.

Dans la section 1.4 il y aura une revue de diverses interfaces haptiques ayant été fabriquées auparavant et qui avaient comme but de produire une force quelconque sur l'utilisateur. Chaque type d'interface a ses forces et ses faiblesses, surtout pour ce qui est de sa capacité à appliquer un torseur. C'est pour cette raison que chaque interface haptique est souvent conçue spécifiquement pour un type de simulation.

Avec toutes ces différentes interfaces vient la nécessité de bien contrôler le torseur à l'effecteur. Puisque ce torseur sera appliqué sur l'utilisateur et donc perçu par son sens kinesthésique, il est alors important de bien contrôler celui-ci. À la base, il y a deux méthodes pour contrôler le torseur. La première méthode est la commande par impédance et on la rencontre couramment dans la littérature. Cette méthode consiste à utiliser la pose de l'effecteur du robot, obtenue grâce à des capteurs situés aux actionneurs, pour déterminer les forces nécessaires. Par conséquent, le mécanisme doit avoir une friction très minime pour que l'utilisateur puisse bouger l'interface sans l'usage des actionneurs⁵. Dans sa forme de base, en coordonnées cartésiennes, son équation dans

⁵C'est ce que l'on entend par le terme anglais « back-drivable »

le domaine de Laplace ressemble à ceci :

$$\mathbf{W}(s) = \mathbf{Z}(s)\Delta\mathbf{X}(s) \quad (1.1)$$

où $\mathbf{W}(s)$ est le torseur et $\Delta\mathbf{X}(s)$ se trouve à être la différence entre la position commandée et la position actuelle ($\mathbf{X}_{com}(s) - \mathbf{X}_a(s)$). Pour ce qui est du terme $\mathbf{Z}(s)$, il prend souvent la forme d'un système masse-ressort-amortisseur comme suit :

$$\mathbf{Z}(s) = \mathbf{A}s^2 + \mathbf{B}s + \mathbf{C}. \quad (1.2)$$

Dans ce cas-ci, lorsque le terme \mathbf{A} est non nul il est souvent utilisé pour annuler les effets inertiels du robot, \mathbf{B} est le vecteur des constantes d'amortissement et \mathbf{C} est le vecteur des constantes de ressort.

La deuxième méthode de commande se trouve à être l'inverse de la première. Cette fois-ci, on utilise un capteur pour mesurer l'effort que l'utilisateur applique sur l'environnement virtuel et l'interface haptique contraint les mouvements de l'utilisateur selon une déflexion simulée d'un objet virtuel. C'est ce qu'on appelle la commande par admittance et son équation de base est la suivante :

$$\Delta\mathbf{X}(s) = \mathbf{Z}^{-1}(s)\mathbf{W}(s). \quad (1.3)$$

Puisque cette méthode nécessite l'incorporation d'un capteur d'effort au mécanisme, il n'est pas nécessaire que l'utilisateur soit capable de déplacer l'interface sans l'aide des actionneurs. Il est alors plus facile d'utiliser des actionneurs munis de transmission. Par contre, il faut mitiger les effets du signal du capteur d'effort qui peut avoir tendance à être bruité et à produire une dérive.

1.3.3 Stimuler les mécanorécepteurs

Dans la section 1.2.3 il a été décrit que les mécanorécepteurs fournissent beaucoup d'information au cerveau humain. Plus particulièrement, ceux-ci aident l'humain à analyser la texture et la forme d'un objet en contact avec sa peau. Aussi, ces petites unités réceptrices peuvent aider à quantifier une collision entre un objet et la peau glabre.

Le mouvement de la peau glabre sur une surface texturée provoque des déformations qui sont détectables par des unités réceptrices. Dans [14] il a été montré que le cerveau

humain est capable d'intégrer plusieurs informations tactiles afin de classifier des objets. Plus particulièrement, il a été déterminé que la combinaison de la texture et la dureté d'un objet senti par les mécanorécepteurs étaient très efficaces pour classifier des objets. La simulation de texture ou de propriété de surface d'objet n'a pas été étudiée dans ce projet. Comme il a déjà été mentionné, un utilisateur du simulateur présenté tient une réplique de l'objet virtuel manipulé alors il n'est pas nécessaire de simuler les propriétés de surface. Par contre, il est intéressant de noter que certaines interfaces de simulation de texture existent. Par exemple le STReSS² [24] qui peut être utilisé pour afficher du braille[15].

Il y a un type de mécanorécepteur qui a été étudié plus en détail durant ce projet à cause du type d'information qu'il envoie au cerveau. Il s'agit des unités FAII qui, rappelons-nous, sont sensibles aux vibrations temporaires qui se présentent lors d'un impact avec un objet. L'information fournie par ces unités est importante puisqu'elle permet de discriminer le type de matériau qui compose l'objet qui est heurté. Il faut aussi se rappeler que ce type de récepteur est aussi sensible aux vibrations éloignées. C'est donc grâce à ce mécanorécepteur qu'une personne est en mesure de déterminer la dureté d'un matériau qui est frappé avec un marteau même si le matériau en question n'a jamais touché la peau de la personne. Cela s'explique évidemment à cause du fait que les vibrations peuvent voyager à travers le marteau pour ensuite venir stimuler les récepteurs.

Chaque matériau produit une amplitude de vibration temporaire différente au contact et ces différences sont perceptibles grâce aux mécanorécepteurs. Le modèle mathématique utilisé par Wellman et Howe pour décrire ces amplitudes temporaires est celui d'un sinus qui s'atténue exponentiellement[26]. Voici le modèle :

$$A(t) = \beta \sin(2\pi ft) e^{-\mu t} \quad (1.4)$$

où f est la fréquence de vibration, $\frac{1}{\mu}$ est la constante de temps pour l'atténuation tandis que β est l'amplitude qui est fonction de f , $\frac{1}{\mu}$ ainsi que l'énergie de l'impact. Bien que la fréquence augmente avec la dureté du matériau et que la constante de temps diminue avec la dureté du matériau, il est difficile de produire des modèles précis. C'est pour cette raison que Okamura et Dennerlein ont conclu qu'il est préférable de trouver les valeurs pour f et $\frac{1}{\mu}$ empiriquement [20]. Le tableau 1.1 montre les valeurs trouvées par Okamura et Dennerlein et à la fig. 1.1 on y trouve des exemples d'amplitudes transitoires.

TAB. 1.1: Valeurs empiriques pour les fréquences et les périodes d'atténuation de vibrations (tiré de Okamura et Dennerlein [20])

Matériau	Fréquence (Hz)	$\frac{1}{\mu}$ (ms)
Bois	67	6.48
Acrylique	128	2.13
Delerin	93	4.12
Aluminium	1471	0.47
Verre	1721	0.56
Fonte	1668	0.4
Acier	1682	0.32

Parmi tous les types de sensation que l'on pourrait transmettre à un utilisateur, il y en a deux qui ont été jugés comme étant les plus importants lors d'une simulation de combat d'épée. En effet, cette simulation d'impact requiert la présence de deux phénomènes, le premier étant la force statique ou quasi statique captée par les muscles et le deuxième étant les amplitudes transitoires de vibrations au moment de l'impact. Comme il a été décrit à la sous-section 1.3.2, le premier phénomène dépend surtout du type de robot utilisé et de son contrôle. Quant au deuxième phénomène, il requiert une nouvelle stratégie dont l'efficacité sera vérifiée en mesurant les amplitudes transitoires d'impact pour ensuite les comparer avec celles du modèle décrit plus haut.

1.4 Les interfaces haptiques

Par sa nature, l'haptique nécessite la présence d'un mécanisme physique qui entre en contact avec l'utilisateur et qui peut produire un torseur sur celui-ci. Il est à noter que dans cette sous-section, nous allons nous concentrer principalement sur la sensation de force dans les muscles et nous allons aborder les forces d'impact dans le design du mécanisme au chapitre 2. C'est ici que la robotique entre en jeu puisqu'avec un robot il est possible de suivre une trajectoire. Pour les besoins de l'haptique, c'est précisément ce qu'il faut.

La trajectoire suivie par une interface haptique n'est jamais simple puisque cela

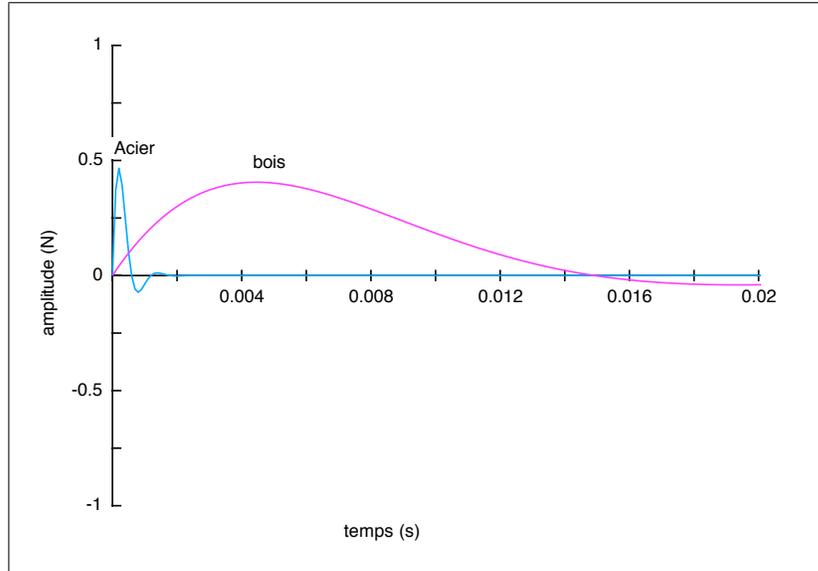


FIG. 1.1: Exemples d’amplitudes transitoires de vibration. (Dessins à partir des valeurs du tableau 1.1.)

dépend toujours du contexte. En effet, un robot servant d’interface haptique peut servir d’esclave ou de maître. En tant que robot esclave, l’interface n’est plus qu’une manette de jeu. La trajectoire dans ce cas-ci est donc celle de l’utilisateur. La difficulté à suivre cette trajectoire vient évidemment de l’imprévisibilité du mouvement d’un être humain. Si on utilise la commande par impédance, le robot doit avoir un minimum de friction pour ne pas gêner les mouvements de l’utilisateur. Ceci est compliqué par le fait que le robot a souvent une certaine masse non négligeable alors il n’est pas facile de le faire bouger de sorte qu’aucune force résultante ne soit exercée sur l’utilisateur. Si la commande par admittance est choisie, il faut bien gérer le bruit du capteur d’effort pour ne pas avoir un signal parasite qui cause un effort non voulu sur l’utilisateur.

Lorsque le robot doit exercer une force sur l’utilisateur, il passe alors en mode maître. À ce moment-là, on pourrait vouloir par exemple créer une force sur une rame tenue par un utilisateur de simulateur de canoë ou dans notre cas, créer une force sur l’épée de l’utilisateur. Le robot cherche donc à imposer une trajectoire à l’utilisateur.

C’est donc le contraste entre robot maître et robot esclave qui rend le design d’interface haptique compliqué. Si on voulait que le robot maître soit capable de produire des efforts considérables, il faut mettre des actionneurs puissants et peut-être même

des transmissions. Le problème avec cette stratégie, c'est qu'elle ajoute assurément de la friction au système et cette friction est évidemment nuisible à la trajectoire lorsque le robot est en mode esclave. Ceci décrit ce que l'on veut dire par transparence du mécanisme haptique. Le mécanisme doit donc suivre le mouvement de l'utilisateur sans créer d'impédance lorsqu'il est en mode esclave.

1.4.1 Les robots

Les robots viennent sous plusieurs formes et les définitions d'un robot viennent en beaucoup plus de formes. Par contre, la plupart des personnes s'entendent pour dire que du point de vue mécanique, la robotique vise à faire bouger des chaînes cinématiques de façon à obtenir le mouvement voulu à un effecteur qui est situé au bout de ces chaînes. Ces chaînes sont constituées d'actionneurs ainsi que de liens mécaniques et peuvent être disposés en série ou en parallèle (fig.1.2) .

Une chaîne cinématique sérielle est disposée de sorte que chaque actionneur fait bouger un lien mécanique qui à son tour sera muni d'un actionneur et ainsi de suite jusqu'au bout de cette chaîne où l'on trouve l'effecteur. Ce type de chaîne est donc ouverte. Si la chaîne cinématique avait été fermée, on parlerait plutôt de robot parallèle. Dans ce cas-là, au lieu de connecter le dernier lien mécanique à l'effecteur on le branche plutôt au premier actionneur. Un robot parallèle est composé d'une ou plusieurs de ces chaînes cinématiques fermées. Son effecteur peut être situé sur n'importe quel lien mécanique dans la chaîne.

Les chaînes cinématiques fermées ont la particularité d'avoir des articulations passives. Cela devient possible puisque la fermeture de la chaîne engendre des contraintes mécaniques qui imposent les mouvements à ces articulations. Il est facile d'imaginer ce concept si on considère le mécanisme à quatre barres situé à la fig.1.2b. Il est bien évident que si on fait bouger une des quatre articulations, les trois autres suivront. On ne pourrait pas dire de même pour un robot sériel comme celui à la fig.1.2a. Il est évident que s'il y avait présence d'articulations passives, celles-ci ne pourraient pas empêcher certaines parties du robot de s'effondrer sous l'effet de la gravité.

Les deux types de robot ont évidemment leurs qualités et leurs défauts. À cause de

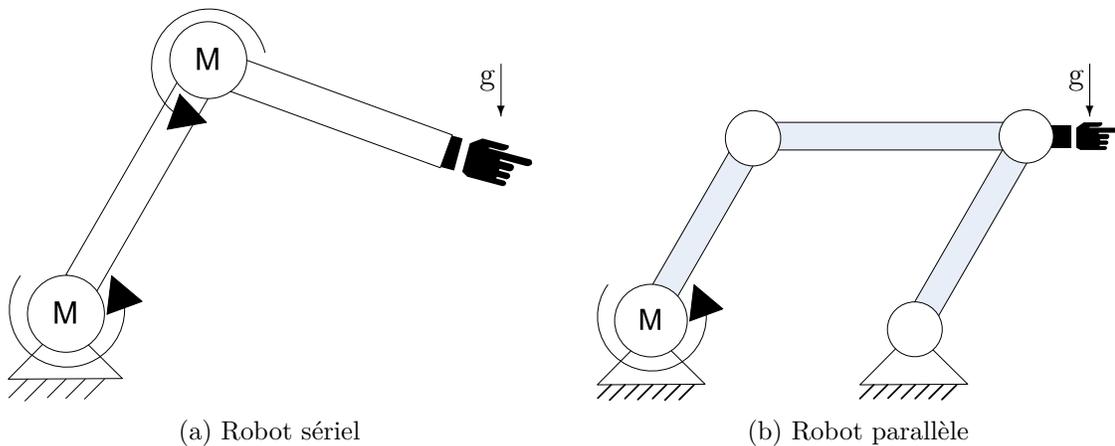


FIG. 1.2: Différence entre l'architecture sérielle et parallèle.

leurs chaînes cinématiques ouvertes, les robots sériels requièrent des actionneurs plus puissants à la base puisque ceux-ci doivent supporter la masse ou l'inertie du reste du robot. Par contre, la chaîne ouverte fait en sorte qu'il soit facile d'obtenir un bon espace de travail.

Les chaînes cinématiques fermées que l'on retrouve dans les robots parallèles ont l'avantage de donner une bonne raideur au mécanisme. Par contre, les chaînes fermées font en sorte qu'il est plus difficile de concevoir des robots parallèles avec des espaces de travail comparables à ceux que l'on pourrait avoir avec des robots sériels.

Il est très courant de placer les actionneurs d'un robot parallèle à la base. Ces moteurs n'ont donc pas besoin de supporter la masse d'autres moteurs alors il est possible d'atteindre de bonnes accélérations avec ce type de mécanisme si les liens mécaniques ne sont pas trop lourds.

La robotique est maintenant avancée à un tel point qu'il y a des interfaces haptiques qui sont disponibles en vente libre. Parmi les compagnies les plus populaires dans ce domaine on retrouve premièrement Immersion[8] qui se spécialise dans l'équipement d'entraînement médical où l'on trouve des simulateurs d'arthroscopie, endoscopie et quelques autres simulateurs d'intervention médicale spécifiques. Il y a aussi la compagnie Sensable Technologies[22], fabricant de la ligne de produits PHANTOM qui sont des interfaces haptiques à robot sériel comme celui montré à la fig.1.3. Cette ligne de robots offre un bon espace de travail grâce à leurs architectures sérielles et il est souvent

utilisé par des chercheurs pour valider des algorithmes de commande en haptique.

Pour le marché des jeux vidéo, la compagnie Novint à créé le Falcon[19], un robot parallèle à 3 degrés de liberté. Il est utilisé comme une manette de jeu qui est capable de faire de petits retours de forces (de l'ordre de 1N). Il se connecte à un ordinateur grâce à sa prise USB alors il est donc facilement intégrable à un projet de recherche.

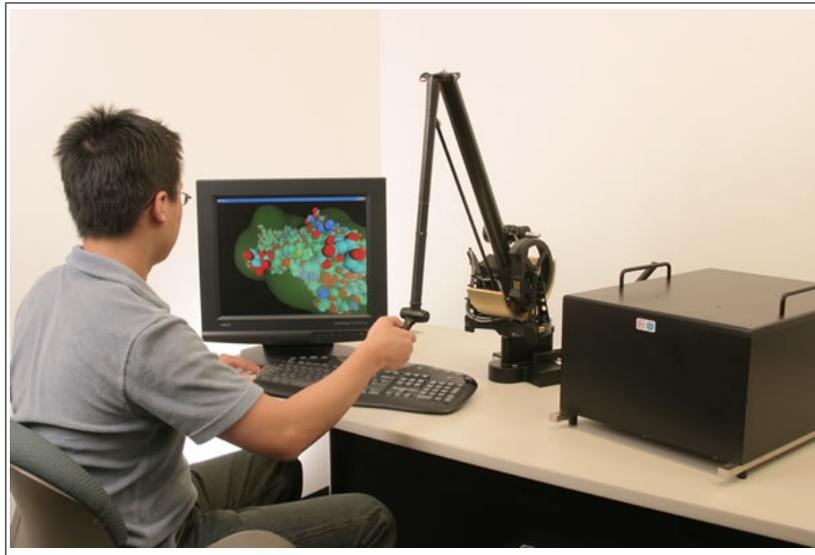


FIG. 1.3: PHANTOM Premium 3.0 à 6 ddl. (Tiré du site <http://www.immersion.com>)

1.4.2 Les robots à câbles

Pour ce projet, il n'a pas été question de faire le choix d'une architecture sérielle ou parallèle puisque l'architecture parallèle était imposée. Plus particulièrement, une architecture de robot parallèle à câbles est utilisée.

De par sa nature, un robot à câbles est un robot parallèle. Le principe de fonctionnement d'un robot à câbles ressemble beaucoup à un robot parallèle avec des articulations prismatiques actionnées. Cette ressemblance est d'autant plus mathématique qu'elle est visuelle, surtout pour les équations de cinématique tel qu'elle sont décrites pour les mécanismes parallèles à liens rigides que l'on retrouve dans la littérature [18]. Dans le cas d'un robot à câbles, on utilise un fil ou un câble qui s'enroule et qui se déroule sur une bobine afin d'augmenter ou diminuer la longueur du câble. Pour un actionneur



FIG. 1.4: Novint Falcon. (Tiré du site <http://home.novint.com>)

prismatique conventionnel, on aurait plutôt tendance à utiliser des vérins hydrauliques ou pneumatiques. Ceci étant dit, nous pouvons déjà énoncer un désavantage des mécanismes à câbles par rapport aux mécanismes parallèles conventionnels, il s'agit de leur faible raideur. Par contre, puisqu'il est possible d'enrouler de bonnes longueurs de câble, il est alors très courant d'obtenir des mécanismes ayant un espace de travail d'une bonne grandeur.

La fig.1.5 montre bien la différence entre les deux types d'architecture. Pour les deux cas, il s'agit de mécanismes plans à 2 degrés de liberté. En regardant ces deux figures, il est facile de constater un autre désavantage qui vient avec l'utilisation des robots à câbles. Dans la fig. 1.5a, il est possible de voir que les deux vérins sont suffisants pour déplacer l'effecteur dans le plan. Par contre, pour le mécanisme de la fig.1.5b il est évident que nous avons besoin d'un câble supplémentaire pour avoir le même type de déplacement. Ceci est dû au fait qu'un câble ne peut que tirer. Pour n degrés de liberté de mouvement, il faut donc $n+1$ câbles [12]. Par contre, cet énoncé est seulement valable

pour les mécanismes à câbles ayant des câbles en boucle ouverte (comme à la fig. 1.5b). Dans [17], il y a un exemple de mécanisme à câbles qui utilise des boucles fermées. Ce mécanisme, de par sa nature, nécessite donc n câbles pour n degrés de liberté. Il faut noter cependant que le mouvement des câbles en boucles fermées génèrent plus de friction que ceux en boucles ouverte en raison du fait qu'un câble en boucle fermée nécessite l'addition d'autres composantes mécaniques tels que des poulies pour pouvoir fonctionner.

Il y a cependant un avantage que l'on peut voir facilement en regardant l'emplacement des moteurs du mécanisme à câble. Ils sont situés sur la base tout comme ceux des robots parallèles à liens rigides. Bien que l'on pourrait placer les actionneurs sur l'effecteur, il est bien plus avantageux de les placer sur la base. De cette manière, le robot devient très léger puisque les câbles qui constituent les liens mécaniques sont eux-mêmes très légers. La majorité du poids (plus de 80%) senti par les actionneurs provient donc de l'effecteur. Cela fait en sorte qu'il est possible d'atteindre de grandes accélérations avec ce genre de mécanisme.

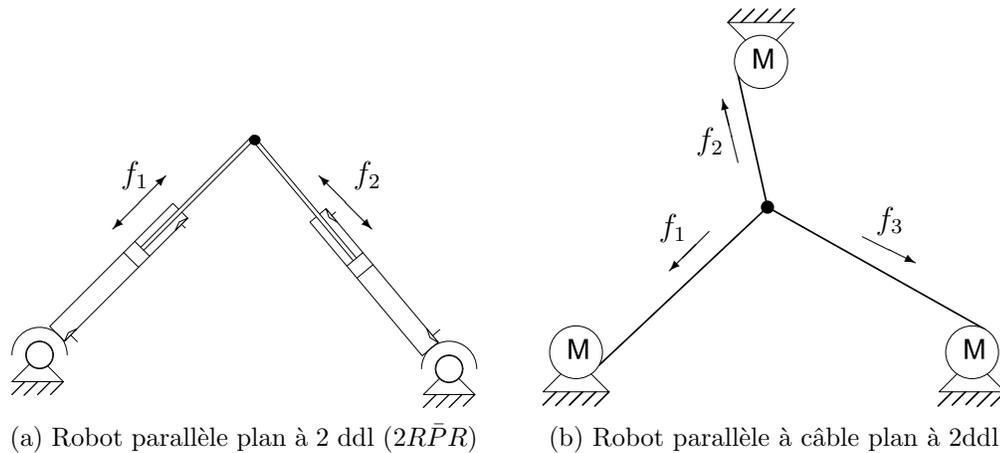


FIG. 1.5: Différence entre un robot parallèle et un robot parallèle à câbles.

L'utilisation de mécanismes à câble pour des fins de simulation de contacts rigides (le but de ce projet) pose quelques problèmes. Bien que ce type de mécanismes a l'avantage d'être capable d'atteindre de grandes accélérations et aussi d'être susceptible d'avoir des espaces de travail de grande envergure, ses défauts ont tendance à limiter leur efficacité. Une des difficultés avec toutes les interfaces haptiques provient du fait que l'utilisateur partage le même espace de travail que le robot. C'est le cas pour tous les types d'architecture de robots incluant les robots à câbles. En ce qui concerne la faible

raideur des mécanismes à câble, il est évident que cela rendra l'atteinte des objectifs fixés à la sous-section 1.3.3 plus difficile. En effet, les contacts que l'on peut générer avec ces mécanismes ont tendance à être plus mous ou « spongieux » que ceux que l'on pourrait générer avec des mécanismes à liens rigides puisque les mécanismes à câbles ont tendance à être plus compliant de nature.

Un des premiers exemples d'interface haptique à câbles est le Texas 9-string [16], une manette ou « joystick » à 6 degrés de liberté capable de produire des retours de forces. Le Spidar-G[13] est un autre exemple notable qui est utilisé pour la manutention d'objets virtuels. Il s'agit d'un mécanisme à sept degrés de liberté, six pour les déplacements et un pour la déformation de l'effecteur. Aussi, l'auteur de ce texte souhaiterait faire un clin d'oeil à d'autres recherches qui se réalisent au laboratoire de robotique de l'université Laval en soulignant le projet d'interface de locomotion à câbles[21]. Pour chacune de ces interfaces, une attention particulière a été accordée à la géométrie de l'espace de travail et l'évitement d'interférence entre les câbles ainsi que l'interférence humain-robot. Pour le projet d'interface de locomotion, le problème d'interférence était compliqué par le fait que le mécanisme comprend deux robots distincts qui devaient se partager une partie de l'espace.

Pour ce projet de simulateur de combat d'épée, aucun effort n'a été fait pour optimiser l'espace de travail ou minimiser les interférences. Les efforts ont plutôt été concentrés sur le design des enrouleurs à câble qui constitueront le robot. Plus particulièrement, ce qui était recherché, c'était de créer des contacts rigides. À la section 1.3 il a été énoncé que pour simuler des contacts rigides il est important de bien recréer les amplitudes de vibrations transitoires qui se produisent lors d'un tel événement. L'objectif principal pour le design des enrouleurs était donc de produire ces vibrations dans les enrouleurs sur la base. Cette stratégie sous-entend que ces vibrations doivent se transmettre à travers les câbles et ensuite à travers l'effecteur tenu par l'utilisateur pour que celui-ci puisse enfin les percevoir. Le danger avec cette stratégie provient de la faible raideur du mécanisme à câbles qui atténuera certainement ces vibrations. Par contre, cette stratégie a été choisie pour garder un des avantages des mécanismes à câbles, soit l'avantage de pouvoir placer les actionneurs sur la base pour alléger l'effecteur. Au chapitre 4, des résultats de mesure de contact seront présentés pour montrer l'allure des vibrations transitoires.

Chapitre 2

Conception du mécanisme d'impact

Au courant de ce chapitre, il y aura un examen du procédé qui a mené à la fabrication des enrouleurs du robot à câbles. Après avoir fait plusieurs expériences avec divers types d'actionneurs, il y a eu une meilleure compréhension de ce qu'il fallait faire pour produire des contacts rigides à l'effecteur.

Dans l'une des sections de ce chapitre, le principe de fonctionnement du mécanisme sera expliqué en détail. Puisqu'un prototype d'interface haptique devait être construit, un design d'enrouleur a été fait afin que celui-ci puisse opérer selon ce principe de fonctionnement. Aussi, une architecture de mécanisme à câbles a été choisie pour ce banc d'essai.

2.1 Une expérience révélatrice

Afin de bien comprendre et bien visualiser la problématique liée à la génération de contact rigide en milieu virtuel, il a été jugé nécessaire de construire un prototype d'enrouleur dès le tout début du projet. Le prototype, montré à la fig. 2.1, est constitué d'un moteur à courant continu, un frein magnétique et d'un câble enroulé sur une bobine. Le moteur a pour tâche de garder la tension dans le câble et le frein a pour tâche d'arrêter le câble brusquement.

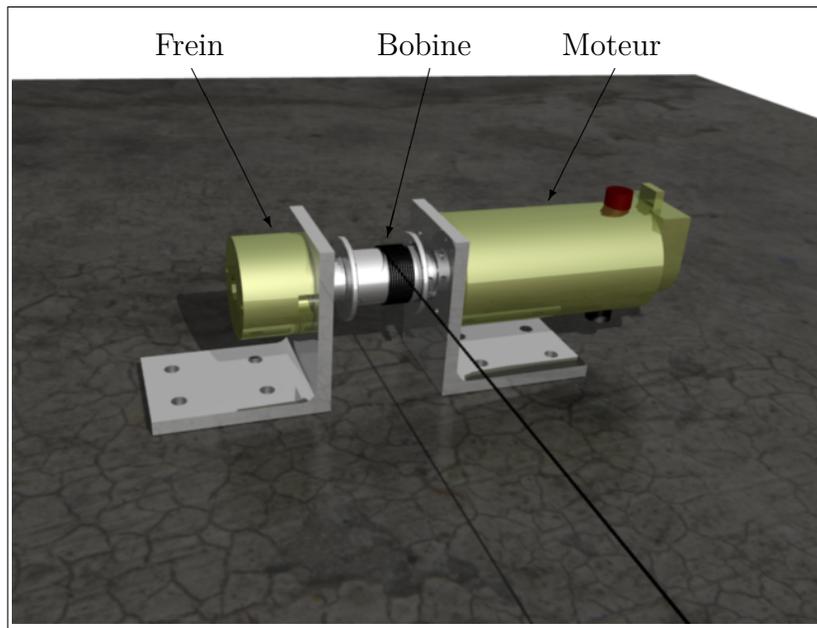


FIG. 2.1: Le premier montage expérimental.

Les expériences que l'on souhaitait réaliser avec ce montage étaient de produire des impacts avec un mur virtuel. Dans une mise en oeuvre plus complète d'un robot à câbles dans une interface haptique, ce genre d'exercice nécessiterait que l'on arrête le mouvement des câbles le plus vite possible lorsqu'un contact avec un mur est détecté. Dans une interface à plusieurs degrés de liberté, il faut arrêter le mouvement de l'effacteur dans la direction du mur virtuel. Il faut alors choisir les câbles correspondants à ce mouvement. Puisque pour ce prototype il n'y a qu'un seul enrouleur et que par conséquent, il n'y a qu'un seul degré de liberté, on arrête seulement celui-ci.

La manière avec laquelle les expériences ont été réalisées était très simple. L'utilisateur tenait le bout du câble et tirait dessus jusqu'à ce que celui-ci atteigne une certaine

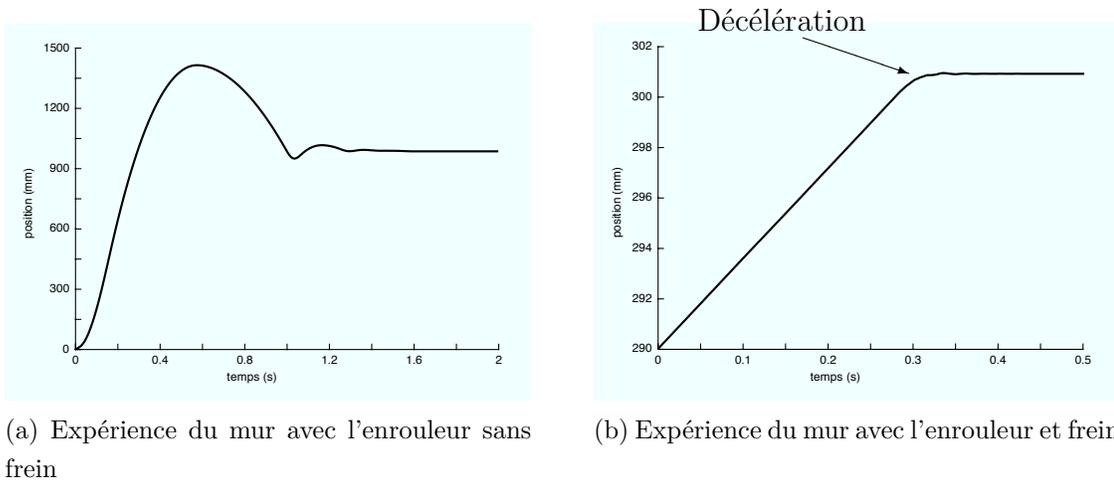


FIG. 2.2: Expérience du mur virtuel

longueur prédéfinie. À ce moment, l'utilisateur frappe un mur virtuel et il fallait donc arrêter le déploiement du câble le plus rapidement et le plus brusquement possible. Alors, il est important de mentionner que la vitesse de déploiement du câble n'était pas contrôlée avec précision. Les observations qui devaient être faites durant ces expériences étaient donc plutôt qualitatives. Ce qui était cherché, c'était tout simplement de comprendre le phénomène.

2.1.1 Expérience du mur sans frein

Pour les premières expériences, le frein n'a pas été utilisé. C'était plutôt le moteur qui était chargé d'arrêter le câble. Pour ce faire, le couple du moteur (τ_m) était contrôlé par un contrôleur en impédance qui était régi par les équations suivantes :

$$\tau_m = \begin{cases} \tau_{min} + k(x_l - x) & \text{si } x \geq x_l \\ \tau_{min} & \text{si } x < x_l \end{cases} \quad (2.1)$$

où τ_{min} est une tension minimale pour garder le câble tendu en tout temps, k est une constante de rappel de ressort et x_l est la position du mur virtuel. À la fig. 2.2a apparaît un résultat typique de contact avec un mur virtuel. Dans ce cas-ci, le mur était placé à $x_l = 1000$ mm et on peut voir qu'il y a eu un grand dépassement et ensuite le câble s'est

stabilisé autour de cette position. Au premier regard, on serait tenté de dire que l'allure de la courbe ressemble à la courbe d'amplitude de vibration transitoire (fig. 1.1) que nous cherchons à reproduire. Par contre, lorsque nous évaluons les fréquences présentes dans la fig. 2.2a, on s'aperçoit qu'elles sont en dessous de 60 Hz. Si l'on compare avec les valeurs du tableau 1.1, on se rend compte que c'est beaucoup trop bas. Ce qui était ressenti lors d'un contact avec ce type de mur virtuel, c'était une trop forte compliance. Donc, la sensation qui était perçue était celle d'un mur beaucoup trop mou.

Après avoir fait plusieurs expériences avec divers types de moteurs, certaines constatations ont pu être faites. La première est qu'il est possible d'utiliser des moteurs plus puissants pour tenter de diminuer les dépassements, mais cela engendre d'autres problèmes. En général, plus le moteur est puissant, plus il a un couple de friction élevé. Pour une interface haptique contrôlée par impédance, ce couple de friction rend difficile la tâche de déplacer l'interface sans l'aide des actionneurs (voir section 1.3.2). La seconde constatation qui a été faite était que jamais il ne serait possible d'obtenir des fréquences de vibrations plus grandes que 100 Hz à moins d'avoir des moteurs extrêmement petits et par conséquent, complètement inutiles au point de vue du couple qu'ils pourraient générer.

2.1.2 Expérience du mur avec frein

Il est apparu évident dès le début du projet qu'il fallait un autre mécanisme qui travaille en tandem avec les moteurs principaux si l'on veut améliorer la performance de notre interface pour créer le rendu d'un mur virtuel rigide. La seconde expérience réalisée a été faite justement pour évaluer la performance d'un frein lors d'un exercice d'arrêt brusque du câble pour ainsi créer la sensation de frapper un mur.

Pour cette deuxième expérience, le moteur à courant continu avait toujours la même tâche de garder le câble tendu, mais cette fois-ci, c'était le frein qui devait arrêter le câble lorsque celui-ci atteignait une certaine longueur. Le contrôleur de ce mécanisme était donc très simple. Le moteur gardait une tension $\tau_m = \tau_{min}$ et le frein opérait comme suit :

$$\tau_{frein} = \begin{cases} \text{ON} & \text{si } x \geq x_l \\ \text{OFF} & \text{si } x < x_l \end{cases} \quad (2.2)$$

Le résultat d'une expérience typique est montré à la fig. 2.2b. Pour cette expérience, le mur se situait à $x_l = 300$ mm et c'est donc à cette longueur de câble que le frein était engagé. Le fait qu'un frein est un dissipateur d'énergie fait en sorte que le « mur » se comporte très différemment de celui qui a été créé avec le moteur à courant continu. La différence la plus notable est évidemment que la réponse transitoire du frein n'est pas du tout pareille à celle du moteur. Puisque le moteur est contrôlé de sorte qu'il ait un comportement d'accumulateur d'énergie (un ressort), cela cause des oscillations autour du mur virtuel tandis que le comportement de dissipateur d'énergie du frein fait en sorte que celui-ci ne fait que décélérer le câble avant de l'immobiliser.

La décélération causée par le frein est perceptible par l'utilisateur, mais il faut vivre avec. Un frein prend toujours un certain temps pour se fermer et appliquer son couple maximal. Si on prend un petit frein avec des composantes de faible inertie, le temps de fermeture sera beaucoup plus court, mais son couple de freinage sera minuscule.

2.1.3 Les leçons apprises

Plusieurs expériences semblables à celle qui a été décrite dans la section précédente ont été réalisées avec plusieurs types de moteurs différents. Les détails de ces expériences ne seront pas rapportés dans ce mémoire, mais par contre, les leçons apprises seront discutées ici.

Bien que les moteurs changeaient, la stratégie restait toujours la même. Un actionneur ou un frein était placé sur le même arbre que la bobine et avait comme tâche d'arrêter le déploiement du câble lorsqu'il était temps. Il est vrai que dans certains cas la décélération était élevée, mais elle n'était jamais soudaine comme il aurait été souhaité. Lorsqu'on frappe un vrai mur, il se produit une discontinuité dans la force de réaction que l'on ressent sur soi. C'est-à-dire qu'un mur cause une immobilisation instantanée ; l'énergie de l'objet en mouvement qui frappe le mur transmet cette énergie au matériau du mur. Le mur se déforme élastiquement (comme un ressort) et libère une partie de cette énergie sous forme de vibrations de haute fréquence.

La réponse typique voulue (montré à la fig. 2.3c) est donc une combinaison de deux phénomènes. À la fig. 2.3a, il y a le premier phénomène qui est présenté, soit l'arrêt soudain. On peut voir dans cette figure que le câble se déploie jusqu'à la longueur de 1 (mètre ou pieds, peut importe l'unité de longueur) et s'immobilise immédiatement. Pour augmenter le réalisme de ce contact, il s'agit d'ajouter l'effet d'élasticité des matériaux et ainsi stimuler les mécanorécepteurs de l'utilisateur (fig. 2.3b).

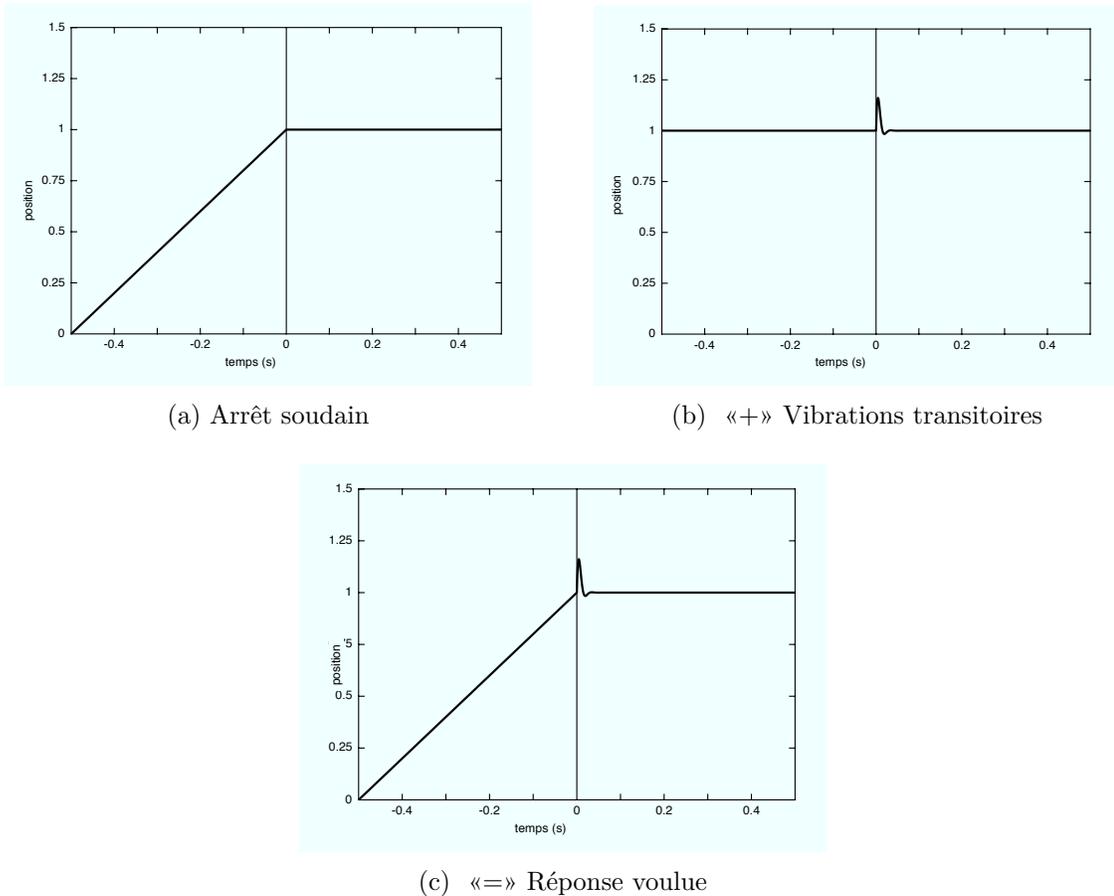


FIG. 2.3: La réponse voulue.

Pour obtenir cette réponse lors d'un contact, il faut repenser la manière avec laquelle on utilise la robotique dans les interfaces haptiques. Plus particulièrement, il faut repenser la stratégie que le robot emploie afin de se préparer à un impact qui est toujours la même, peu importe l'interface haptique. À la fig. 2.4, la stratégie est illustrée de manière simple pour que l'on puisse bien comprendre. Si l'on regarde la fig. 2.4a on peut voir l'interface lorsqu'elle est en mode passif. À ce stade, l'utilisateur peut bouger et le robot essaie de le suivre du mieux qu'il peut tout en restant transparent.

Lorsque l'utilisateur entre en contact avec un obstacle virtuel (fig. 2.4b), le robot tente de l'arrêter.

Le problème avec cette stratégie vient du fait que non seulement le robot doit arrêter le mouvement de l'utilisateur, mais il doit aussi s'arrêter lui-même. Il doit donc décélérer la masse du robot et de l'utilisateur. Bien entendu, le fait d'utiliser un robot à câbles léger aide grandement, mais si l'on veut atteindre les discontinuités de force comme à la fig. 2.3c il faudra faire mieux.

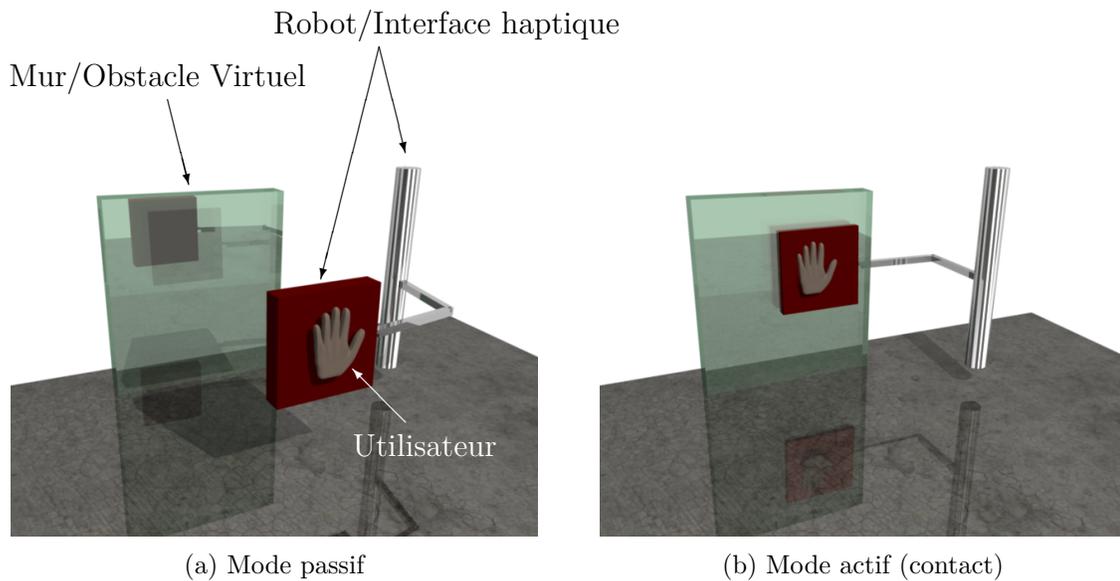


FIG. 2.4: Interface haptique conventionnelle.

La figure 2.5 illustre la nouvelle stratégie qui est utilisée dans le nouveau prototype. Au lieu de suivre l'utilisateur, le robot essaie de prédire l'endroit où l'utilisateur touchera l'objet virtuel et il se prépare en conséquence. Si l'objet ou l'utilisateur bouge, le lieu de contact $\vec{p}_{contact}$ bougera aussi et le robot déplacera son effecteur en conséquence. Donc, au moment du contact il ne devrait pas être nécessaire d'accélérer ou décélérer le robot de façon drastique.

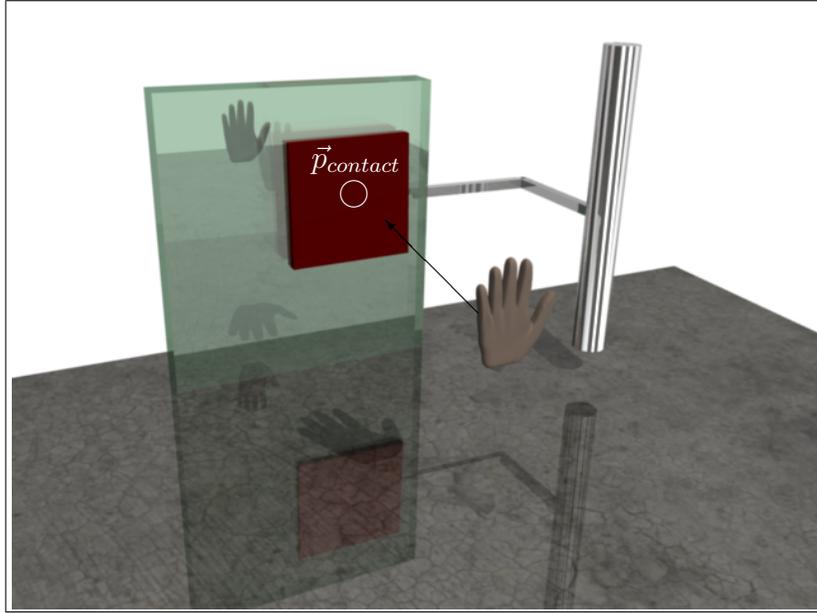


FIG. 2.5: Interface haptique avec nouvelle stratégie.

2.2 Le principe de fonctionnement du mécanisme d'impact

Pour appliquer la nouvelle stratégie à un robot à câbles, il fallait modifier cette stratégie davantage. Dans cette section, le prototype sera détaillé et la stratégie deviendra alors plus claire. Pour l'instant, nous allons tout simplement dire que le prototype est conçu pour employer la nouvelle stratégie, mais que les contacts seront faits dans les enrouleurs au lieu d'être faits à l'effecteur.

2.2.1 Le prototype d'interface haptique

Pour bien comprendre comment le prototype fonctionne, il faut premièrement savoir qu'il est composé de deux robots distincts (fig. 2.6) qui occupent le même espace. Il y a le robot maître (fig. 2.6a) et le robot d'impact (fig. 2.6b). À ce stade-ci, l'architecture des robots à câbles ne sera pas discutée, elle sera plutôt expliquée dans la section 3.1.

Le robot maître est facile à comprendre. Son effecteur est l'objet (épée) qui sera tenu par l'utilisateur. La priorité pour ce robot consiste donc à garder la tension dans

les câbles en tout temps. Puisque les contacts seront générés dans les enrouleurs il est très important de garder ces câbles tendus pour que les vibrations puissent voyager à travers ceux-ci et rejoindre l'effecteur ainsi que l'utilisateur qui le tient.

Le deuxième robot, le robot d'impact, est un peu plus compliqué. Ses câbles sont imaginaires et son effecteur l'est aussi, mais le robot est contrôlé comme s'ils étaient réels. Les seules composantes de ce robot qui sont réelles sont les moteurs d'impact. Ces moteurs d'impact sont placés dans le même axe que les moteurs du robot réel. On attribue des bobines imaginaires à ces moteurs qui se situent aux mêmes positions que les bobines du robot réel. De cette manière, les câbles imaginaires qui sont déployés à partir de ces bobines imaginaires forment un robot imaginaire qui se déplace en fonction du mouvement des moteurs d'impact. L'interface haptique comprend donc deux robots, un avec des câbles réels et un effecteur réel et l'autre avec des câbles imaginaires et un effecteur imaginaire.

Le but du robot d'impact est de contrôler la position de la zone de contact tout comme le robot illustré à la fig. 2.5. Dans ce cas-ci, étant donné le fait qu'il n'y a que trois câbles pour cette architecture, la zone de contact est plutôt un point de contact. Le robot essaie donc de prédire l'endroit sur l'objet virtuel où il y aura un contact et déplace « l'effecteur » en conséquence. Un contact se produira alors lorsque l'épée de l'utilisateur touchera ce point de contact.

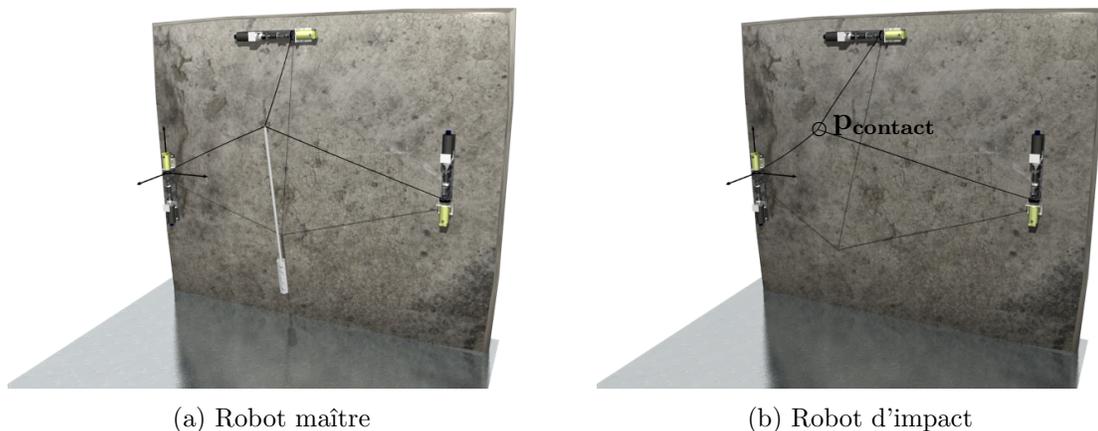


FIG. 2.6: Nouveau concept d'interface haptique.

2.2.2 Les enrouleurs

La fig. 2.7 montre le prototype d'enrouleur qui est utilisé dans l'interface haptique. Ce prototype a déjà été présenté dans [2]. La première chose qui saute aux yeux lorsque nous regardons ce mécanisme c'est le fait qu'il y a deux moteurs. Un moteur appelé « moteur maître » qui sert à activer le robot maître et un « moteur d'impact » qui sert à activer le robot d'impact. Entre les deux, il y a deux embrayages qui en temps normal, gardent les deux moteurs séparés pour qu'ils puissent tourner indépendamment. Pour voir les plans de fabrication des enrouleurs, il faut aller voir l'annexe A.

En regardant la fig. 2.7, on s'aperçoit que le moteur maître est relié en permanence avec la bobine de câble. Ceci est évident puisque c'est avec ce moteur que la tension du câble sera maintenue en tout temps. Il est important de mentionner que c'est un moteur à courant continu à aimant permanent et qui n'est pas muni d'une transmission. Ceci est important étant donné qu'il était souhaité que le mécanisme puisse se déployer sans l'aide des moteurs. Autrement dit, si l'utilisateur tire sur l'effecteur et par conséquent les câbles, ceux-ci doivent se dérouler de leur bobine respective avec une faible résistance. La tension des câbles n'est donc pas contrôlée en boucle fermée avec un capteur de force, elle est plutôt contrôlée en boucle ouverte directement avec l'intensité des moteurs. De plus, le moteur maître est doté d'un encodeur optique avec lequel le programme de commande sera en mesure de connaître la position de l'effecteur et ainsi pouvoir dessiner sa représentation dans l'environnement virtuel.

L'embrayage qui se situe le plus à gauche dans la fig. 2.7 est celui qui garde le moteur d'impact séparé du reste du montage lorsqu'aucun contact n'est commandé. Plus haut, il a été décrit que le robot d'impact avait la zone d'impact comme effecteur. Par contre, cet effecteur ainsi que les câbles du robot sont imaginaires puisque les contacts se produisent plutôt dans les enrouleurs. Ils servent seulement à détecter les contacts. Pour que ce robot imaginaire fonctionne, une bobine imaginaire est ajoutée au moteur d'impact qui est du même rayon que la vraie bobine. On utilise donc les encodeurs optiques des moteurs d'impact pour mesurer la longueur des câbles imaginaires. À ce stade-ci, il devient très facile de détecter les contacts.

Dans la prochaine figure (fig. 2.8), la méthode de détection de contact est détaillée avec deux câbles. Sur l'image de gauche (fig. 2.8a) il est possible de voir les deux robots lorsqu'il n'y a aucun contact imminent. Le robot d'impact essaie de prédire l'endroit

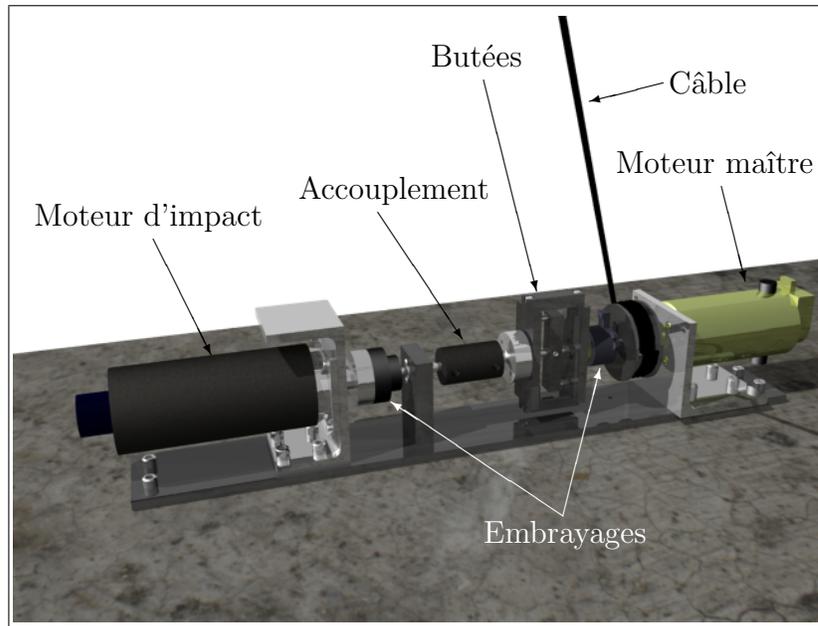


FIG. 2.7: Un enrouleur.

où l'utilisateur entrera en contact avec l'obstacle virtuel simplement en calculant la distance minimale entre ces deux corps. Ensuite, il se positionne de sorte que son effecteur soit placé sur la zone d'impact. Au moment où les deux objets se rapprochent, le système ressemble à l'image de droite et il est alors possible de voir la stratégie de détection de contact. En effet, il est facile de constater qu'un contact se produit toujours quand chacun des câbles du robot maître a la même longueur que son câble homologue sur le robot d'impact.

2.2.3 Le fonctionnement des embrayages

Il y a deux embrayages dans le mécanisme d'impact, la première ayant pour but d'isoler le moteur d'impact pour qu'il puisse accumuler de l'énergie cinétique et la deuxième gère l'espacement des deux butées. C'est avec ces pièces métalliques que l'enrouleur réalisera ses impacts. Les deux butées (fig. 2.9) ont été nommés comme suit : La butée virtuelle, qui détient ce nom non pas parce qu'elle n'existe pas, mais bien parce qu'elle est liée aux mouvements de l'obstacle virtuel. La deuxième butée détient le nom de butée réelle puisqu'elle est liée en permanence avec l'effecteur via la bobine et le câble (tous réels, bien entendu...). Les embrayages sont disposés de sorte que la butée

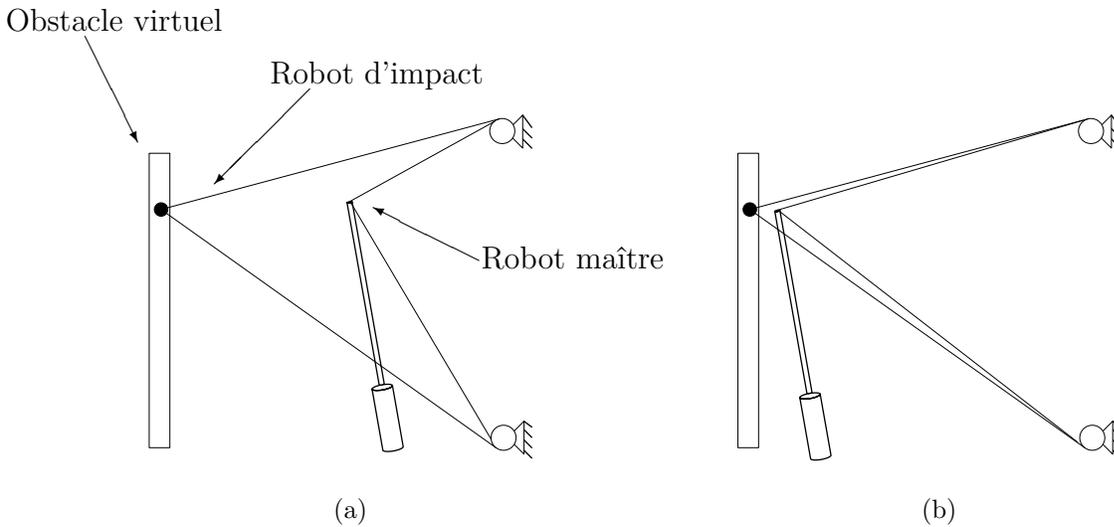


FIG. 2.8: Detection des contacts.

virtuelle puisse tourner avec la butée réelle en temps normal et puis tourner avec le moteur d'impact lorsqu'un contact est imminent. Dans les sous-sections suivantes, ce changement d'état des embrayages sera expliqué plus en détail.

2.2.3.1 Le mécanisme en mode libre

Lorsqu'il n'y a aucun contact imminent dans l'environnement virtuel, le mécanisme est en mode libre et sa configuration est comme il est montré dans la fig. 2.10. Il est important de noter que dans cette configuration, l'embrayage de gauche est ouvert et l'embrayage de droite est fermé.

Dans cet état, les deux butées sont tenues ensemble tel qu'il est montré à la fig. 2.11 et elles suivent les mouvements du robot maître qui se déplace avec les mouvements de l'utilisateur. Le moteur d'impact, ainsi que le reste du robot d'impact sont libres de bouger afin de se préparer pour un éventuel contact. En autres mots, le moteur d'impact est libre de tourner et accumuler de l'énergie cinétique.

2.2.3.2 Le mécanisme en mode contact

Au moment où un contact est détecté, l'état des embrayages change et l'enrouleur se retrouve dans la configuration montrée à la fig. 2.12. La butée virtuelle est séparée

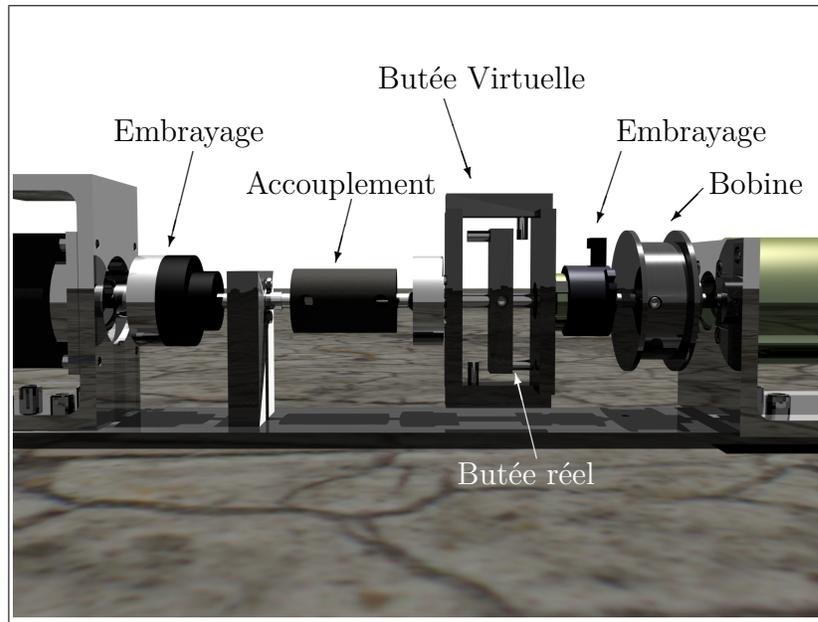


FIG. 2.9: Vue de proche : Les Butées

de la butée réelle pour s'attacher au moteur d'impact. À ce moment-ci, les deux butées peuvent donc bouger indépendamment.

La fig. 2.13a montre la disposition d'un seul câble au moment où un contact imminent est détecté. Cette détection est due au fait que la distance entre l'obstacle virtuel et l'effecteur correspond à une distance angulaire d'un demi-tour pour les butées. La fig. 2.13b montre un cas de contact imminent lorsque c'est l'effecteur tenu par l'utilisateur qui s'approche de l'obstacle virtuel. Dans ce cas-ci, l'extension du câble fait en sorte que la butée réelle tourne pour aller frapper la butée virtuelle. Lorsqu'elle frappe celle-ci, le contact aura lieu entre l'effecteur et l'objet virtuel. En contrepartie, l'obstacle virtuel qui s'approche de l'effecteur dans la fig. 2.13c fait en sorte que la butée virtuelle frappe la butée réelle avec une vitesse qui correspond à la vitesse de l'objet virtuel. Il est évident que si l'effecteur et l'objet virtuel bougent tous les deux de façon à ce qu'ils s'approchent, ce seront les deux butées qui seront en mouvement pour se heurter.

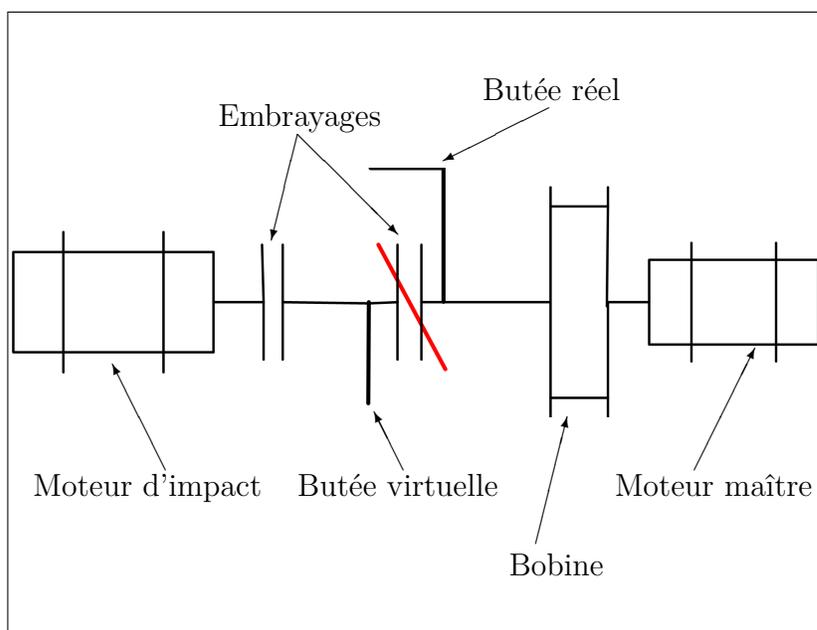


FIG. 2.10: Schema d'un enrouleur lorsqu'il n'y a aucun contact

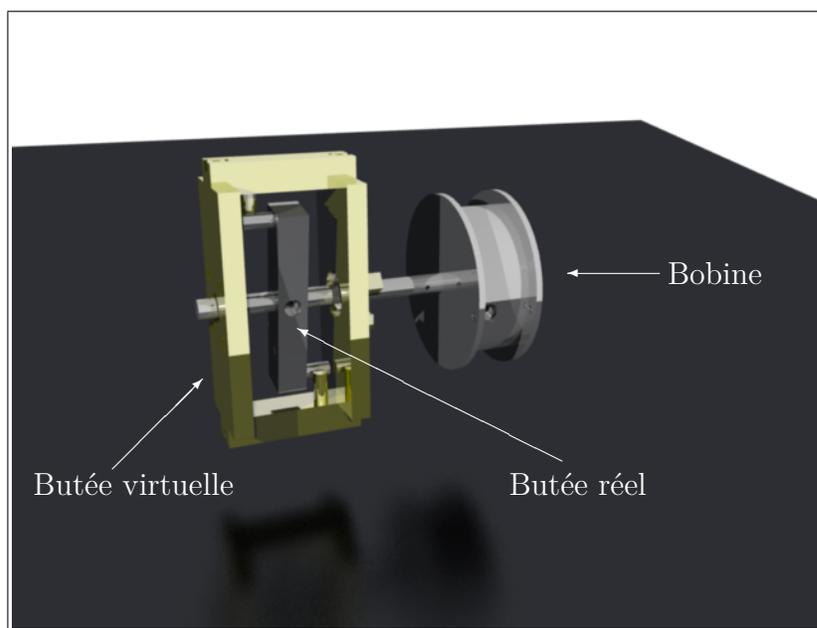


FIG. 2.11: État des butées en temps normal

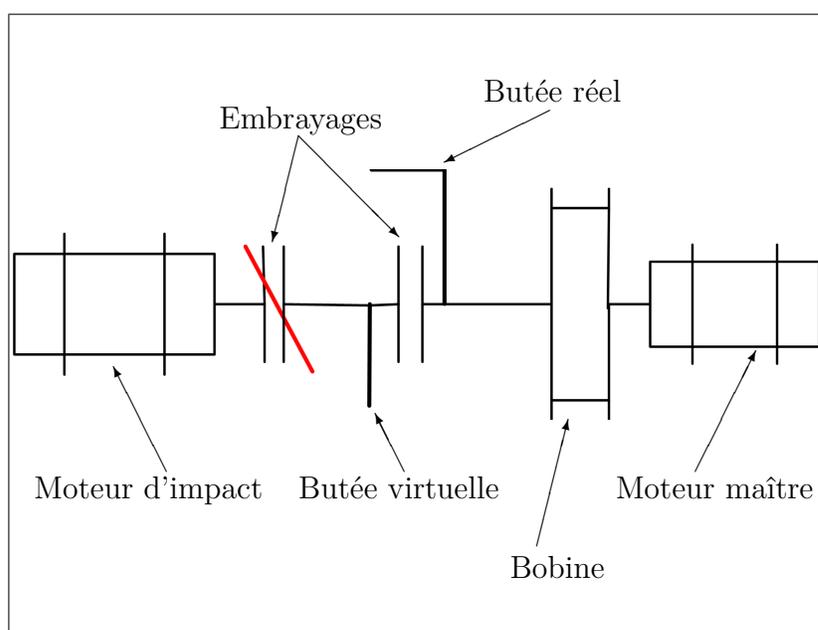
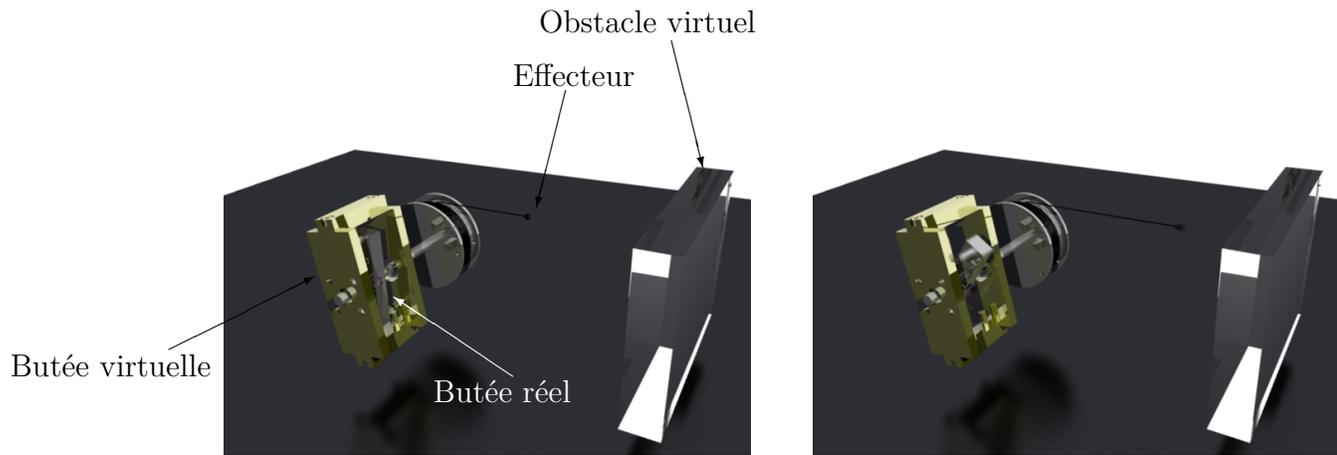
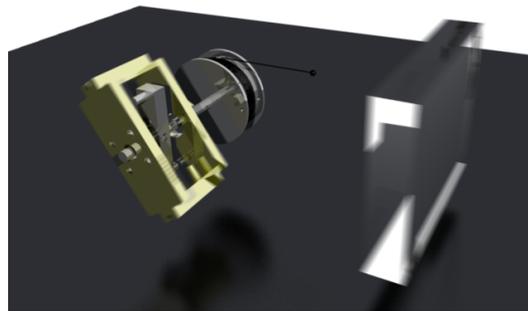


FIG. 2.12: État des butées en mode «contact»



(a) L'effecteur s'approche d'un obstacle virtuel

(b) Les embrayages changent d'état et la butée réelle peut heurter la butée virtuelle...



(c) ...Ou, si c'est l'objet virtuel qui est en mouvement, ce sera la butée virtuelle qui frappera la butée réelle.

FIG. 2.13: Le mouvement des butées.

2.2.4 Une petite note sur les embrayages

Dans la fig. 2.10, l'embrayage de droite a été illustré comme étant entre les deux butées tandis qu'en réalité (fig. 2.7), ceci n'est pas le cas. L'embrayage en question est construit de sorte que l'arbre provenant du moteur maître est connecté d'un côté, ensuite il passe à travers l'embrayage pour se connecter à la butée virtuelle. Ceci fait en sorte que l'embrayage se retrouve à droite des deux butées au lieu d'être entre les deux. Puisqu'il s'agit d'un embrayage électromagnétique, il faut faire de la place pour deux petits fils. Donc, le schéma de la fig. 2.10 ne fait que représenter le système mécanique de manière plus simpliste.

Le choix de l'embrayage de droite était donc assez difficile compte tenu du fait que ce n'est pas avec tous les embrayages que l'on peut passer un arbre à travers. Par contre, l'embrayage en question n'avait pas besoin de fournir un couple élevé puisqu'il ne faisait qu'attacher la butée virtuelle à la butée réelle pour que les deux pièces puissent tourner ensemble (Voir fig. 2.10). Évidemment, il s'agit d'une pièce avec une faible inertie qui est donc facile à faire tourner. Pour satisfaire ces exigences, l'embrayage EC25 du fabricant Reell¹ a été choisi.

L'embrayage de gauche, celui qui relie le moteur d'impact à la butée virtuelle lorsqu'un contact est détecté n'était pas soumis aux mêmes exigences que l'embrayage de gauche. Le fait qu'il transmet l'énergie du moteur d'impact au reste de l'enrouleur fait en sorte que cet embrayage doit être en mesure résister à de plus grands couples. L'embrayage choisi était le S90CSC-15A0404 de la compagnie SDP/SI².

Il est important de noter que les performances de ces deux embrayages ne sont pas tout à fait satisfaisantes. Il y aura une discussion plus en détail à cet égard au chapitre 4.

¹<http://www.reell.com>

²<http://www.sdp-si.com>

2.2.5 Avantages et inconvénients du mécanisme

Les avantages :

- Le mécanisme garde tous les avantages des mécanismes à câbles, soit :
 - La faible inertie de l'effecteur.
 - L'espace de travail de bonne envergure.
- Le mécanisme produit une discontinuité dans la force ressentie par l'utilisateur.
- Il y a présence de vibrations transitoires au moment de l'impact.

Les inconvénients :

- L'ajout d'un deuxième moteur rend le mécanisme plus complexe et plus coûteux.

Chapitre 3

Commande de l'interface haptique

Le développement du système de commande était la partie la plus compliquée de tout le projet. De nature, les robots parallèles à câbles sont souvent plus difficiles à contrôler que leurs cousins à membres rigides. Par contre, d'autres problèmes se sont manifestés à cause du choix de l'architecture des câbles. Bien que cette architecture soit très simple du point de vue du problème géométrique inverse, sa mise en oeuvre dans l'interface haptique était un peu plus compliquée.

Le but ultime de ce projet n'était pas d'établir un contrôleur pour une interface haptique ayant une seule architecture. Ce qui était désiré, c'était plutôt une stratégie générale qui pourrait convenir à plusieurs architectures. Au courant de ce chapitre, cette stratégie de commande sera détaillée avec l'aide des mathématiques (et des images).

3.1 Le robot maître

Pour valider le design du prototype d'enrouleur, il a fallu choisir une architecture de robot à câbles qui n'était pas trop compliquée, mais qui permettrait de tester l'efficacité des enrouleurs à créer des contacts en trois dimensions. Les points que l'on doit considérer lorsqu'on conçoit ce genre de mécanisme sont : les interférences entre l'utilisateur et le robot (ex. : les câbles) ainsi que l'interférence entre chacun des câbles ; l'espace de travail (Workspace) ; et l'espace des poses polyvalentes (Wrench-closure workspace) [7].

L'architecture choisie est montrée à la figure 1. C'est une architecture qui comprend trois enrouleurs situés sur le même plan qui est semblable à ce qui avait déjà été fait dans [28] et [29]. Les trois câbles sont attachés au bout de l'effecteur (épée) et l'utilisateur tient la poignée située à l'autre extrémité. La principale raison pour laquelle cette configuration a été choisie était principalement sa simplicité. Non seulement son problème géométrique direct est facilement résolu, mais aussi son espace de travail est facile à imaginer et on peut voir que si l'utilisateur se tient au milieu des trois enrouleurs, le potentiel d'interférence devient minime.

3.1.1 Le problème géométrique direct

Si on considère la position des trois enrouleurs (en mètres) :

$$\begin{aligned}\mathbf{r}_1 &= [0 \ 0 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_2 &= [r_{x2} \ r_{y2} \ 0]^T = [1,01 \ 1,37 \ 0]^T \\ \mathbf{r}_3 &= [r_{x3} \ 0 \ 0]^T = [1,94 \ 0 \ 0]^T,\end{aligned}$$

cela nous donne une configuration triangulaire qui est presque isocèle avec l'enrouleur numéro 1 situé à l'origine. Bien qu'il aurait été mieux de placer l'origine au milieu du triangle, cela aurait causé des singularités de formulation dans le problème géométrique direct. Puisque les câbles sont attachés au bout de l'épée, le problème géométrique direct nous donne le point $\mathbf{p}_{ri} = [x_{ri} \ y_{ri} \ z_{ri}]^T$.

Avec les longueurs de câbles $\|\boldsymbol{\rho}_{ri}\|$ données par les encodeurs du moteur maître, on peut trouver le point \mathbf{p}_{ri} avec la méthode suivante.

On sait que les vecteurs $\boldsymbol{\rho}_{ri}$ sont égaux au vecteur \mathbf{p}_{ri} moins le vecteur position de leurs enrouleurs respectifs \mathbf{r}_i . En élevant cette expression au carré on obtient :

$$\begin{aligned}\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|^2 &= (\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{r}_1)^T (\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{r}_1) = x_{ri}^2 + y_{ri}^2 + z_{ri}^2 \\ \|\boldsymbol{\rho}_{r2}\|^2 &= (\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{r}_2)^T (\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{r}_2) = (x_{ri} - r_{x2})^2 + (y_{ri} - r_{y2})^2 + z_{ri}^2 \\ \|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|^2 &= (\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{r}_3)^T (\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{r}_3) = (x_{ri} - r_{x3})^2 + y_{ri}^2 + z_{ri}^2.\end{aligned}\quad (3.1)$$

Cela nous donne un système avec trois équations et trois inconnues. En isolant les trois composantes de \mathbf{p}_{ri} nous obtenons les équations du problème géométrique direct suivantes :

$$\begin{aligned}x_{ri} &= \frac{1}{2r_{x3}} (\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|^2 + \|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|^2 - r_{x3}^2) \\ y_{ri} &= \frac{1}{2r_{x3}r_{y2}} r_{x3} (\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|^2 - \|\boldsymbol{\rho}_{r2}\|^2 - r_{x2}r_{x3} + r_{x2}^2 + r_{y2}^2) - r_{x2}\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|^2 + r_{x2}\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|^2 \\ z_{ri} &= \sqrt{\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|^2 - x_{ri}^2 - y_{ri}^2}\end{aligned}\quad (3.2)$$

Il est à noter que dans (3.2), z_{ri} a été formulé en fonction de x_{ri} et y_{ri} pour des fins de simplification et pour faciliter la mise en oeuvre de ces équations dans un algorithme. La présence d'une racine carrée dans la troisième équation révèle la présence de deux solutions ($z_{ri} > 0$ et $z_{ri} < 0$) ainsi qu'une singularité à la frontière des solutions ($z_{ri} = 0$). La solution aux z_{ri} positifs est celle qui est utilisée.

3.1.2 La tension dans les câbles

Dans la section 2.2.1, il a été décrit que le robot maître avait comme fonction de suivre les mouvements de l'utilisateur tout en gardant une tension dans les câbles. Ce qui est évident, c'est qu'étant donné l'architecture de câbles choisie, toute combinaison de tension dans les câbles produira une force à l'effecteur qui sera toujours dirigée vers la base triangulaire du mécanisme (direction $-z$). Il ne sera donc pas possible d'équilibrer l'épée statiquement. De plus, le problème géométrique direct nous donne la position du bout de l'épée, mais pas son orientation. Cette information est cruciale pour représenter l'épée dans l'environnement virtuel et pour calculer la dynamique des impacts.

Pour remédier au manque de mesure d'orientation, un capteur sans fil improvisé a été placé dans la poignée de l'épée. Ce capteur se nomme « Flock of Birds » et est fait par la compagnie Ascension¹. Pour ce qui est de la tension des câbles, nous savons qu'il y aura toujours une force dans la direction de l'utilisateur (direction $-z$). Cela est inévitable. Par contre, il est possible de régler les tensions des câbles de sorte que les forces soient équilibrées dans le plan xy tout en gardant la force résultante en z raisonnablement basse.

Pour trouver les équations de tension des câbles, il faut premièrement connaître le jacobien du manipulateur qui se trouve en dérivant les équations (3.1) par rapport au temps :

$$\begin{aligned}\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\| \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r1}\| &= x_{ri}\dot{x}_{ri} + y_{ri}\dot{y}_{ri} + z_{ri}\dot{z}_{ri} \\ \|\boldsymbol{\rho}_{r2}\| \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r2}\| &= (x_{ri} - r_{x2})\dot{x}_{ri} + (y_{ri} - r_{y2})\dot{y}_{ri} + z_{ri}\dot{z}_{ri} \\ \|\boldsymbol{\rho}_{r3}\| \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r3}\| &= x_{ri}\dot{x}_{ri} + (y_{ri} - r_{y3})\dot{y}_{ri} + z_{ri}\dot{z}_{ri}\end{aligned}\quad (3.3)$$

ou, sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \|\boldsymbol{\rho}_{r1}\| & 0 & 0 \\ 0 & \|\boldsymbol{\rho}_{r2}\| & 0 \\ 0 & 0 & \|\boldsymbol{\rho}_{r3}\| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r1}\| \\ \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r2}\| \\ \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r3}\| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{ri} & y_{ri} & z_{ri} \\ x_{ri} - r_{x2} & y_{ri} - r_{y2} & z_{ri} \\ x_{ri} - r_{x3} & y_{ri} & z_{ri} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{ri} \\ \dot{y}_{ri} \\ \dot{z}_{ri} \end{bmatrix}\quad (3.4)$$

$$\mathbf{A}\dot{\boldsymbol{\rho}} = \mathbf{B}\dot{\mathbf{p}}_{ri}\quad (3.5)$$

où $\dot{\boldsymbol{\rho}}$ est défini comme $\dot{\boldsymbol{\rho}} = [\|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r1}\| \quad \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r2}\| \quad \|\dot{\boldsymbol{\rho}}_{r3}\|]^T$.

Pour trouver le torseur à l'effecteur on utilise l'équation des forces suivante qui est trouvée selon le principe du travail virtuel :

$$\mathbf{f} = -\mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-T} \boldsymbol{\tau}\quad (3.6)$$

où \mathbf{f} est le vecteur de force cartésienne à l'effecteur et $\boldsymbol{\tau}$ est le vecteur dont les composantes sont les tensions dans les câbles. Il est à noter que les tensions sont définies comme étant positives même si celles-ci forcent pour rétrécir le câble.

En insérant les matrices \mathbf{A} et \mathbf{B} dans cette équation, on obtient ceci :

$$\begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{x_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|} & -\frac{x_{ri}-r_{x2}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r2}\|} & -\frac{x_{ri}-r_{x3}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \\ -\frac{y_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|} & -\frac{y_{ri}-r_{y2}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r2}\|} & -\frac{y_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \\ -\frac{z_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|} & -\frac{z_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r2}\|} & -\frac{z_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}\quad (3.7)$$

¹<http://www.ascension-tech.com/>

Le but de notre contrôleur est de trouver un vecteur de tension τ non nul qui produit un vecteur de force cartésienne résultante \mathbf{f} qui est nul. Il est évident que ceci n'est pas possible pour f_z . Cependant, l'équilibrage des forces dans le plan xy est possible. Pour ce faire, une des trois tensions (dans ce cas-ci, τ_3) sera choisie arbitrairement de sorte qu'en général la force de réaction dans la direction $-z$ ne soit pas trop grande et elle sera imposée au système. Cela engendrera la force de réaction suivante :

$$\mathbf{f}_{\tau_3} = \begin{bmatrix} -\tau_3 \frac{x_{ri} - r_{x3}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \\ -\tau_3 \frac{y_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \\ -\tau_3 \frac{z_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Les deux premières composantes de ce vecteur sont celles qui nous intéressent puisqu'elles correspondent aux forces en x et en y qui seront annulées avec les tensions des câbles numéro 1 et 2. Alors si l'on reprend les deux premières lignes de (3.7) avec les deux premières lignes et colonnes de la matrice jacobienne $\mathbf{B}^T \mathbf{A}^{-T}$ (celles qui correspondent au plan xy), on obtient le système suivant :

$$\begin{bmatrix} -\tau_3 \frac{x_{ri} - r_{x3}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \\ -\tau_3 \frac{y_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -\frac{x_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|} & -\frac{x_{ri} - r_{x2}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r2}\|} \\ -\frac{y_{ri}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r1}\|} & -\frac{y_{ri} - r_{y2}}{\|\boldsymbol{\rho}_{r2}\|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

En isolant les inconnues (τ_1 et τ_2), on obtient l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = - \frac{\tau_3}{(-x_{ri}r_{y2} + y_{ri}r_{x2})\|\boldsymbol{\rho}_{r3}\|} \begin{bmatrix} \|\boldsymbol{\rho}_{r1}\| (-y_{ri}r_{x3} - x_{ri}r_{y2} + r_{y2}r_{x3} + y_{ri}r_{x2}) \\ \|\boldsymbol{\rho}_{r2}\| y_{ri}r_{x3} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Bien que cette approche soit très simple, elle fonctionne très bien en pratique.

3.2 Le robot virtuel

Dans la section 2.2.1, le robot virtuel a été décrit comme étant un mécanisme ayant comme but de déplacer la surface de contact. Dans cette section, ce concept sera élaboré davantage. Non seulement ce robot déplace la surface de contact (dans ce cas-ci, il s'agit plutôt d'un point de contact étant donné l'architecture des câbles), mais il déplace aussi l'épée virtuelle. **De cette manière, une force qui agit sur le point de contact fera automatiquement bouger celui-ci ainsi que l'épée virtuelle.**

Étant donné que les câbles du robot virtuel sont imaginaires, nous sommes libres de leur attribuer des propriétés qui sont hors de l'ordinaire. Normalement, un câble

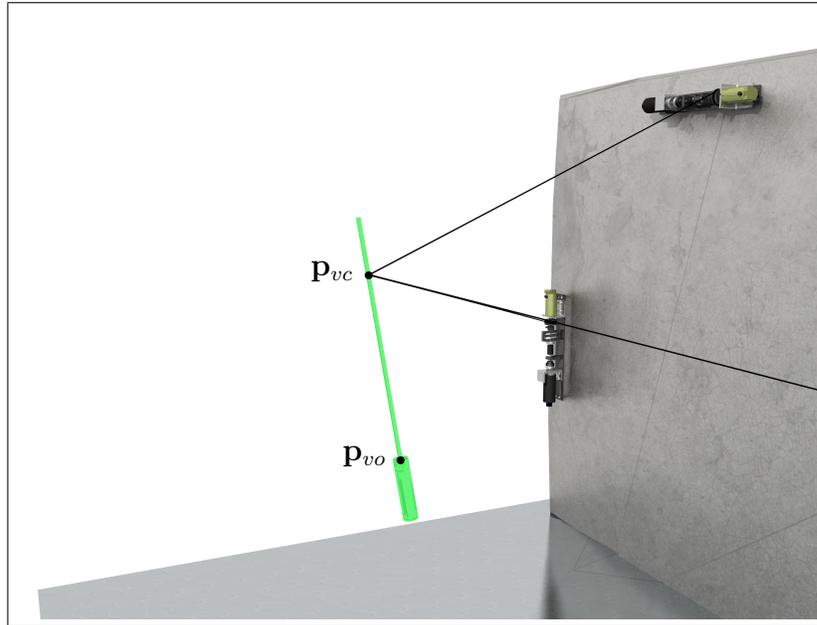


FIG. 3.1: Commande de l'orientation de l'épée

ne peut que tirer, mais les câbles du robot virtuel peuvent aussi pousser. Ce dernier se comporte donc plus comme un robot parallèle à articulations prismatiques (comme celui à la fig. 1.5a). Cependant, ces trois ddl ne sont pas suffisants pour bien définir l'emplacement de l'épée virtuelle dans l'espace. Pour cela, il faut évidemment six ddl. Alors, puisque le robot ne peut pas déplacer l'épée virtuelle complètement, il faut choisir lesquels parmi les trois degrés de liberté de l'épée virtuelle seront bougés par le robot.

La figure 3.1 montre que le point d'attache des câbles est le point de contact prévu (\mathbf{p}_{vc}). Ce point de contact est calculé comme étant le point le plus proche de l'épée réelle. Lorsque ce point de contact se déplace, l'orientation de l'épée change puisque le point inférieur de l'épée (\mathbf{p}_{vo}) reste immobile. C'est ainsi que cet objet virtuel est limité à trois ddl, il y a deux ddl pour l'orientation et un ddl pour la position du point de contact sur la « lame » de l'épée.

Lorsque l'épée réelle se déplace par rapport à l'épée virtuelle, le point de contact peut se déplacer aussi parce que la distance minimale entre les deux épées pourrait avoir changé. Dans ce cas-ci, le déplacement du point de contact se ferait dans la direction parallèle à l'axe de la lame. Aucun déplacement dans un sens perpendiculaire à la lame ne serait fait puisque cela occasionnerait un changement d'orientation de l'épée. Les

seuls changements d'orientation qui peuvent être faits sont ceux commandés par le contrôleur d'orientation.

Quand la stratégie de détection a été expliquée à l'aide de la fig. 2.8, cela a peut-être généré quelques questions dans la tête de certains lecteurs. En effet, lorsqu'on regarde cette figure on s'aperçoit que la méthode de détection de contact ne fonctionne seulement que dans le cas où le point de contact sur l'épée réelle \mathbf{p}_{rc} coïncide avec le point d'attache des câbles (\mathbf{p}_{ri}). À la section 3.3, il sera décrit que cette stratégie serait plutôt utilisée pour un robot de six ddl. Pour un robot à trois ddl, il faut faire des ajustements.

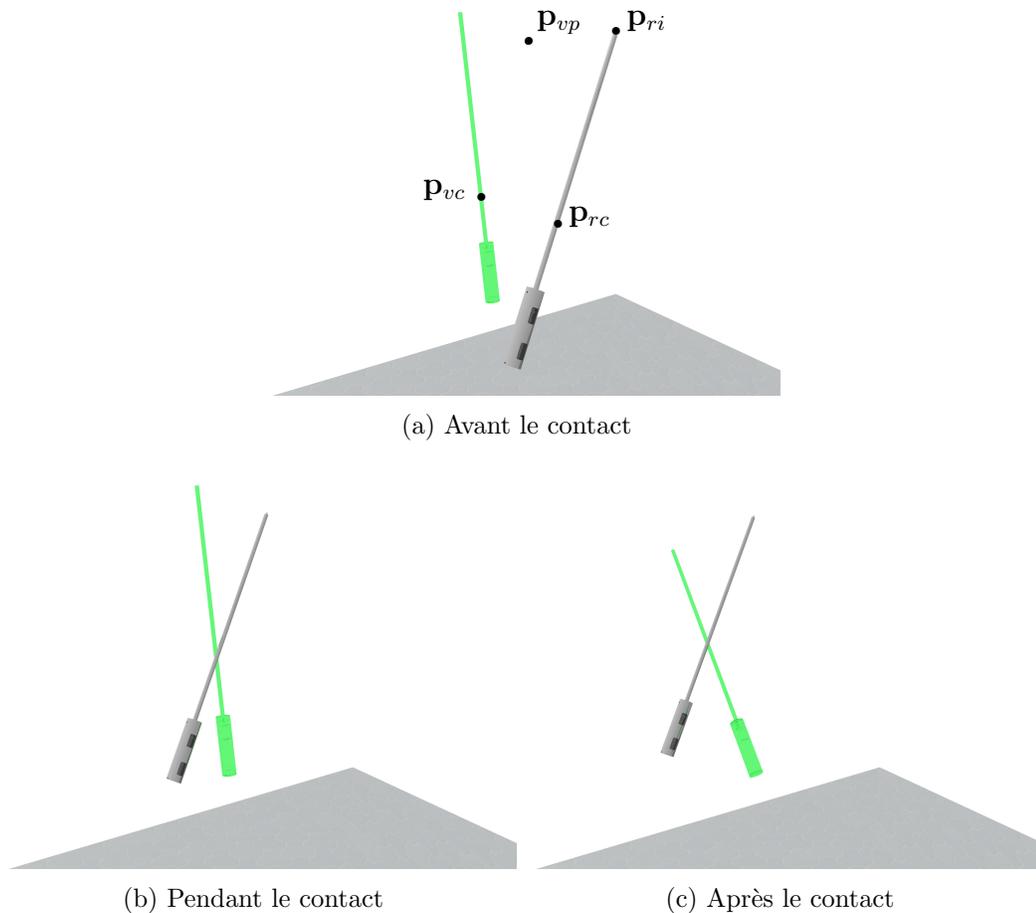


FIG. 3.2: Détection des contacts modifiée.

Le point \mathbf{p}_{vp} qui apparait à la fig. 3.2a est utilisé pour ajuster la stratégie de détection de contact. Il s'agit d'une projection du point \mathbf{p}_{ri} de l'épée réelle sur l'endroit où il sera au moment de l'impact. On obtient ce point avec l'équation suivante :

$$\mathbf{p}_{vp} = \mathbf{p}_{vc} + (\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{p}_{rc}) \quad (3.11)$$

Un contact imminent est détecté lorsque le point \mathbf{p}_{ri} s'approche du point \mathbf{p}_{vp} et c'est à ce moment que l'on peut changer l'état des embrayages. Si l'on regarde la fig. 2.13 on réalise qu'une fois que l'état des embrayages a changé les butées doivent tourner de 360° avant de se heurter². Pour cette raison, il faut changer l'état des embrayages d'une bobine lorsque son câble respectif est à une certaine longueur. Cette longueur est calculée comme étant la longueur que le câble aura lorsque l'effecteur se situera au point \mathbf{p}_{vp} (problème géométrique inverse au point \mathbf{p}_{vp}) moins la longueur de câble qui équivaut au déplacement des butées ($2\pi R_{bobine}$).

Quand les deux épées sont en contact (fig. 3.2b), l'épée réelle de l'utilisateur peut repousser l'épée virtuelle. À ce moment, la butée réelle repoussera la butée virtuelle et ainsi l'épée virtuelle reculera (fig. 3.2c). Ici, encore une fois, l'architecture simpliste cause quelques problèmes. En effet, le mouvement des butées réelles fait bouger le point \mathbf{p}_{ri} et les butées virtuelles font bouger le point \mathbf{p}_{vc} , deux points qui ne sont pas en contact en réalité. Il aurait été plus correct de faire bouger le point \mathbf{p}_{vp} puisque c'est celui-ci qui suit les mouvements du point \mathbf{p}_{ri} lorsqu'il est en contact avec celui-ci. Il est à noter que c'est précisément ce qui est fait dans la stratégie générale montrée à la section 3.3.

3.2.1 Orientation de l'épée virtuelle

Il y a deux choses qui peuvent changer l'orientation de l'épée virtuelle, le contrôleur de l'orientation ainsi que l'utilisateur (lorsque son épée est en contact). Il a été décrit comment l'utilisateur pouvait faire bouger l'épée virtuelle en poussant sur celle-ci avec son épée dans la section précédente. Dans la section présente, le contrôleur d'orientation de l'épée sera expliqué en détail.

À la fig. 3.3 on peut voir deux épées, l'épée virtuelle avec sa lame pointant vers la direction $\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}$ et une deuxième épée pointant vers la direction commandée ($\hat{\mathbf{e}}_{v\ell,com}$). Il

²Sur la figure, les butées peuvent tourner 360° avant de se heurter, mais le prototype réel peut tourner de 180° seulement puisqu'il a été déterminé que c'était un espacement adéquat.

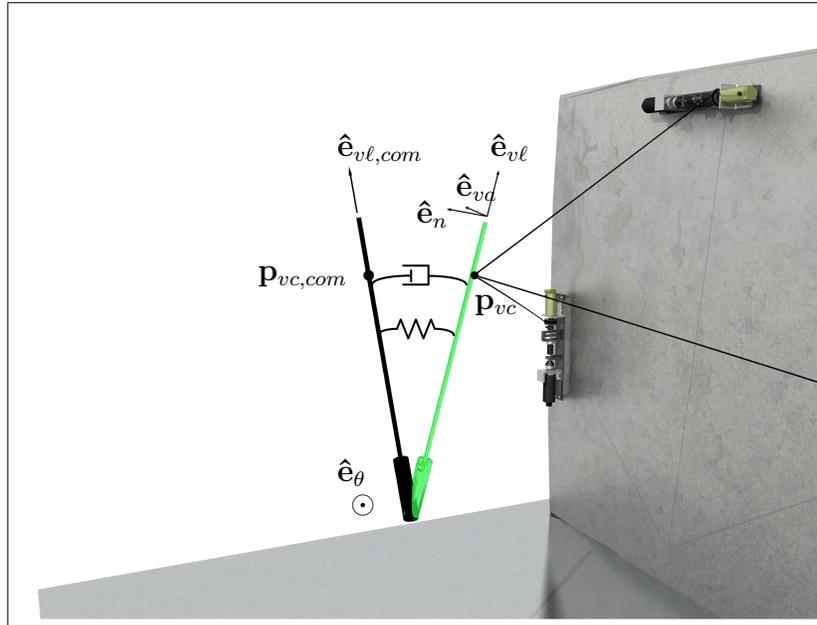


FIG. 3.3: Contrôleur pour l'orientation de l'épée

est possible de calculer la position du point de contact lorsque l'épée virtuelle atteindra cette orientation ($\mathbf{p}_{vc,com}$) en calculant la distance minimale entre l'épée réelle et l'épée virtuelle dans cette orientation commandée.

Avec les points \mathbf{p}_{vc} et $\mathbf{p}_{vc,com}$ il aurait été possible d'utiliser un contrôleur de type PID³ avec le terme d'erreur $\mathbf{e} = \mathbf{p}_{vc} - \mathbf{p}_{vc,com}$. Bien que le contrôleur choisi n'est pas un PID, il se comporte de façon très semblable à un contrôleur de type PD⁴. Dans la fig. 3.3 il y a un ressort ainsi qu'un amortisseur qui relie l'épée virtuelle avec une autre épée imaginaire ayant l'orientation désirée. Ce sont ces deux éléments qui agiront à titre de gain proportionnel (P) et différentiel (D).

3.2.1.1 Initialisation des équations de Lagrange

À ce moment-ci, il est fortement recommandé que le lecteur de ce texte lise la nomenclature (Dans la section Nomenclature) liée aux mathématiques qui seront présentées dans les paragraphes qui suivent. Pour décrire les mouvements de l'épée virtuelle, les équations de Lagrange sont utilisées avec les coordonnées généralisées décrites dans la nomenclature. Voici l'équation de base :

³Proportionnel, Intégral, Différentiel

⁴Proportionnel, Différentiel

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} = f \quad (3.12)$$

où L est le Lagrangien du système et f est la force qui provient du contrôleur d'orientation. Cette équation est appliquée à deux des trois degrés de liberté en rotation de l'épée, soit q_{v4} et q_{v5} (la rotation q_{v6} n'étant pas contrôlée) et leurs accélérations respectives peuvent ensuite être calculées (\ddot{q}_{v4} et \ddot{q}_{v5}).

Pour définir le Lagrangien, il faut connaître l'énergie cinétique du système. Dans ce cas-ci, l'énergie provient du mouvement de rotation de l'épée et cette rotation provient du mouvement du point \mathbf{p}_{vc} . La vitesse de rotation dans le repère cartésien fixe est donc calculée avec l'équation suivante :

$$\boldsymbol{\omega} = \frac{(\mathbf{p}_{vc} - \mathbf{p}_{vo}) \times (\mathbf{v}_{vc} - \mathbf{v}_{vo})}{\|\mathbf{p}_{vc} - \mathbf{p}_{vo}\|^2} \quad (3.13)$$

où $\mathbf{v}_{vc} = \dot{\mathbf{p}}_{vc}$ et $\mathbf{v}_{vo} = \dot{\mathbf{p}}_{vo}$.

Puisque nous utilisons des coordonnées généralisées dans les équations de Lagrange, il faut redéfinir cette vitesse angulaire dans le repère mobile montré à la fig. 3.3. Les trois vecteurs orthonormés qui définissent ce repère sont :

- $\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}$ La direction de la « lame » de l'épée (axe de l'épée).
- $\hat{\mathbf{e}}_n$ La normale au point de contact, qui est la perpendiculaire commune aux lames des deux épées $(\mathbf{p}_{ri} - \mathbf{p}_{ro}) \times (\mathbf{p}_{vc} - \mathbf{p}_{vo})$ et qui va dans la direction de l'épée réelle vers l'épée virtuelle $(\mathbf{p}_{vc} - \mathbf{p}_{rc})$.
- $\hat{\mathbf{e}}_{va}$ La direction complémentaire, $\hat{\mathbf{e}}_{va} = \hat{\mathbf{e}}_{v\ell} \times \hat{\mathbf{e}}_n$.

On trouve donc la vitesse en coordonnées généralisées en faisant la projection sur les trois vecteurs unitaires du repère mobile :

$$\dot{\mathbf{q}}_v = \begin{bmatrix} \dot{q}_{v1} \\ \dot{q}_{v2} \\ \dot{q}_{v3} \\ \dot{q}_{v4} \\ \dot{q}_{v5} \\ \dot{q}_{v6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{vm}^T \hat{\mathbf{e}}_n \\ \mathbf{v}_{vm}^T \hat{\mathbf{e}}_{va} \\ \mathbf{v}_{vm}^T \hat{\mathbf{e}}_{v\ell} \\ \boldsymbol{\omega}^T \hat{\mathbf{e}}_n \\ \boldsymbol{\omega}^T \hat{\mathbf{e}}_{va} \\ \boldsymbol{\omega}^T \hat{\mathbf{e}}_{v\ell} \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

\mathbf{v}_{vm} désigne la vitesse du centre de masse, mais nous allons redéfinir l'équation en fonction de \mathbf{v}_{vo} qui est nulle. Cette vitesse est nul en raison de la quantité limitée de degrés de liberté du robot à câble. Puisque celui-ci n'a que trois ddl, nous devons choisir lesquels des trois ddl de l'épée virtuelle nous voulons activer. Les rotations q_{v4} et q_{v5} ont donc été choisies pour être activées ainsi que la position du point de contact sur l'axe de l'épée (q_{v3} , détaillé plus loin). Les translations du point \mathbf{p}_{vo} seront donc bloquées et notre équation devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_{v1} \\ \dot{q}_{v2} \\ \dot{q}_{v3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{vo}^T \hat{\mathbf{e}}_n \\ \mathbf{v}_{vo}^T \hat{\mathbf{e}}_{va} \\ \mathbf{v}_{vo}^T \hat{\mathbf{e}}_{vl} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{q}_{v4} \\ \dot{q}_{v5} \\ \dot{q}_{v6} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\ell}{2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\ell}{2} \dot{q}_{v5} \\ -\frac{\ell}{2} \dot{q}_{v4} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

où ℓ est la longueur de l'épée. Pour la matrice de masse, on a :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{m\ell^2}{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{m\ell^2}{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Les composantes d'inertie $I_{xx} = \frac{m\ell^2}{12}$ et $I_{yy} = \frac{m\ell^2}{12}$ de cette matrice indiquent que l'épée a été modélisée par une barre mince avec une composante I_{zz} qui a été simplifiée en lui donnant une valeur nulle. L'énergie cinétique devient :

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_v^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{q}}_v \quad (3.17)$$

Avec notre nouveau vecteur de vitesse qui tient compte des rotations seulement :

$$\dot{\mathbf{q}}_v = \begin{bmatrix} \frac{\ell}{2} \dot{q}_{v5} \\ -\frac{\ell}{2} \dot{q}_{v4} \\ 0 \\ \dot{q}_{v4} \\ \dot{q}_{v5} \\ \dot{q}_{v6} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

L'énergie cinétique devient :

$$T = \frac{1}{6}m\ell^2\dot{q}_{v4}^2 + \frac{1}{6}m\ell^2\dot{q}_{v5}^2 \quad (3.19)$$

3.2.1.2 Effet du ressort et de l'amortisseur

Pour ce qui en est du ressort ainsi que de l'amortisseur, ils sont tous les deux traités comme des forces externes. Ces forces sont recalculées à chaque pas de temps dans le contrôleur. Pour calculer le couple du ressort, il faut premièrement calculer l'angle entre les deux épées :

$$\cos \theta = \hat{\mathbf{e}}_{vl}^T \hat{\mathbf{e}}_{vl,com} \quad (3.20)$$

Pour nos calculs, nous avons besoin d'un vecteur qui pointe dans la direction de cet angle, le couple du ressort sera dirigé dans cette direction. Cette direction, donnée premièrement dans le repère fixe, n'est rien de plus que la direction normale aux deux épées :

$$\hat{\mathbf{e}}_{\theta,XYZ} = \frac{\hat{\mathbf{e}}_{vl} \times \hat{\mathbf{e}}_{vl,com}}{\|\hat{\mathbf{e}}_{vl} \times \hat{\mathbf{e}}_{vl,com}\|} \quad (3.21)$$

Ensuite on projette cette direction dans le repère mobile :

$$\hat{\mathbf{e}}_{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{e}}_{\theta,XYZ}^T \hat{\mathbf{e}}_n \\ \hat{\mathbf{e}}_{\theta,XYZ}^T \hat{\mathbf{e}}_{va} \\ \hat{\mathbf{e}}_{\theta,XYZ}^T \hat{\mathbf{e}}_{vl} \end{bmatrix}. \quad (3.22)$$

Le moment du ressort, qui est proportionnel à la constante k_T devient :

$$\mathbf{t}_r = k_T \theta \hat{\mathbf{e}}_{\theta}. \quad (3.23)$$

Pour l'amortisseur, ce qui était nécessaire c'était seulement d'obtenir un moment qui dissipe l'énergie cinétique de l'épée. La fonction suivante a été utilisée :

$$\mathbf{t}_a = -c_T \begin{bmatrix} \dot{q}_{v4} \\ \dot{q}_{v5} \\ \dot{q}_{v6} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Si l'on assemble toutes les composantes, on obtient les équations de Lagrange suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_{v4}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_{v4}} &= (\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a)^T [1 \quad 0 \quad 0]^T \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_{v5}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_{v5}} &= (\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a)^T [0 \quad 1 \quad 0]^T \end{aligned} \quad (3.25)$$

3.2.1.3 Résolution des équations

Dans ce cas-ci, $L = T - V$ avec V , l'énergie potentielle, qui est nulle puisque l'énergie potentielle du ressort a déjà été traité comme une force externe et la gravité a été négligée⁵.

Le résultat de l'équation précédente devient :

$$\begin{aligned}\ddot{q}_{v4} &= \frac{3}{m\ell^2}(\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a)^T [1 \ 0 \ 0]^T \\ \ddot{q}_{v5} &= \frac{3}{m\ell^2}(\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a)^T [0 \ 1 \ 0]^T.\end{aligned}\quad (3.26)$$

Les accélérations \ddot{q} sont remplacées par les approximations $\ddot{q} \approx (\dot{q}(t + \Delta t) - \dot{q}(t))/\Delta t$ où $\dot{q}(t)$ représente la vitesse actuelle et $\dot{q}(t + \Delta t)$ représente la valeur future. Cette dernière sera utilisée comme commande. Cela nous donne :

$$\begin{aligned}\dot{q}_{v4}(t + \Delta t) &= \dot{q}_{v4}(t) + \left(\frac{3}{m\ell^2}(\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a)^T [1 \ 0 \ 0]^T\right) \Delta t \\ \dot{q}_{v5}(t + \Delta t) &= \dot{q}_{v5}(t) + \left(\frac{3}{m\ell^2}(\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a)^T [0 \ 1 \ 0]^T\right) \Delta t.\end{aligned}\quad (3.27)$$

Il faut maintenant formuler ces vitesses dans le repère fixe :

$$\boldsymbol{\omega}_{com} = \begin{bmatrix} \dot{q}_{v4}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_n^T\hat{\mathbf{e}}_x + \dot{q}_{v5}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_{va}^T\hat{\mathbf{e}}_x \\ \dot{q}_{v4}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_n^T\hat{\mathbf{e}}_y + \dot{q}_{v5}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_{va}^T\hat{\mathbf{e}}_y \\ \dot{q}_{v4}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_n^T\hat{\mathbf{e}}_z + \dot{q}_{v5}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_{va}^T\hat{\mathbf{e}}_z \end{bmatrix} = \dot{q}_{v4}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_n + \dot{q}_{v5}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_{va}.\quad (3.28)$$

Cette commande de vitesse angulaire amènera l'épée dans l'orientation voulue. Cependant, il ne faut pas oublier qu'il faut déplacer le point \mathbf{p}_{vc} le long de l'épée pour atteindre le point $\mathbf{p}_{vc,com}$. Puisque ce mouvement n'occasionne pas de déplacement de masse ou d'inertie, les équations de Lagrange ne peuvent pas s'appliquer. Pour ce cas-ci, la commande de vitesse ressemble alors beaucoup à une commande que l'on aurait obtenue avec un contrôleur PD. L'équation suivante nous donne donc une commande de vitesse pour le dernier degré de liberté requis pour déplacer le point \mathbf{p}_{vc} . Il s'agit de la vitesse \dot{q}_{v3} qui est dirigée dans la direction $\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}$.

$$\dot{q}_{v3}(t + \Delta t) = \dot{q}_{v3}(t) + \left(k(d_{v,com} - d_v)\ell - c(\mathbf{v}_{vc}^T\hat{\mathbf{e}}_{v\ell})\right) \Delta t\quad (3.29)$$

⁵Il est à noter que la gravité aurait pu être insérée dans les équations sans difficulté

où d_v représente un nombre entre 0 et 1, soit la position du point \mathbf{p}_{vc} sur la longueur de l'épée. $d_v = 0$ étant sur la poignée et $d_v = 1$ étant au bout de l'épée. $d_{v,com}$ représente la même chose que d_v , mais pour la position commandé. Les paramètres k et c représentent respectivement la raideur et l'amortissement. Cette commande de vitesse, projetée dans le repère fixe donne tout simplement :

$$\mathbf{v}_{vc,com\parallel} = \dot{q}_{v3}(t + \Delta t)\hat{\mathbf{e}}_{v\ell}. \quad (3.30)$$

La notation « \parallel » a été utilisée dans cette dernière équation pour souligner le fait qu'il s'agit d'une vitesse qui est parallèle à la lame de l'épée. Nous avons maintenant la troisième composante de vitesse qui était requise.

La prochaine étape consiste à transformer cette commande de vitesse cartésienne en vitesse articulaire pour ainsi pouvoir contrôler le robot. Si on reprend l'équation (3.5) et on la reformule pour le robot virtuel on obtient l'équation suivante :

$$\mathbf{A}\dot{\boldsymbol{\rho}}_{v,com} = \mathbf{B}\dot{\mathbf{p}}_{vc,com} \quad (3.31)$$

avec $\dot{\mathbf{p}}_{vc,com} = \mathbf{v}_{vc,com}$ et :

$$\mathbf{v}_{vc,com} = \boldsymbol{\omega}_{com} \times (\mathbf{p}_{vc} - \mathbf{p}_{vo}) + \mathbf{v}_{vc,com\parallel}. \quad (3.32)$$

La commande de vitesse pour les actionneurs devient donc :

$$\dot{\boldsymbol{\rho}}_{v,com} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{B}\dot{\mathbf{p}}_{vc,com} \quad (3.33)$$

3.2.1.4 Une dernière petite étape

L'utilisation du moment du ressort virtuel (\mathbf{t}_r) et de l'amortisseur virtuel (\mathbf{t}_a) nous a permis de formuler une commande de vitesse pour que notre point de contact \mathbf{p}_{vp} puisse atteindre la position du point commandé $\mathbf{p}_{vp,com}$. Cette vitesse (\mathbf{v}_{vp}) est ensuite transformée en commande pour chacun des moteurs. Lorsque les moteurs tournent, ils appliquent une force pour accélérer le robot virtuel⁶. Cependant, ce moment ne

⁶Bien sûr, le robot virtuel n'a pas de câble ni d'effecteur réel, mais ses moteurs sont bel et bien réels et ils ont une inertie et de la friction interne non négligeable.

correspond pas à la somme des moments $\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a$ étant donné que le robot virtuel a beaucoup moins d'inertie que le modèle de l'épée virtuelle. Ceci pourrait évidemment compromettre le réalisme de la simulation dans la situation où l'épée réelle est en contact avec l'épée virtuelle puisque dans cette situation, l'utilisateur devrait ressentir ce moment $\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a$.

Lorsque les deux épées sont en contact et que les moteurs du robot virtuel ne sont pas capables d'atteindre leur vitesse, l'intensité du courant envoyé à ces moteurs grimpe et augmente la force ressentie à l'effecteur. La solution pour rectifier ce problème est de contrôler l'intensité du courant aux moteurs de sorte que le moment $\mathbf{t}_r + \mathbf{t}_a$ ne soit pas dépassé. Aussi, il faut se rappeler que le point d'attache des câbles sur l'épée virtuelle ne correspond pas au point de contact. Ceci fait en sorte que le moment de force ressenti par l'utilisateur n'est pas correct. Il faut donc compenser pour cet effet.

3.2.2 La dynamique des impacts

Lorsque les deux épées entrent en collision, elles rebondissent toutes les deux. L'utilisateur ressent le rebondissement de son effecteur à cause de l'impact qui se produit dans les enrouleurs. Cependant, afin de garder le réalisme de la simulation, il est bien important d'imposer une vitesse à l'épée virtuelle après l'impact pour que celle-ci rebondisse aussi.

Plusieurs tentatives ont été effectuées pour trouver des équations donnant les vitesses après impact de l'épée virtuelle. Elles ont toutes été non fructueuses puisqu'elles aboutissaient toujours à « réinventer la roue ». Il est donc plus productif d'utiliser des algorithmes déjà faits que l'on peut retrouver sous forme de programmes tel que ceux en[5] et[4]. Ces algorithmes font appel aux principes de conservation de la quantité de mouvement ainsi que la conservation d'énergie pour trouver les vitesses après impact.

Les vitesses obtenues avec un algorithme de collision sont imposées à l'épée virtuelle afin que celle-ci puisse rebondir. Étant donné que l'épée ne peut que bouger en rotation, cette commande de vitesse sera donc un vecteur de vitesse angulaire que l'on nommera $\boldsymbol{\omega}_{I,com}$. Cette vitesse sera donc ajoutée à la commande de vitesse à l'équation (3.32) :

$$\mathbf{v}_{vc,com} = (\boldsymbol{\omega}_{com} + \boldsymbol{\omega}_{I,com}) \times (\mathbf{p}_{vc} - \mathbf{p}_{vo}) + \mathbf{v}_{vc,com\parallel} \quad (3.34)$$

À présent, on peut se poser la question suivante : quand est-ce que l'on enlève cette commande de vitesse ? La réponse vient du fait que lorsqu'il y a une collision, il y a un transfert d'énergie cinétique entre les deux corps alors la commande de vitesse sera terminée lorsque cette énergie sera dissipée ou transférée. L'énergie de l'épée virtuelle après impact sera alors :

$$T_{ap} = \frac{1}{6} m \ell^2 \boldsymbol{\omega}_{I,com}^T \boldsymbol{\omega}_{I,com}. \quad (3.35)$$

Après l'impact, l'énergie cinétique sera à la fois dissipée et retransférée. Elle sera dissipée par l'amortisseur du contrôleur d'orientation et l'énergie restante sera transférée au ressort. Pour gérer l'énergie dissipée par l'amortisseur, il faut soustraire l'énergie que celui-ci dissipe à l'énergie cinétique de l'épée. Dans ce cas-ci, il faut tenir compte de la direction de la vitesse angulaire :

$$\hat{\mathbf{e}}_T = \frac{\boldsymbol{\omega}_{I,com}}{\|\boldsymbol{\omega}_{I,com}\|}. \quad (3.36)$$

L'énergie cinétique qui sera enlevée à l'épée à chaque pas de temps correspond à l'intégration du couple de l'amortisseur \mathbf{f}_a multiplié par la vitesse de rotation de l'épée dans la direction de la collision :

$$T_a(i) = \left(f_a(i-1) (\boldsymbol{\omega}_v(i-1)^T \hat{\mathbf{e}}_T) + f_a(i) (\boldsymbol{\omega}_v(i)^T \hat{\mathbf{e}}_T) \right) \frac{\Delta t}{2} \quad (3.37)$$

À tout moment après une collision, l'énergie cinétique non dissipée de l'épée peut être calculée au temps $t = n\Delta t$ avec :

$$T = T_{ap} - \sum_{i=0}^n T_a(i). \quad (3.38)$$

Avec cette équation, l'énergie initiale que l'épée virtuelle aura acquise durant la collision sera diminuée à chaque pas de temps par l'effet de l'amortisseur. Pour tenir compte de l'énergie cinétique qui est transférée au ressort, il faut premièrement mesurer l'énergie potentielle du ressort juste après l'impact dans la direction de $\hat{\mathbf{e}}_T$:

$$V_{ap} = \frac{k_T}{2} (\theta(t_{ap}))^2 \hat{\mathbf{e}}_\theta^T \hat{\mathbf{e}}_T. \quad (3.39)$$

L'énergie cinétique transférée au ressort sera donc $V - V_{ap}$ où V est l'énergie potentielle actuelle du ressort dans la direction de la vitesse. Avec cela, l'équation (3.38)

devient :

$$T = T_{ap} - \sum_{i=0}^n T_a(i) - (V - V_{ap}) \quad (3.40)$$

Cette nouvelle valeur d'énergie cinétique est importante puisqu'il faut ajuster la vitesse consignée à chaque pas de temps en fonction de l'énergie dissipée par l'amortisseur ainsi que l'énergie transférée au ressort. On fait cela en considérant que l'énergie cinétique de l'épée se calcule comme suit :

$$T = \frac{m\ell^2}{6} (\boldsymbol{\omega}_{I,com})^T (\boldsymbol{\omega}_{I,com}) \quad (3.41)$$

donc :

$$\boldsymbol{\omega}_{I,com} = \sqrt{\frac{6T}{m\ell^2}} \hat{\mathbf{e}}_T. \quad (3.42)$$

Alors lorsque l'énergie cinétique aura été complètement dissipée ou transférée ($T = 0$), la vitesse consignée sera nulle et l'on considèrera alors que la collision est terminée.

3.3 Stratégie générale de contact pour une interface à 6 ddl

Les équations de commande présentées dans les sections précédentes ont été conçues de façon à suivre la stratégie de contact établie à la section 2.1.3 qui est montrée à la fig. 2.5. Cette stratégie vise à être proactive en se préparant pour un impact en avance. Dans la fig. 2.5, on peut voir une interface haptique simple, sous forme de robot sériel qui se positionne en prévision d'un impact imminent à l'endroit où cet impact devrait avoir lieu. Le robot sériel déplace une surface de contact sur laquelle l'utilisateur se heurtera.

L'architecture simpliste du robot à câble présenté dans les sections précédentes fait en sorte que son effecteur n'est qu'un simple point au lieu d'être une surface comme il aurait été souhaité. À la fig. 3.4 une image d'un prototype plus avancé est montrée. Ce prototype comprend sept câbles au lieu de trois pour pouvoir faire tous les mouvements possibles avec l'effecteur. De plus, avec une telle configuration il est possible

d'augmenter la tension dans les câbles pour assurer que ceux-ci restent tendus lors d'un impact tout en gardant une somme des forces nulle sur l'effecteur en temps normal. Pour diminuer les interférences de type humain-robot, une barre transversale est ajoutée à l'effecteur. L'épée prend donc la forme d'une croix et la barre ajoutée permet d'éloigner les câbles du corps de l'utilisateur.

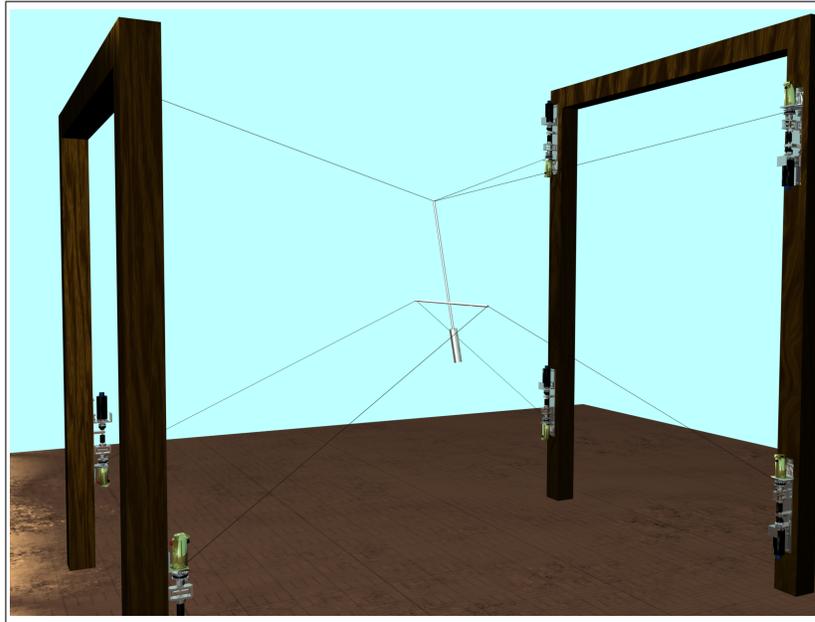


FIG. 3.4: Un interface haptique à câble avec 6 ddl

Tout comme le prototype présenté dans les sections précédentes, cette interface haptique comprend un robot maître et un robot virtuel. Le robot réel est évidemment celui montré dans la fig. 3.4. Le robot virtuel est une fois de plus composé de câbles virtuels et d'un effecteur virtuel. Étant donné que les câbles ont trois points d'attache sur les effecteurs (réel et virtuel) et qu'il faut un minimum de trois points dans l'espace pour définir un plan, la surface de contact devient donc un triangle. Dans la fig. 3.5, l'épée réelle est illustrée à droite, l'épée virtuelle est illustrée à gauche (en vert) et la surface d'impact triangulaire (l'effecteur virtuel) est située sur l'épée virtuelle à la position et à l'orientation qu'aura l'épée réelle lors du contact prévu.

Le contrôle du robot maître à 6 ddl est semblable au contrôle du robot à 3 ddl. Les tensions des câbles seront les variables contrôlées une fois de plus sauf que le servo contrôleur pourrait aussi équilibrer les forces à l'effecteur.

Pour le robot virtuel à 6 ddl, les choses se compliquent. L'élaboration de la stratégie

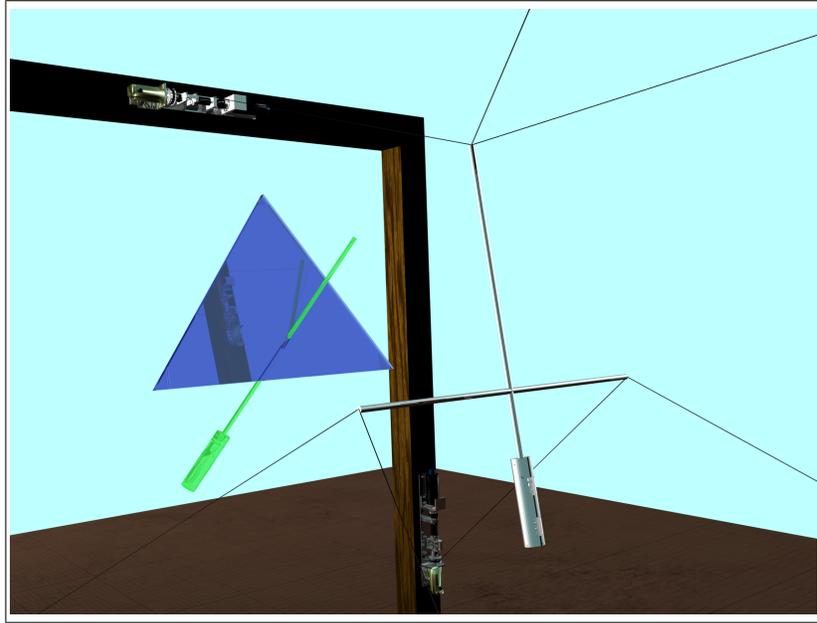


FIG. 3.5: Les deux effecteurs de l'interface à 6 ddl

de commande pour le mécanisme à 3 ddl a été ardue en raison du fait que le mécanisme sort de l'ordinaire. Par conséquent, cette stratégie de commande ne ressemble pas du tout à celle qui a été imaginée au début. Il serait donc prétentieux d'élaborer une nouvelle stratégie de commande et d'affirmer qu'elle fonctionnera sans souci lors d'une mise en oeuvre éventuelle. Cependant, les grandes lignes d'une stratégie éventuelle seront développées dans les paragraphes qui suivent. Il est alors évident que cette stratégie n'est pas prête à être appliquée à d'autres types de mécanismes tant et aussi longtemps que la stratégie de contrôle n'a pas été élaborée et testée.

La position de l'effecteur du robot virtuel à 3 ddl dicte la position du point de contact ainsi que l'orientation de l'épée virtuelle. De cette manière, les déplacements subis par le point de contact causé par l'épée de l'utilisateur sont automatiquement transmis à l'épée virtuelle. Ce qui est souhaité, c'est d'obtenir le même type de rapport entre l'effecteur à 6 ddl et l'épée virtuelle.

L'effecteur de l'interface haptique à 3 ddl était contrôlé en vitesse puisqu'il était possible d'effectuer un asservissement en boucle fermée pour cette variable grâce aux encodeurs optiques sur chacun des moteurs du robot virtuel. Cependant, pour l'interface à 3 ddl, il aurait été possible d'asservir le couple des moteurs en boucle fermée, mais ce type d'asservissement n'a pas été réalisé bien qu'il soit tout à fait viable. Il est

important de se rappeler qu'il n'y a aucun capteur de force sur le prototype d'interface à 3 ddl. Toutefois, il est possible d'obtenir le couple de chaque moteur indirectement et utiliser ces valeurs pour trouver le torseur à l'effecteur.

Dans la section 2.2.1, il a été expliqué que le robot virtuel portait ce nom parce que ses câbles étaient virtuels et son effecteur l'était aussi. Seuls les moteurs sont réels. Conséquemment, ces moteurs n'ont pas besoin de fournir un grand couple pour atteindre leur position ou leur vitesse de consigne puisqu'ils ne font que déplacer leurs propres inerties et combattre leurs frictions internes. Il faut se rappeler que les moteurs choisis sont des moteurs à courant continu à transmission directe. Cela veut dire que leur friction interne n'est pas tellement grande. Le résultat est que nous pouvons considérer que la majorité du couple fourni par chaque moteur sert à surmonter une résistance externe. Bien sûr, cette résistance externe provient de l'utilisateur lui-même qui exerce une force sur l'effecteur virtuel. C'est ainsi que l'ensemble des moteurs pourrait être utilisé en tant que capteur de force sur une interface haptique et cela pourrait possiblement sauver le montage d'un capteur de force dispendieux.

L'idée d'utiliser un capteur de force permettrait de contrôler l'interface haptique avec un asservissement hybride. C'est-à-dire qu'il serait contrôlé en force lors d'un contact et contrôlé en vitesse lorsqu'il n'y a aucun contact. Ceci permettrait entre autres, un meilleur contrôle de la force de friction lors d'un frottement durant un contact.

Les propositions présentées dans cette section pourraient aider à élaborer une interface haptique qui serait fort intéressante. Au chapitre suivant, plusieurs recommandations pour améliorer les enrouleurs seront énumérées. Il est fortement recommandé d'effectuer une mise à niveau des enrouleurs en suivant ces recommandations puisque celle-ci devrait augmenter la performance du mécanisme.

Chapitre 4

Évaluation des enrouleurs et discussion des améliorations requis

Le prototype d'enrouleur présenté dans ce mémoire cherche à redéfinir la manière avec laquelle les contacts haptiques sont accomplis. L'idée principale derrière le principe de fonctionnement de ce mécanisme est de produire des impacts pour ainsi recréer les vibrations qui devraient avoir lieu lors d'une collision entre deux épées métalliques. Son fonctionnement a été expliqué dans les chapitres précédents. À présent, son efficacité à reproduire des contacts crédibles sera évaluée.

Dans la première partie de ce chapitre, un banc d'essai sera établi pour que l'on puisse évaluer la crédibilité des contacts générés par les enrouleurs. L'établissement de ce banc d'essai sert évidemment à décrire ces fameux contacts d'une façon quantitative plutôt que qualitative. Aussi, plusieurs points d'améliorations ont été notés en manipulant les prototypes d'enrouleur lors de la réalisation des essais. Ces points seront énumérés durant la deuxième partie de ce chapitre et devraient donner de bonnes idées pour améliorer le mécanisme davantage.

4.1 Évaluation des contacts

4.1.1 Élaboration du banc de test

Les capacités sensorielles de l'être humain ont été énumérées dans la section 1.2. Dans cette section, il a été expliqué que l'humain pouvait faire la distinction entre divers types de matériaux en touchant ceux-ci avec sa peau. Cet exploit est accompli par le biais de petits mécanorécepteurs situés dans la peau glabre qui sont sensibles aux vibrations qui surviennent lorsque cette peau tape une surface ou lorsqu'elle caresse la texture de celle-ci.

Quand deux épées se frappent (deux épées réelles dans ce cas-ci), les vibrations transitoires qui se produisent lors de l'impact ont des propriétés qui peuvent être détectées par les petits mécanorécepteurs dans la peau de la main qui tient une des deux épées. Il a été décrit dans la sous-section 1.3.3 que la fréquence de vibration f ainsi que la constante de temps d'atténuation $\frac{1}{\mu}$ était fonction du type de matériau de l'objet impliqué dans l'impact¹. C'est avec ces propriétés que l'humain est capable de déterminer le type de matériau qu'il tient.

Les enrouleurs ont été conçus pour tenter de reproduire ces vibrations typiques qui devraient avoir lieu durant un impact entre deux épées. L'idée de faire ainsi étant évidemment pour augmenter le réalisme de ce contact en ajoutant un élément qui est normalement absent ou négligé dans les mécanismes haptiques conventionnels, c'est-à-dire, les vibrations. Il est donc primordial de vérifier si ces vibrations sont réellement générées par le mécanisme d'impact. Pour ce faire, un accéléromètre a été employé afin de mesurer les vibrations provoquées par le mécanisme lors d'un impact. C'est ici qu'un banc de test sera crucial.

Les mesures de vibrations obtenues lors des essais doivent être comparées avec les vibrations typiques que l'on aurait mesurées durant un impact entre deux épées. Dans le tableau 1.1, il y a des valeurs de fréquence de vibration ainsi que des valeurs de constante de temps d'atténuation pour des vibrations typiques que l'on pourrait mesurer sur différents matériaux. Ces valeurs conviendront parfaitement pour les besoins de

¹Voir tableau 1.1

banc de test. Plus particulièrement, les valeurs pour l'acier satisferont les besoins étant donné que l'on souhaite simuler des impacts entre deux épées (deux objets rigides). La fréquence idéale que l'on aimerait mesurer, celle de l'acier, est de 1682 Hz et la constante de temps idéale est de 0,32 ms.

À ce moment-ci, le lecteur pourrait se poser des questions quant à la possibilité de mesurer des fréquences de vibrations aussi élevées sur un montage ayant une faible rigidité. En effet, nous savons d'avance que les câbles du mécanisme réduiront la fréquence des vibrations en raison de leur faible rigidité. Pour la même raison, il est aussi évident que les vibrations prendront plus de temps à s'atténuer. Ce qui reste à voir, c'est à quel point le réalisme des contacts est pénalisé par la présence des câbles dans le mécanisme. Par contre, le fait de mesurer des vibrations de fréquence inférieure à celle de l'acier (ou n'importe quel métal) ne signifie pas nécessairement que tout est perdu. Effectivement, il y a quelques faits qui peuvent nous aider. À la section 1.2.3, il a été mentionné que les mécanorécepteurs qui sont responsables de capter les vibrations d'impact sont sensibles seulement aux fréquences qui varient de 50 à 500 Hz[27]. De plus, leur sensibilité maximale serait autour de 250 Hz. Ceci semble suggérer qu'il n'est pas nécessaire de générer des vibrations de fréquences aussi élevées puisque les récepteurs ne sont pas capables de les capter. Cela voudrait dire que les vibrations de hautes fréquences comme celles qui seraient perçues lors d'un impact entre deux objets métalliques seraient perçues comme des vibrations de fréquence inférieure à 500 Hz à cause du phénomène de repliement spectral. Alors, il n'est pas nécessaire de générer des fréquences de vibration au-delà de 500 Hz puisque les mécanorécepteurs ne pourront pas les capter.

4.1.2 Montage

Le montage qui a servi à mesurer les vibrations d'impact est montré à la figure 4.1. Un accéléromètre² a été placé sur le bout de l'épée afin de mesurer les vibrations provenant des câbles. Certains ont déjà suggéré qu'il serait préférable de placer l'accéléromètre sur la poignée de l'épée afin de mesurer les vibrations ressenties par l'utilisateur. Bien que l'auteur soit d'accord avec la pertinence de cette mesure, ce n'était pas le but de l'expérience. Il faut se rappeler que les câbles sont les composantes qui sont res-

²L'accéléromètre est de type PCB SN 16308.

possibles d'attribuer une faible rigidité à l'interface haptique. C'est donc les câbles qui seront responsables de l'atténuation des vibrations provenant des enrouleurs. C'est pour cette raison qu'il est souhaitable de connaître l'état des vibrations provenant des câbles. De cette manière, nous saurons à quel point l'interface est « pénalisée » pour avoir utilisé des câbles.

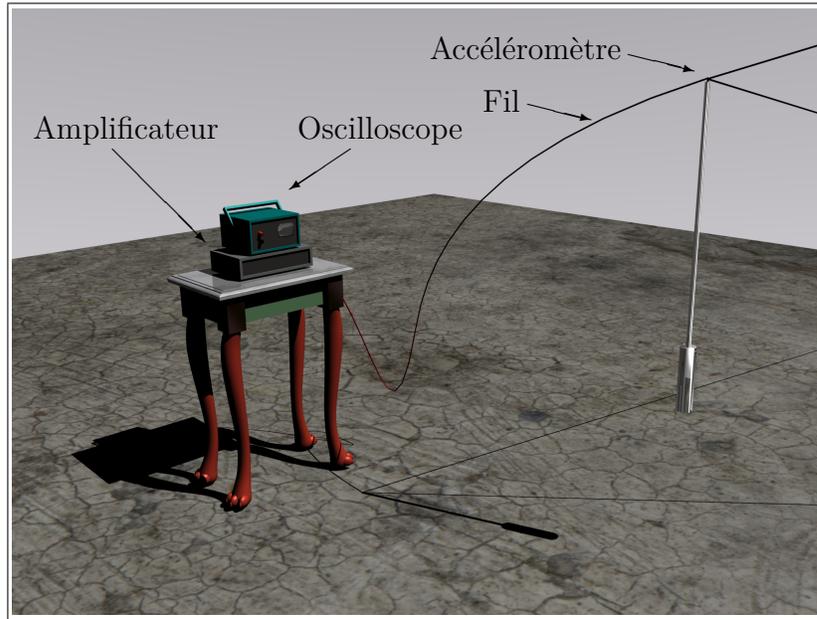


FIG. 4.1: Le montage expérimental

Un amplificateur de signal est utilisé avec l'accéléromètre pour conditionner le signal de celui-ci. Les deux composantes sont reliées par le biais d'un petit fil coaxial. Un oscilloscope reçoit le signal conditionné par l'amplificateur pour l'enregistrer. Celui-ci enregistre les données à un rythme de 10 kHz, nous donnant ainsi une fréquence de Nyquist de 5 kHz. Cette fréquence d'acquisition est suffisante puisque la fréquence maximale que l'on souhaiterait mesurer est de 1682 Hz (acier). Il faut aussi mentionner qu'il est possible de transférer les données de l'oscilloscope sur un ordinateur.

C'est les fréquences de vibration des impacts ainsi que la constante d'atténuation de ces vibrations qui seront observées durant ces expériences. Quant aux amplitudes de vibrations, bien qu'elles ont pu être mesurées avec l'accéléromètre, elles ne seront pas discutées puisqu'elles sont fonction de la fréquence de vibration, la constante d'atténuation ainsi que l'énergie de l'impact (voir sous-section 1.3.3) et ne permettent donc pas aux mécanorécepteurs humains d'identifier le type de matériau qui a été heurté.

4.1.3 Impact sur deux axes

Pour les premières mesures d'impact, il a été jugé qu'il était pertinent de mesurer les vibrations produites par deux câbles. Cela a été accompli en positionnant l'effecteur à la position $\mathbf{p}_{ri} = [0 \ 0,97 \ 0]^T$. À la fig. 4.2, on peut voir que seulement deux câbles sont sollicités lorsque l'effecteur est à cette position et que la vitesse d'impact est dirigée dans la direction v .

Les consignes données aux moteurs d'impact pour produire les impacts voulus étaient des consignes de vitesse destinées à produire des vitesses précises à l'effecteur virtuel. La première consigne de vitesse était de -2 m/s dans la direction x et 2 m/s dans la direction y (cela nous donne une vitesse de 2.83 m/s dans la direction v). Étant donné que cette vitesse est relativement faible et que les rotors des moteurs d'impact de faible inertie sont les seules parties en mouvement, il serait correct de considérer que le moment angulaire généré est faible.

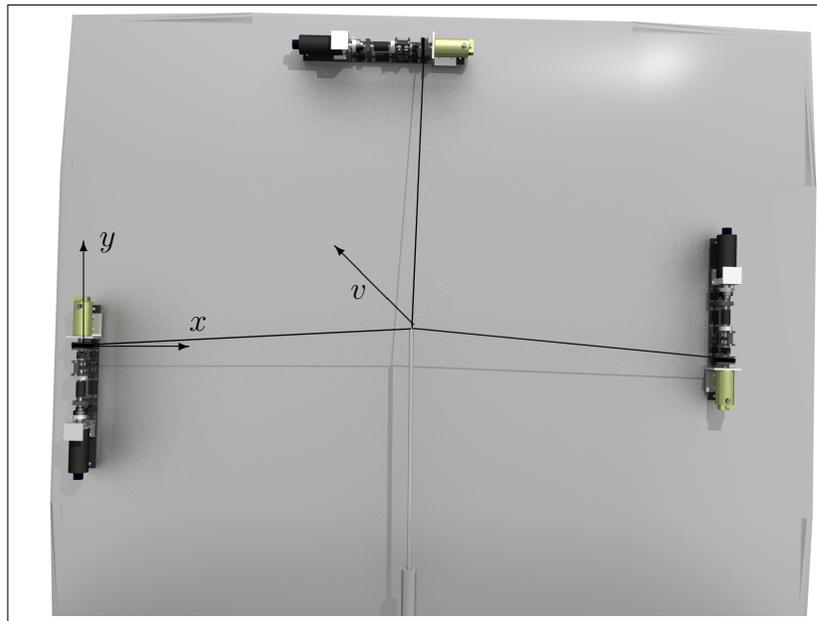


FIG. 4.2: Application d'une force sur deux axes

La deuxième consigne de vitesse était de -4 m/s dans la direction x et 4 m/s dans la direction y (5.66 m/s dans la direction v). Le moment angulaire résultant peut être considéré comme étant de grandeur moyenne. Les résultats des mesures pour les deux consignes de vitesse se retrouvent plus loin à la sous-section 4.1.5.

4.1.4 Impact sur trois axes

Les prochaines mesures qui ont été effectuées étaient des mesures d'impact sur trois câbles. Elles ont été effectuées en positionnant l'effecteur à la position $\mathbf{p}_{ri} = [0 \ 0,97 \ 0,5]^T$ et en dirigeant l'impact dans la direction z montrée à la figure 4.3. Quand l'impact est dirigé dans la nouvelle direction v , il est évident que les trois câbles seront requis pour accomplir l'effet. Pour ces mesures, deux vitesses d'effecteur ont été choisies comme consigne. La première est -6 m/s et la deuxième est -8 m/s . Il serait correct de considérer que la deuxième vitesse attribue un moment angulaire de grande envergure au mécanisme.

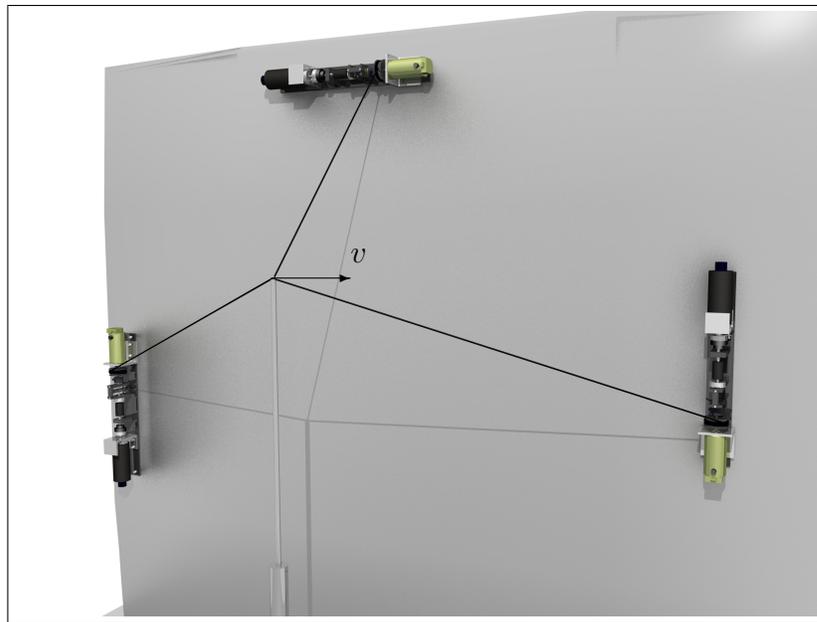


FIG. 4.3: Application d'une force sur deux axes

4.1.5 Résultat des expériences

4.1.5.1 Expériences à deux câbles

Des résultats de mesure typiques sont illustrés à la fig. 4.4a et 4.4b pour les expériences à deux câbles. À la fig. 4.4a, un résultat typique est montré pour un impact de 2.83 m/s dans la direction v . À la fig. 4.4b, c'est un résultat typique pour un impact

de 5.66 m/s qui est montré.

Suite à une analyse spectrale de type FFT, il a été observé dans les deux cas que la plus grande amplitude de vibration se trouvait toujours dans l'intervalle de 140 à 160 Hz. Cependant, à basse vitesse, des amplitudes de vibrations entre 30 et 50 Hz se manifestaient. Dans les deux cas, la constante de temps d'atténuation des amplitudes de vibrations était mesurée entre 11 ms et 16 ms. Ces constantes de temps $\frac{1}{\mu}$ ont été estimées en considérant que la période de temps entre le début des vibrations et la fin des vibrations correspond à cinq fois la constante de temps ($\Delta t \approx 5\mu$).

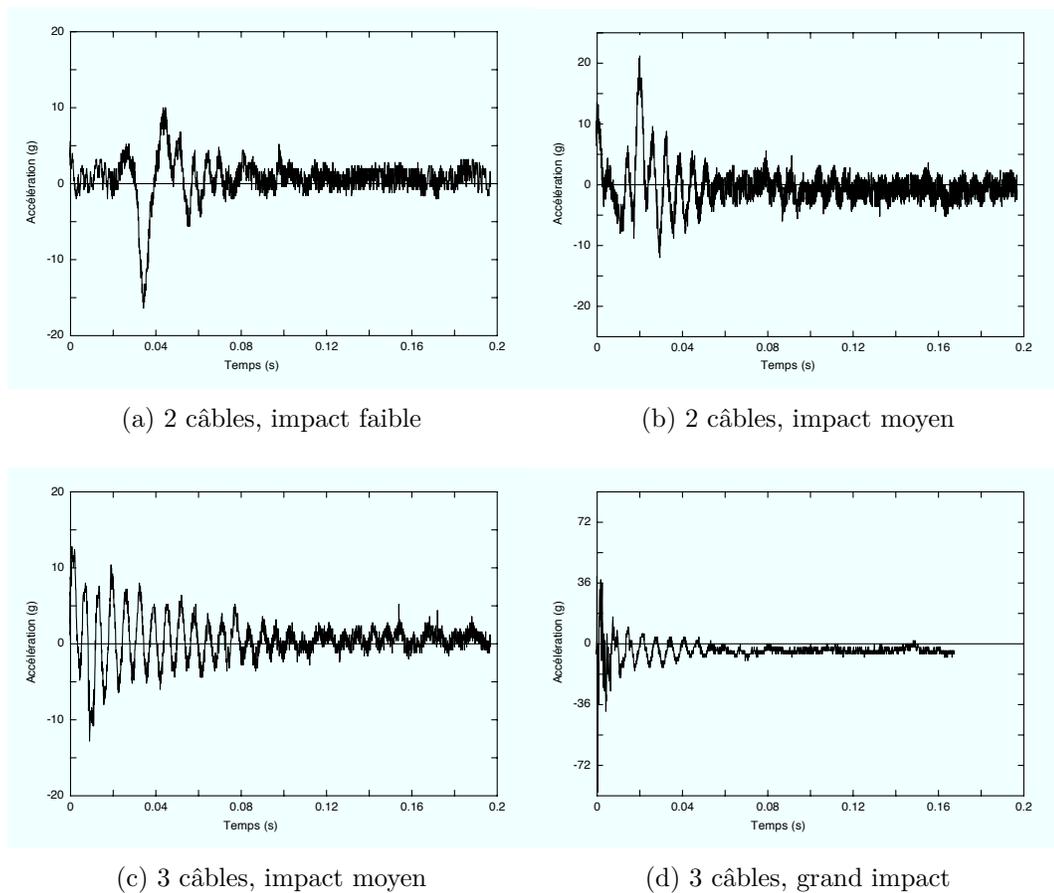


FIG. 4.4: Résultat des mesures d'impact

4.1.5.2 Expériences à trois câbles

Un résultat de mesure typique d'impact de -6 m/s dans la direction z est montré à la figure 4.4c et à la fig. 4.4d il y un exemple de mesure pour un impact de -8 m/s

dans la direction z . À la fig. 4.4d il est important de noter le changement d'échelle sur l'ordonnée du graphe en raison des amplitudes de vibrations plus violentes causées par la vitesse d'impact qui est supérieur.

Il a été intéressant de constater qu'une fois de plus, des amplitudes ont été mesurées dans les fréquences entre 140 et 160 Hz. De plus, lorsque la vitesse d'impact était grande, des fréquences entre 300 et 500 Hz ont été mesurées. Par exemple, à la fig. 4.4d il est possible de voir que ces vibrations de haute fréquence sont présentes au début de l'impact. La fréquence exacte de ces vibrations variait grandement d'une expérience à l'autre, mais le simple fait qu'elles soient présentes est fortement encourageant. Quant aux mesures de constante de temps d'atténuation $\frac{1}{\mu}$, elles sont restées presque inchangées. Elles variaient entre 11 ms et 20 ms.

4.1.6 Discussion des mesures

Un tableau synthèse des résultats de mesure est donné au tableau 4.1.

TAB. 4.1: Tableau synthèse des mesures

Expérience	Fréquences moyennes f	Constante de temps moyenne $\frac{1}{\mu}$
2D : $v = 2.83$ m/s	$f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 150$ Hz	$\frac{1}{\mu} = 14.7$ ms
2D : $v = 5.66$ m/s	$f_1 = 50$ Hz, $f_2 = 160$ Hz	$\frac{1}{\mu} = 11$ ms
3D : $v = 6$ m/s	$f_1 = 53.7$ Hz, $f_2 = 156.4$ Hz	$\frac{1}{\mu} = 20.7$ ms
3D : $v = 8$ m/s	$f_1 = 156.4$ Hz, $f_2 = 300 - 500$ Hz*	$\frac{1}{\mu} = 17$ ms
	Valeurs théoriques	
Acier	$f = 1682$ Hz	$\frac{1}{\mu} = 0.32$ ms
acrylique	$f = 128$ Hz	$\frac{1}{\mu} = 2.13$ ms

*Valeurs imprécises

Les premières données qui seront discutées sont les fréquences de vibration lors des impacts. Parmi les fréquences mesurées, celles qui étaient les plus présentes se situaient entre 140 et 160 Hz. Elles ont été mesurées dans toutes les expériences et devenaient

prédominantes à vitesse moyenne ($v \approx 6$ m/s). Au-delà de cette vitesse ($v \approx 8$ m/s), il y a apparition de vibrations de fréquences se situant entre 300 à 500 Hz. Il faut mentionner qu'à cette vitesse, les moments angulaires générés étaient grands et donc les impacts engendrés étaient très brusques. Par conséquent, le contrôleur de tension des câbles était dans l'impossibilité d'assurer que les câbles restent tendus et cela pourrait expliquer les mesures imprécises. À la section 3.3, une architecture à sept câbles a été suggérée comme montage futur et il a été mentionné que cela permettrait d'augmenter la tension dans les câbles. Cette tension supérieure pourrait donc aider à garder la tension dans les câbles durant un impact brusque.

Dans [1] il a été décrit que l'augmentation de la tension des câbles dans un mécanisme pleinement contraint augmentait la rigidité du mécanisme. L'augmentation de tension pourrait donc potentiellement aussi aider à obtenir des fréquences de vibration dans les environs de 500 Hz. Il faut se rappeler que l'obtention de cette fréquence de vibration était le but qui a été fixé pour que les impacts générés par le mécanisme puissent ressembler à des impacts d'objets en acier (épées).

Est-ce que l'augmentation de la tension des câbles veut nécessairement dire une augmentation générale de la fréquence de vibration du mécanisme ? Il se peut que oui tout comme il se peut que cela fasse en sorte que ces vibrations de haute fréquence ne fassent que se manifester de façon plus constante à haute vitesse. Il faudra bien sûr réaliser d'autres expériences avec un mécanisme à sept câbles pour confirmer cette hypothèse.

Il y a au moins une chose de certaine et c'est le fait que les vibrations de l'ordre de 140 à 160 Hz sont là pour rester. Si l'on regarde la fréquence de vibration d'un impact pour un objet en acrylique (tableau 4.1), il est apparent qu'elle soit de l'ordre de grandeur des vibrations obtenues avec le mécanisme. Est-ce que cela veut dire que le mécanisme est en mesure de reproduire des impacts d'objet fabriqués en acrylique ? Cela ne serait pas une mauvaise chose étant donné que l'acrylique est un matériau que l'on pourrait considérer comme étant dur. Par contre, il faudrait faire des expériences additionnelles pour en être certain et il ne faudrait pas oublier aussi l'influence de la constante de temps d'atténuation.

Il n'est pas clair jusqu'à quel point le temps d'atténuation a une influence sur la perception des contacts. Aucune mention n'a été trouvée dans la littérature concernant

l'influence de la vitesse d'atténuation des vibrations sur les mécanorécepteurs humains. Notre intuition pourrait nous porter à croire qu'un accroissement du temps d'atténuation aurait tendance à donner l'impression de subir un impact « mou » et il est fort probable que cela soit une affirmation qui est correcte. Donc, cette hypothèse sera considérée comme étant exacte.

Les constantes de temps d'atténuation mesurées durant les essais sont beaucoup plus grandes que celle de l'acier et même plus grandes que l'acrylique. Il n'est pas certain jusqu'à quel point cette différence nuit au réalisme des impacts, mais il serait possible de se réconcilier avec le fait que ces constantes demeurent petites (centièmes de secondes).

Pour résumer, les résultats de mesures ont permis de découvrir que les vibrations pendant les impacts contenaient toujours des amplitudes dans l'intervalle de fréquence de 140 à 160 Hz. Il était intéressant de constater que les fréquences de vibration de l'acrylique étaient de 128 Hz et que ce matériau, même s'il est beaucoup moins rigide que l'acier, est tout de même rigide. De plus, des vibrations de fréquences qui se situent dans l'intervalle de 300 à 500 Hz pouvaient se manifester lorsque la vitesse d'impact devenait grande. Il faudra refaire des mesures lorsque les modifications apportées à la section suivante seront apportées aux enrouleurs. S'il est possible de réaliser des impacts ayant des fréquences plus grandes que 300 Hz on pourrait considérer que notre but est atteint. Par contre, le seul bémol provenant des mesures était que les temps d'atténuation des vibrations étaient trop longs. Bien qu'il n'était pas clair jusqu'à quel point cela nuisait à la crédibilité des impacts, il est fort probable que cette atténuation trop longue donne l'impression que les contacts sont un peu plus mous.

4.2 Discussion des améliorations requises pour les enrouleurs

Au chapitre 3, l'algorithme de contrôle a été détaillé. On y a expliqué comment le robot virtuel contrôlait le point de contact ainsi que l'épée virtuelle. Aussi, il a été détaillé comment les mouvements de l'utilisateur étaient captés par le robot. Finalement, la stratégie de détection des contacts a été montrée pour que l'ensemble puisse

fonctionner en tant qu'interface haptique. Tous ces algorithmes ont été mis en application dans le programme de commande (détaillé dans l'annexe B) et il a été possible d'évaluer le fonctionnement.

Suite aux nombreux essais qui ont été faits sur le prototype d'interface haptique à trois câbles, plusieurs améliorations potentielles ont été notées. La première d'entre elles concerne l'architecture des câbles et a déjà été expliquée à la section 3.3. Pour le reste, il s'agit de modifications qui devraient être apportées à la mécanique des enrouleurs. Il y a divers buts pour ces modifications. La plupart des modifications suggérées ont pour but de corriger certains défauts du design et d'autres sont suggérées pour améliorer le fonctionnement de l'enrouleur, notamment durant les impacts.

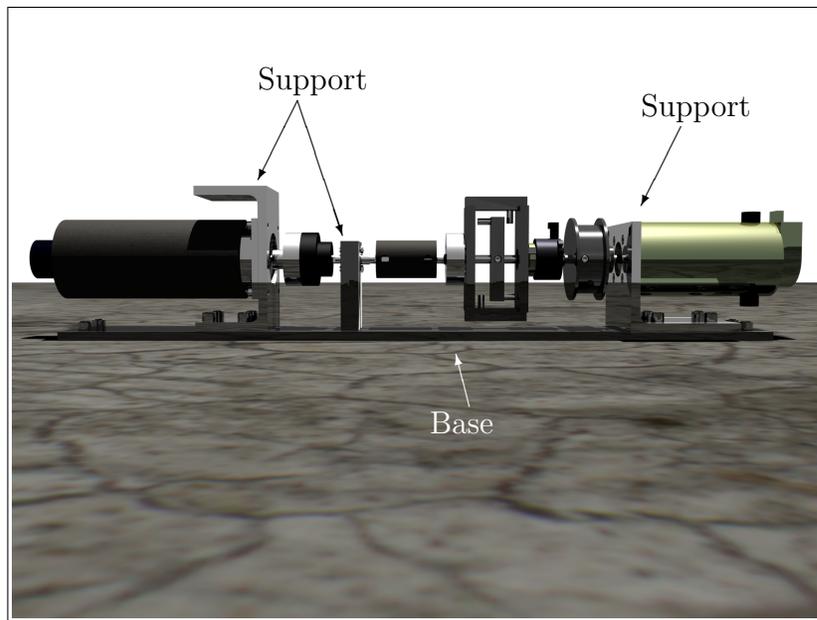


FIG. 4.5: Vue de face : enrouleur

4.2.1 Les embrayages

Un des aspects principaux à considérer lorsque l'on parle de la performance de l'interface haptique est la force des impacts. Bien que cette force soit limitée par le moteur d'impact, elle est aussi limitée par l'embrayage du moteur d'impact (Embrayage de gauche dans la fig. 4.6). En effet, pour le prototype d'interface à trois câbles, cet embrayage s'est avéré problématique et il devrait être changé en raison du fait qu'il

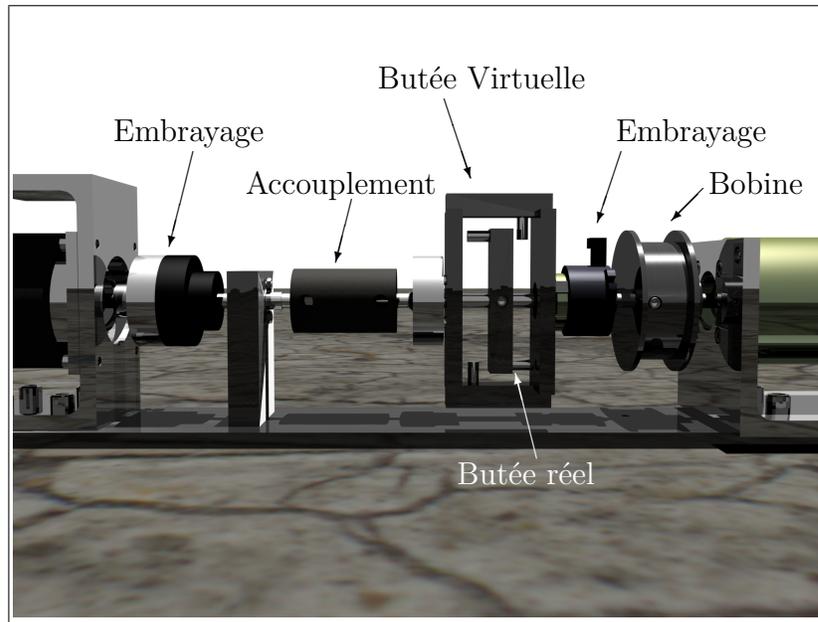


FIG. 4.6: Vue de proche : enrouleur

glissait sans cesse durant les essais. Quant au moteur d'impact, il a été observé que celui-ci offrait une bonne force d'impact tout en étant sécuritaire.

Il y a deux raisons pour expliquer le fait que cet embrayage glisse : il est mal installé et sa qualité est moindre. La deuxième raison est suffisante pour justifier son changement, mais il serait important d'élaborer sur son installation puisque plusieurs embrayages s'installent de la même façon. C'est-à-dire qu'ils s'installent souvent sur des arbres à l'aide de vis de serrage. Dans la plupart des mécanismes, on cherche à minimiser les vibrations. Cependant, dans ce mécanisme on cherche plutôt à maximiser les vibrations. Ces vibrations ont alors pour effet de causer le desserrage de ces vis après un certain nombre d'impacts et causent éventuellement une situation où la distance requise entre les deux plaquettes de friction n'est plus respectée³.

L'embrayage en question est un embrayage électromagnétique à friction. C'est-à-dire que l'accouplement est fait par l'entremise de deux plaquettes de friction similaires à celles trouvées dans un frein qui se ferment sur elles-mêmes lorsqu'activées. Le moteur d'impact peut générer un couple maximal de 29,1 lb-po (3,29 Nm, sans compter les effets d'inertie) tandis que l'embrayage peut résister à un couple maximal de 10 lb-po

³0.004"-0.009" pour ce modèle d'embrayage.

(1,13 Nm). Il faudrait donc idéalement choisir un embrayage avec un couple en parité avec celui du moteur. Il serait possible de choisir un autre embrayage du même type mais de plus grosse taille afin de subvenir à nos besoins, mais il y a une autre option.

Il faudrait explorer la possibilité d'utiliser un embrayage électromagnétique à dents (tooth clutch). Ce type d'embrayage a un fonctionnement semblable à celui des embrayages à friction sauf que l'accouplement se fait par l'entremise de roues dentées qui s'emboîtent l'une dans l'autre. Il n'y a donc aucun glissement lorsque l'embrayage est bien engagé.

L'embrayage de droite sur la fig. 4.6 devrait aussi être changé. C'est un embrayage électromagnétique à ressort enveloppant⁴ et son fonctionnement est un peu différent de celui de l'embrayage à friction. Lorsque celui-ci est activé, la force électromagnétique retient un ressort qui à son tour s'enroulera. Au bout du ressort se trouve la partie du mécanisme qui est normalement isolée de l'arbre d'entrée de l'embrayage. Cependant, une fois que le ressort est complètement enroulé, cette partie se met à tourner avec l'arbre d'entrée.

Ce type d'embrayage a été choisi pour plusieurs raisons. Il n'est pas cher, il est petit, son couple de friction est quasi nul en tout temps et sa transmission de couple est unidirectionnelle (comme un manche à cliquet ou « ratchet ») lorsqu'il est activé. Cette dernière caractéristique est utile dans la situation où l'embrayage est activé pour tenir les deux butées dans leur position prête. Dans cette position, les deux butées sont espacées d'un certain angle. Dans l'éventualité où l'embrayage serait fermé lorsque les deux butées ne sont pas dans leurs positions prêtes, l'embrayage permet aux deux butées de se mettre en position par elles-mêmes et de s'immobiliser par les limitations mécaniques. En d'autres mots, l'embrayage permet en tout temps le mouvement de rotation des deux butées dans la direction qui augmente l'espace entre les deux butées et bloque les mouvements qui causent une diminution de cet angle.

Bien que l'embrayage à ressort ait des qualités intéressantes, son principe de fonctionnement cause des problèmes. Ces problèmes sont liés au fait que le ressort doit s'enrouler avant de créer l'accouplement entre l'entrée et la sortie de l'embrayage. La distance angulaire que le ressort utilise en s'enroulant est de 15° ($\frac{\pi}{12}$ rad). Le résultat

⁴Traduction libre de « wrap spring clutch ». Voir <http://www.ogura-clutch.com/> pour des exemples.

est que lorsque l’embrayage est fermé pour garder les butées espacées, celles-ci peuvent quand même bouger de 15° . Elles ne restent donc pas exactement dans leurs positions prêtes et cela cause évidemment des problèmes lors des impacts. L’espacement entre les butées doit être précis puisque chaque paire de butées sur chacun des enrouleurs doit se heurter en même temps lors d’un impact pour éviter de générer plusieurs petits impacts au lieu d’un seul.

Il est donc suggéré de changer l’embrayage à ressort pour un simple embrayage à friction. Puisque l’embrayage en question n’a pas besoin d’un grand couple pour tenir les deux petites butées en position, un embrayage à friction serait adéquat. Pour rectifier le fait qu’un tel embrayage puisse transmettre un couple dans les deux directions, un embrayage à rouleau⁵ pourrait être utilisé avec l’embrayage pour recréer une transmission de couple unidirectionnelle comme celle des embrayages à ressort.

4.2.2 Capteur de position pour la butée virtuelle

L’action de produire un impact avec un enrouleur nécessite un changement d’état pour les deux embrayages (figures 2.10 et 2.12). En théorie, durant cet événement, la butée virtuelle est relâchée par un embrayage pour ensuite être accouplée au moteur d’impact par l’entremise de l’autre embrayage. En pratique, il y a du glissement qui se produit dans les embrayages ce qui fait en sorte que la position de la butée virtuelle devient erronée puisque la position de celle-ci n’est plus mesurée pendant le transfert d’accouplement. Il faut se rappeler que la position de cette butée est obtenue par le biais du moteur à câble en temps normal et du moteur d’impact lors d’un impact. Ce transfert d’accouplement fait donc en sorte que les impacts ne se produisent pas toujours au bon endroit.

Il est certain que les modifications préconisées pour les embrayages dans la section précédente ne pourront faire autrement qu’aider à diminuer cet effet de glissement. En effet, l’embrayage du moteur d’impact glisse parce qu’il est mal installé et il n’est pas assez résistant. Par contre, il est fort probable que le glissement ne sera jamais éliminé. C’est pour cette raison qu’il serait recommandé d’installer un capteur pour tenir compte

⁵Traduction libre de « roller clutch ». Il s’agit de paliers à roulement qui tournent dans un sens seulement. Voir <http://www.sdp-si.com> pour des exemples.

de cet effet et ainsi pouvoir le mitiger.

Ce n'est pas juste en raison du glissement qu'il faudrait ajouter un capteur de position sur la butée virtuelle. Il y a deux situations qui bénéficieraient d'un tel capteur pour améliorer leur déroulement. La première situation se produit lors de l'impact. C'est à ce moment qu'une dynamique est imposée à l'épée virtuelle pour que celle-ci recule sous l'effet de l'impact (section 3.2.2). Il est important que cette dynamique imposée se produise immédiatement après l'impact. Si elle se produit juste un peu avant, la collision sera moindre puisque l'épée virtuelle aura déjà commencé à reculer de l'effecteur. Si elle se produit trop longtemps après l'impact, l'effet sera bizarre. Puisque le glissement des embrayages rend difficile la tâche de prédire le moment d'impact exact, il faut le deviner et cela fait en sorte que l'épée virtuelle recule souvent au mauvais moment. Il est alors évident qu'un capteur de position pourrait aussi aider dans cette situation en créant un signal de départ pour le recul de l'épée virtuelle.

L'autre situation qui bénéficierait du capteur de position est durant la réinitialisation des butées après un impact. Cette réinitialisation se fait lorsque les deux épées sont suffisamment éloignées et que par conséquent, les butées sont revenues à leurs positions initiales. On utilise donc la position des butées pour déterminer si l'impact est terminé. Lorsqu'une ou plusieurs butées virtuelles reviennent à leur position initiale, on considère que le mécanisme n'est plus en mode « contact ». À ce moment-ci, il est important de ramener les butées virtuelles qui n'ont pas atteint leurs positions initiales avant de changer l'état des embrayages pour revenir en mode normal. Ici, encore une fois, le fait que la position de la butée virtuelle soit imprécise rend la tâche difficile et l'ajout d'un capteur apporterait une solution au problème. Un capteur serait en mesure d'avertir le contrôleur du fait qu'une ou plusieurs butées sont revenues à leur position prête et il serait donc capable de replacer les butées qui n'ont pas atteint leur position prête en utilisant le moteur d'impact. Une fois réinitialisé proprement, le contrôleur peut retourner le système en mode normal.

Il y a deux sortes de capteurs possibles pour satisfaire à nos besoins et chacun comporte des défis techniques. En premier lieu, un encodeur optique pourrait être placé sur l'arbre de la butée virtuelle. Du point de vue mécanique, c'est la solution la plus facile. Par contre, du point de vue électronique, cette solution pose un problème. En effet, sur la plupart des amplificateurs de puissance de moteur standard, il y a le même nombre d'entrées pour des encodeurs optiques qu'il y a de sorties de puissance

pour les moteurs. Dans le prototype actuel, ceci ne pose aucun problème puisqu'il y a deux moteurs avec un encodeur sur chacun de ces moteurs. Il est alors clair que si un encodeur de plus par enrouleur est utilisé, il faudrait utiliser des amplificateurs non standards.

L'autre solution consisterait à poser deux interrupteurs de limite ou « limit switch » sur les butées de façon à obtenir un signal digital en position initiale et un signal en position de contact. Du point de vue électronique, cette solution ne pose aucun problème puisqu'elle nécessite seulement deux entrées digitales. Par contre, du point de vue mécanique les choses se compliquent.

Un interrupteur peut être posé facilement sur une pièce en rotation. Par contre, le filage nécessaire serait évidemment beaucoup plus difficile à installer. Il n'y a présentement aucune solution suggérée pour résoudre ce problème, mais cela ne veut pas dire que cette solution soit impossible.

4.2.3 Les butées

Quand on regarde les deux butées (fig. 4.6) on voit immédiatement que la butée virtuelle est beaucoup plus grosse que la butée réelle. En fait, ce qui nous concerne c'est plutôt le fait que son inertie est non négligeable. Il faut se rappeler qu'en temps normal, cette butée est attachée à la butée réelle et les deux peuvent bouger ensemble. Lorsqu'un impact est commandé, les embrayages changent d'état et la butée virtuelle devient accouplée avec le moteur d'impact. Ceci pose des problèmes au PID du moteur d'impact puisque l'augmentation de l'inertie vient dérégler celui-ci.

Si le PID est réglé en fonction de l'inertie du moteur d'impact seulement, celui-ci luttera lorsque l'embrayage se ferme et que l'inertie de la butée virtuelle s'additionne. À l'inverse, si le PID est réglé avec l'inertie du moteur et de la butée, il deviendrait trop « nerveux » lorsque l'embrayage est ouvert et aurait tendance à devenir instable. Une solution facile consisterait à régler le PID à des valeurs moyennant les deux PID précédents. Cependant, il y aurait une solution beaucoup plus facile.

Si les deux butées étaient échangées, le mécanisme fonctionnerait exactement de

la même façon. C'est-à-dire que l'assemblage précédemment utilisé en tant que butée virtuelle pourrait être utilisé comme butée réelle à la place. En échange, la petite pièce précédemment utilisée comme butée réelle pourrait servir de butée virtuelle. De cette manière, le changement d'inertie durant le passage au mode contact sera minime et par conséquent, le PID pourrait s'adapter plus facilement.

4.2.4 Autres modifications mécaniques nécessaires

La liste suivante donne des propositions de modifications à faire sur le mécanisme qui sont très simples et amélioreraient grandement le fonctionnement de celui-ci.

1. Les câbles électriques reliant les amplificateurs aux moteurs sont beaucoup trop longs. Ceci a pour effet d'engendrer du bruit dans les signaux des encodeurs. Ces signaux sont naturellement essentiels au bon fonctionnement de l'interface. La solution est évidemment de positionner les amplificateurs plus près des enrouleurs pour ainsi diminuer la longueur des câbles.
2. L'assemblage utilisé comme butée virtuelle dans le prototype actuel est composé de cinq pièces assemblées avec des vis. Étant donné la fonction de cette pièce, il est important de vérifier périodiquement chacune de ces vis pour s'assurer qu'elle est bien en place puisqu'elles se dévissent couramment. Il serait donc suggéré de fabriquer cette pièce d'un seul bloc de métal pour ainsi ne plus avoir aucune vis et éviter complètement ce problème.
3. La petite vis qui tient la butée réelle sur l'arbre se dévisse constamment en raison des nombreux impacts. Elle devrait être remplacée par une clavette pour éviter sa rotation et deux anneaux de rétention pour empêcher le mouvement axial sur l'arbre.
4. Afin de bien diriger le câble dans la bobine, il faut placer un guide. La tâche primaire de ce guide est d'empêcher le câble de débarquer de la bobine. Aussi, il sert en tant que point de rotation pour le câble afin de diriger celui-ci directement vers son point d'attache sur l'effecteur. Présentement, un boulon à oeillet⁶ est utilisé à cet effet. Malgré le fait que cette pièce fonctionne relativement bien, le montage bénéficierait davantage si la friction était diminuée à cet endroit.

⁶Traduction libre de « eyebolt ».

C'est pour cette raison qu'il est proposé d'utiliser un guide à câble qui utilise des rouleaux agencés comme montré à la fig.4.7 (de façon simplifiée) pour remplacer les boulons à oeillet et ainsi diminuer la friction.

5. Acier ou aluminium ? Le premier enrouleur fabriqué avait des pièces en acier pour s'assurer que le montage résiste bien aux impacts. Ensuite, lorsque les deux autres enrouleurs ont été fabriqués, l'aluminium a été choisi puisqu'il a été déterminé que ce métal offrirait une résistance suffisante. Maintenant qu'il y a deux enrouleurs fabriqués avec ces deux métaux, il a été possible de les comparer et il a été déterminé qu'il n'y avait aucun avantage clair à utiliser un métal aux dépens de l'autre. Les pièces en acier ont commencé à rouiller lorsque l'été a entraîné une augmentation d'humidité dans l'air, mais ceci aurait pu être prévenu en peignant ces pièces juste après leur fabrication. Aussi, l'inertie des pièces rotatives en acier n'était pas beaucoup plus grande que leurs contreparties en aluminium. Il a été observé que le problème des vis qui se dévissaient sous les chocs des impacts était plus présent dans les enrouleurs en aluminium. Cependant, il est fort probable que ces problèmes pourront être rectifiés en suivant les suggestions qui ont déjà été fournies à cet effet.
6. Le diamètre des rebords de la bobine devrait être augmenté pour empêcher que le câble passe par dessus ceux-ci pour ainsi s'enrouler autour de l'arbre. Bien que cela est un évènement anormale, il peut se produire facilement lors d'un impact en raison du fait que le contrôleur de tension des câbles éprouve souvent de la difficulté à garder le câble tendu. Des rebords plus grand sur la bobine pourrait donc aidé à garder le câble à sa place lors de ces périodes difficiles.

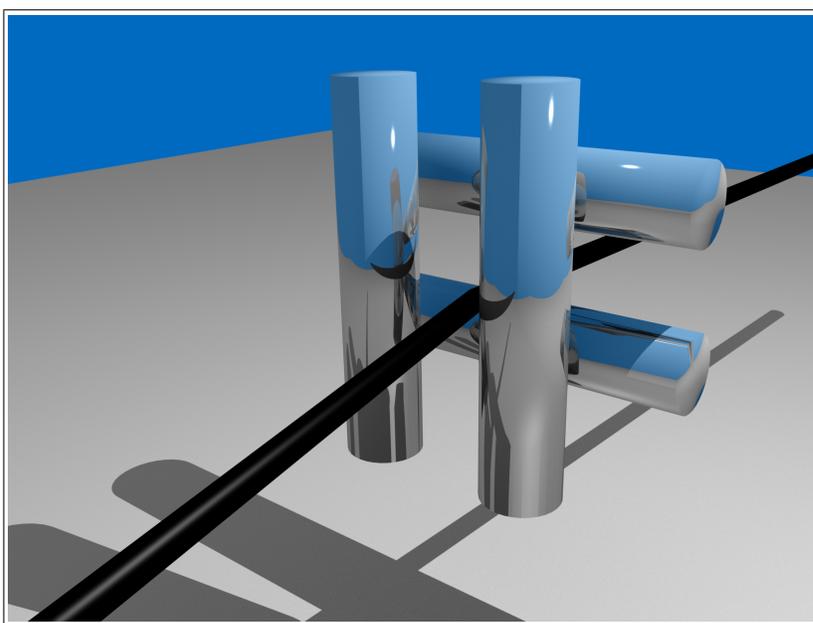


FIG. 4.7: Guide à câble à rouleaux

Conclusion

Le travail qui a été présenté dans ce texte visait à approfondir les recherches dans le domaine de l'haptique. Plus particulièrement, le but était d'adapter un mécanisme à câbles afin de l'utiliser en tant que simulateur de combat d'épée. Pour ce faire, il fallait trouver un moyen pour faire en sorte que le mécanisme à câbles, reconnu pour sa faible rigidité, soit en mesure de générer des contacts qui soient à la fois brusques et rigides.

La première étape du projet a consisté à explorer le sens du toucher de l'être humain dans le but de mieux comprendre comment bien réaliser un rendu haptique. Ces recherches ont été présentées dans le premier chapitre de ce mémoire. Ensuite, il a été jugé pertinent de présenter une revue des divers types de robots et de revoir quelques exemples d'interfaces haptiques. Dans le chapitre suivant, il a été démontré comment des expériences avec des enrouleurs de mécanismes simples ont influencé le design du prototype présenté dans ce même chapitre.

Le prototype d'interface haptique réussit à produire des impacts en provoquant la collision de deux pièces métalliques dans les enrouleurs. Ces enrouleurs sont composés de deux moteurs et ils utilisent deux embrayages pour gérer les pièces métalliques. Le fonctionnement de ces embrayages est aussi détaillé dans ce deuxième chapitre.

Au troisième chapitre, la commande du simulateur d'épée est détaillée. Dans ce chapitre, on explique comment les enrouleurs gardent la tension dans les câbles et

comment la gestion des contacts avec l'épée virtuelle adverse est effectuée. L'approche utilisée est sans aucun doute très innovatrice et pourrait être appliquée à divers types d'interfaces haptiques. Cette méthode se résume à être proactif plutôt que réactif dans la gestion des contacts avec des corps virtuels.

Pour vérifier le réalisme des contacts réalisés par l'interface, un banc d'essai a été mis au point. Il est présenté dans le dernier chapitre. L'approche utilisée pour vérifier les contacts était de comparer les fréquences de vibration des contacts avec les fréquences de vibrations de l'acier. Bien qu'il y ait une bonne différence entre les vibrations générées par le mécanisme et celles que l'on pourrait mesurer sur une épée d'acier, il a été conclu que les vibrations mesurées étaient tout de même semblables à celles que l'on pourrait mesurer sur un matériau rigide similaire à l'acrylique, mais il faudrait faire d'autres expériences pour en être certain.

À la fin de ce mémoire, une liste de points d'amélioration a été dressée pour améliorer le fonctionnement des enrouleurs. Cette liste devrait certainement être consultée par toute personne qui aimerait continuer ce projet pour l'amener plus loin.

Bien qu'au bout du compte, le simulateur d'épée construit était très simple, sa conception a permis d'établir un plan pour un mécanisme plus évolué qui serait en mesure de fournir une simulation plus complète. Un prototype amélioré par les modifications prescrites serait en mesure de produire des impacts plus crédibles de façon cohérente et aurait un espace de pose polyvalente plus grand grâce à une architecture de câbles plus complexe comme celle présentée à la fin du troisième chapitre. L'auteur de ce mémoire est très satisfait du travail qu'il a accompli au courant de sa maîtrise et il est confiant d'avoir contribué à avancer les recherches dans le domaine de l'haptique.

Bibliographie

- [1] S. Behzadipour and A. Khajepour. Stiffness of cable-based parallel manipulators with application to stability analysis. *Journal of Mechanical Design*, 128 :303, 2006.
- [2] G. Billette and C. Gosselin. Producing Rigid Contacts in Cable-Driven Haptic Interfaces Using Impact Generating Reels. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings.*, pages 307–312, Kobe, Japon, May 2009.
- [3] D.G. Caldwell, A. Wardle, and M. Goodwin. Tele-presence : visual, audio and tactile feedback and control of atwin armed mobile robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings.*, pages 244–249, San Diego, CA, USA, 1994.
- [4] Newton Game Dynamics. <http://newtondynamics.com/forum/newton.php>, Septembre 2009.
- [5] Open Dynamics Engine. <http://www.ode.org/>, Septembre 2009.
- [6] E.P. Gardner and J.H. Martin. Coding of sensory information. *Principles of neural science*, pages 411–429, 2000.
- [7] M. Gouttefarde. *Analyse de l'espace des poses polyvalentes des mécanismes parallèles entraînés par câbles*. Thèse de doctorat, Université Laval, 2005.
- [8] Immersion. <http://www.immersion.com>, Juin 2009.
- [9] S. Ino, S. Shimizu, T. Odagawa, M. Sato, M. Takahashi, T. Izumi, and T. Ifukube. A tactile display for presenting quality of materials by changing the temperature

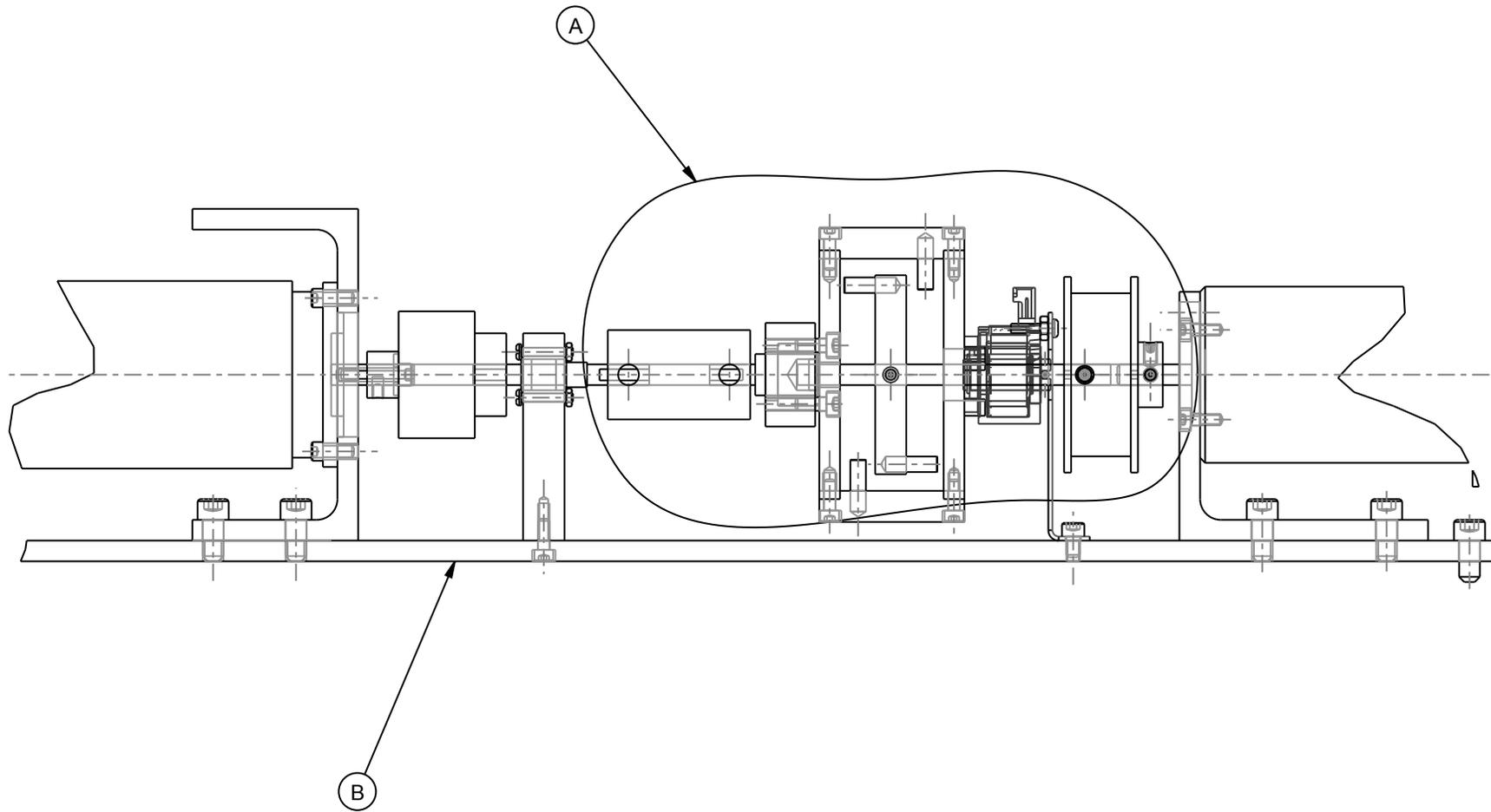
- of skin surface. In *2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. Proceedings.*, pages 220–224, Tokyo, Japon, Nov. 1993.
- [10] L. A. Jones and M. Berris. Material discrimination and thermal perception. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. Proceedings. 11th Symposium on*, pages 171–178, Vancouver, BC, Canada, Mars 2003.
- [11] L.A. Jones. Perception of force and weight : Theory and research. *Psychological Bulletin*, 100(1) :29–42, 1986.
- [12] S. Kawamura and K. Ito. A new type of master robot for teleoperation using a radial wire drive system. *Comptes rendus-IEEE*. In *RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 55–60, 1993.
- [13] S. Kim, S. Hasegawa, Y. Koike, and M. Sato. Tension based 7-dof force feedback device : Spidar-g. In *Virtual Reality. Proceedings. IEEE*, pages 283–284, Orlando, FL, USA, Mars 2002.
- [14] R.L. Klatzky, S.J. Lederman, and C. Reed. Haptic integration of object properties : Texture, hardness, and planar contour. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 15(1) :45–47, 1989.
- [15] V. Levesque, J. Pasquero, and V. Hayward. Braille display by lateral skin deformation with the stress2 tactile transducer. In *EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems. World Haptics. Second Joint*, pages 115–120, Tsukuba, Japon, Mars 2007.
- [16] R. Lindemann and D. Tesar. Construction and demonstration of a 9-string 6-dof force reflecting joystick for telerobotics. In *NASA International Conference on Space Telerobotics*, volume 4, pages 55–63, 1989.
- [17] H. Liu and C. Gosselin. A planar closed-loop cable-driven parallel mechanism. In *Proc. CCToMM M³ Symposium*, 2009.
- [18] J.P. Merlet. *Parallel Robots*. Springer, Kluwer, Dordrecht, deuxième edition, 2006.
- [19] Novint. <http://home.novint.com>, Juin 2009.
- [20] A.M. Okamura and J.T. Dennerlein. Vibration feedback models for virtual environments. In *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, volume 3, pages 674–679, Louvain, Belgique, May 1998.
- [21] S. Perreault and C.M. Gosselin. Cable-driven parallel mechanisms : Application to a locomotion interface. *Journal of Mechanical Design*, 130 :102301, 2008.
- [22] SensAble Technologies. <http://www.sensable.com>, Juin 2009.

- [23] Shinobu Toma and Yoshio Nakajima. Response characteristics of cutaneous mechanoreceptors to vibratory stimuli in human glabrous skin. *Neuroscience Letters*, 195 :61–63, 1995.
- [24] Q. Wang and V. Hayward. Compact, portable, modular, high-performance, distributed tactile transducer device based on lateral skin deformation. In *Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, 14th Symposium on*, pages 67–72, Zurich, Suisse, Mars 2006.
- [25] E. H. Weber. The sense of touch. (H. E. Ross, Ed. and Trans.; Original work published 1834), 1978.
- [26] P. Wellman and RD Howe. Towards realistic vibrotactile display in virtual environments. In *Proceeding of the ASME Dynamics Sys. and Control Division, Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Sys., Alberts T. ed*, pages 57–2, 1995.
- [27] G. Westling and R.S. Johanson. Responses in glabrous skin mechanoreceptors during precision grip in humans. *Experimental Brain Research*, 66(1) :128–140, 1987.
- [28] R. L. Williams II, V. Chadaram, and F. Giacometti. Three-cable haptic interface. In *ASME IDETC/CIE '06*, Athens, Ohio, USA, Sept. 2006.
- [29] R. L. Williams II and P. Gallina. Planar Cable-Direct-Driven Robots : Design for Wrench Exertion. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 35(2) :203–219, 2002.

Annexe A

Les plans de fabrications des enrouleurs

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR
A		MECANISME D'IMPACTE	1	IMPACT A
B		BASE	1	IMPACT B

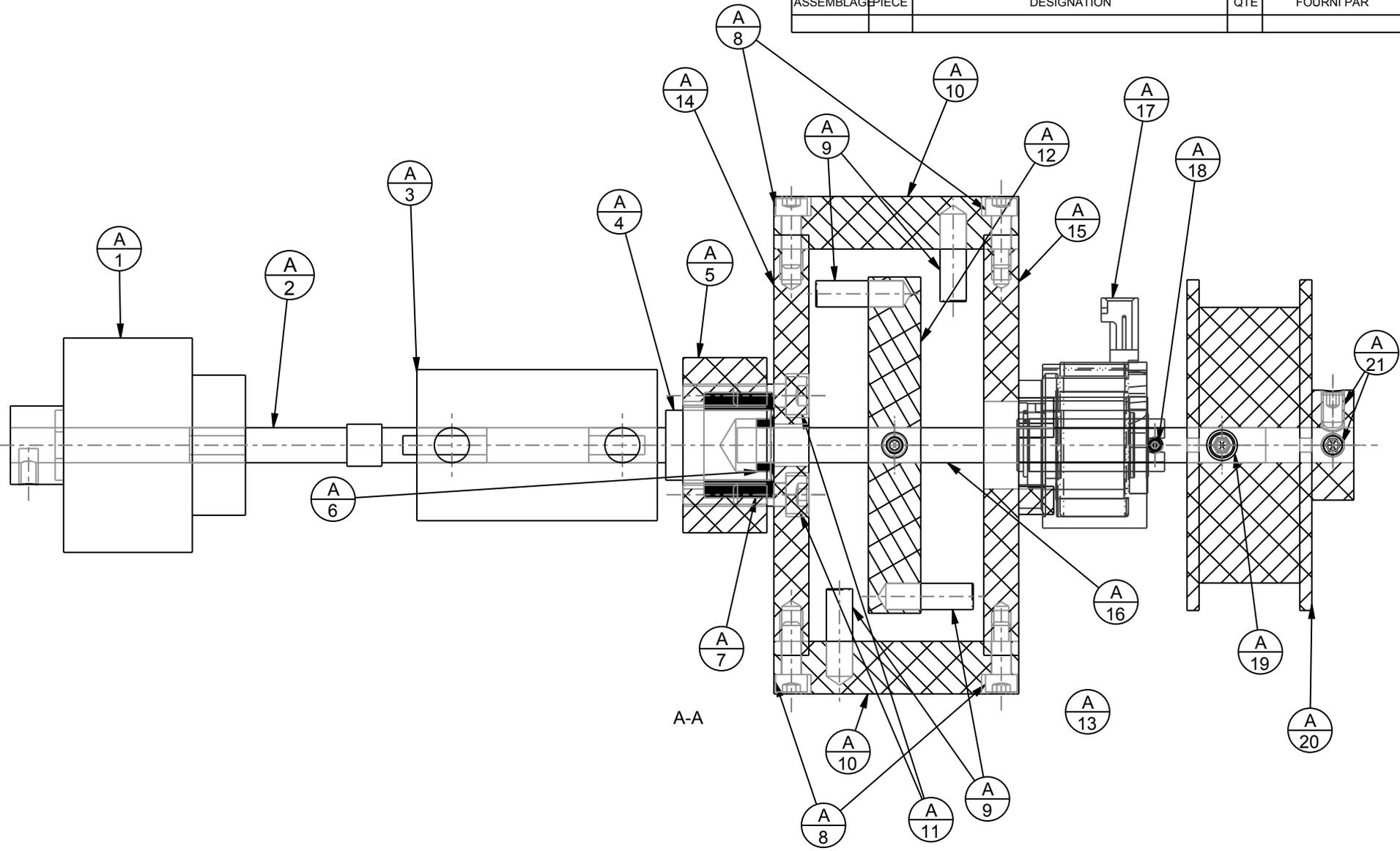


ORIGINAL MODIFICATIONS C B A	DÉSSINÉ PAR : G. BILLETTE	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:2	PIÈCE NO.: A	RÉVISION : A	QUANTITÉ : 2	
	VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU :			
	LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302			TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. : X.XX □ ±0.01 X.XXX □ ±0.005 X.XXXX □ ±0.0010		NOTE :		
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. : X □ ±0.5 ° X.X □ ±0.2 ° X.XX □ ±0.1 °		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE PIÈCE : IMPACT_ASS DESSIN D'ENSEMBLE MECANISME D'IMPACTE DESSIN NO.: DESSIN_ENSEMBLE		

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ (PAR ASSEMBLAGE)	FOURNI PAR
A	1	EMBRAYAGE ELECTROMAGNETIQUE	1	SDP/SI
A	2	ARBRE INTERMEDIAIRE	1	IMPACT_A1
A	3	SPIDER COUPLING	1	MCMaster-CARR
A	4	ARBRE D'EXTENSION	1	IMPACT_A2
A	5	ANNEAU DE SERRAGE	1	IMPACT_A3
A	6	ROULEMENT A BILLES ID:1/4 OD:3/8	1	SDP/SI
A	7	EMBRAYAGE A ROULEMENT RC081208	1	SDP/SI
A	8	VIS CHc UNC6-32 L: 3/8	4	ATELIER
A	9	DOWEL PIN Ø 3/16 X 5/8	4	ATELIER
A	10	MARTEAU 2	2	IMPACT_A4
A	11	VIS CHc UNC8-32 L: 3/8	4	ATELIER
A	12	ENCLUME	1	IMPACT_A5
A	13	VIS CHc UNC4-40 L: 1/4	1	ATELIER
A	14	MARTEAU 1	1	IMPACT_A6
A	15	MARTEAU 3	1	IMPACT_A7
A	16	ARBRE POUR ENCLUME	1	IMPACT_A8
A	17	EMBRAYAGE REEL EC-25	1	REEL
A	18	VIS DE SERRAGE UNC2-56 L: 1/4	2	ATELIER
A	19	VIS CHc UNC4-40 L: 1.0	1	ATELIER
A	20	BOBINE	1	IMPACT_A9
A	21	VIS DE SERRAGE UNC8-32 L: 1/4	2	ATELIER
B	1	MOTEUR DC NEMA 23	1	LAB. ROBOT.
B	2	MOTEUR PITTMAN	1	LAB. ROBOT.
B	3	BASE	1	IMPACT_B1
B	4	SUPPORT POUR MOTEUR NEMA 23	1	IMPACT_B2
B	5	SUPPORT INTERMEDIAIRE	1	IMPACT_B3
B	6	SUPPORT CLUTCH	1	IMPACT_B4
B	7	VIS CHc UNC1/4-20 L: 1/2	12	MCMaster-CARR
B	8	VIS CHc UNC6-32 L: 3/8	10	MCMaster-CARR
B	9	SUPPORT MOTEUR PITTMAN	1	IMPACT_B5
B	10	ROULEMENT A BILLES ID:1/4 OD:3/8	2	SDP/SI
B	11	ECROU UNC3-48	2	ATELIER
B	12	VIS A METAUX A TETE FENDU UNC3-48 L:5/8	2	ATELIER
B	13	VIS CHc UNC8-32 L: 3/4	1	ATELIER
B	14	VIS A METAUX A TETE FENDU UNC4-40 L: 1/2	1	ATELIER
B	15	ECROU UNC4-40	1	ATELIER
B	16	VIS CHc UNC8-32 L: 1/4	1	ATELIER

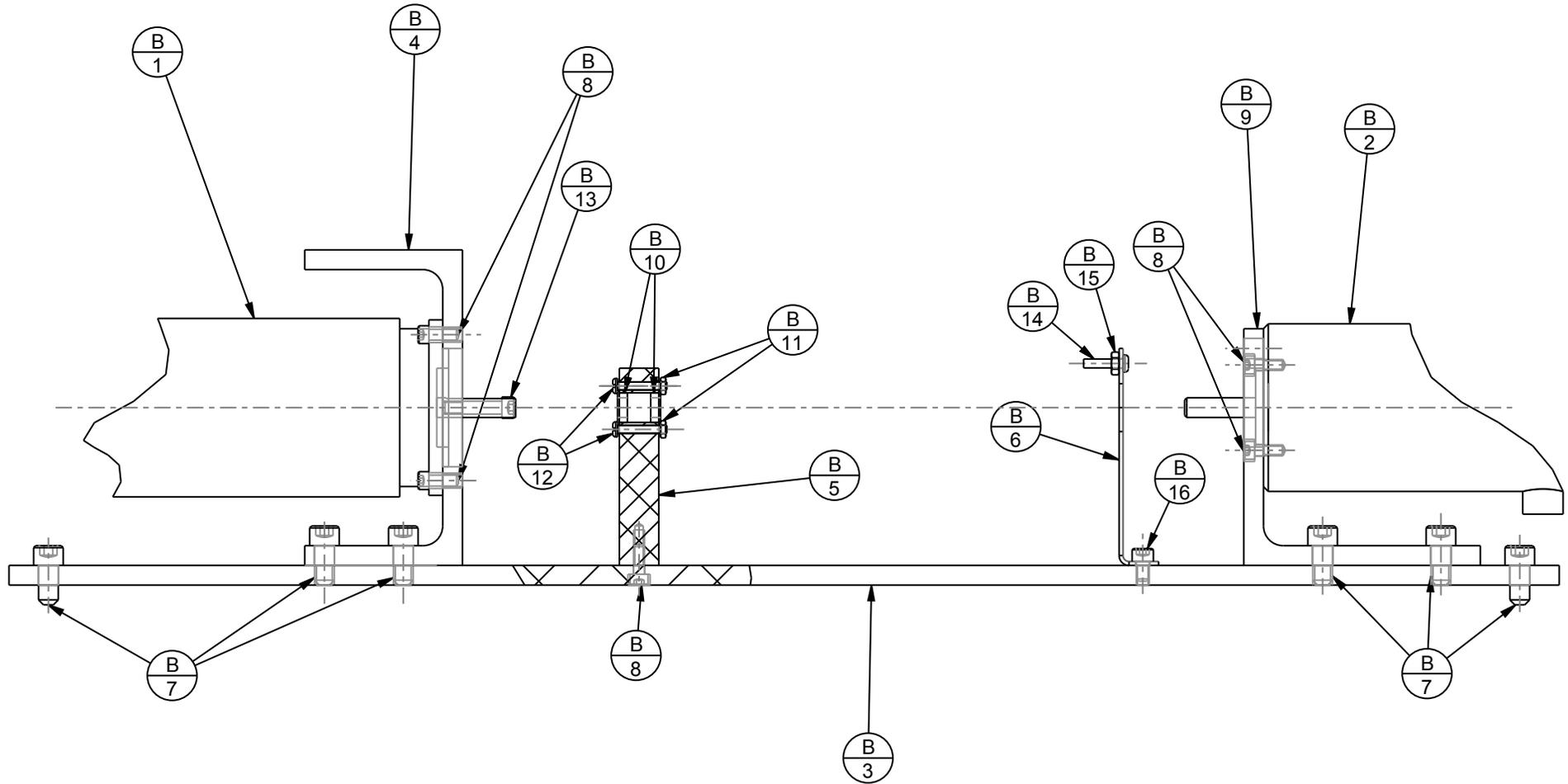
C B A	REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.:	RÉVISION : A	QUANTITÉ :	
				G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU :			
				VÉRIFIÉ PAR :	DATE :			NOTE :			
				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302				TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE	
X.XX □ ±0.01		PIÈCE : IMPACT_ASS_A									
X.XXX □ ±0.005											
		X.XXXX □ ±0.0010		TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		DESSIN NO.:					
				X □ ±0.5°							
				X.X □ ±0.2°							
				X.XX □ ±0.1°							

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



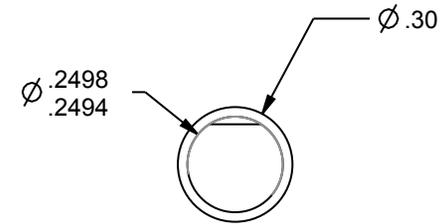
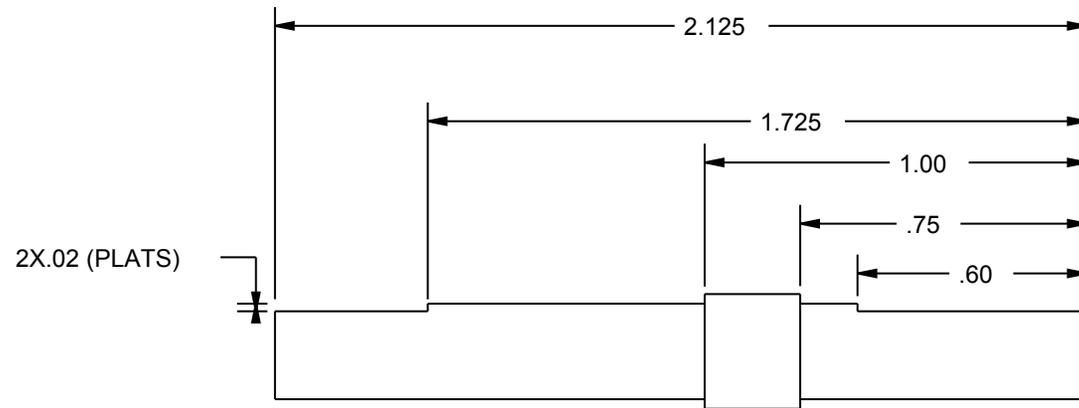
C B A	REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO. : A	RÉVISION : A	QUANTITÉ : 1	
				G.BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU :			
				VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :			
				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302				X.XX □ ±0.01 X.XXX □ ±0.005 X.XXXX □ ±0.0010		X □ ±0.5° X.X □ ±0.2° X.XX □ ±0.1°	
PROJET : SIMULATEUR D'EPEE PIÈCE : IMPACT_ASS MECANISME D'IMPACTE								DESSIN NO. : IMPACT_A			

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



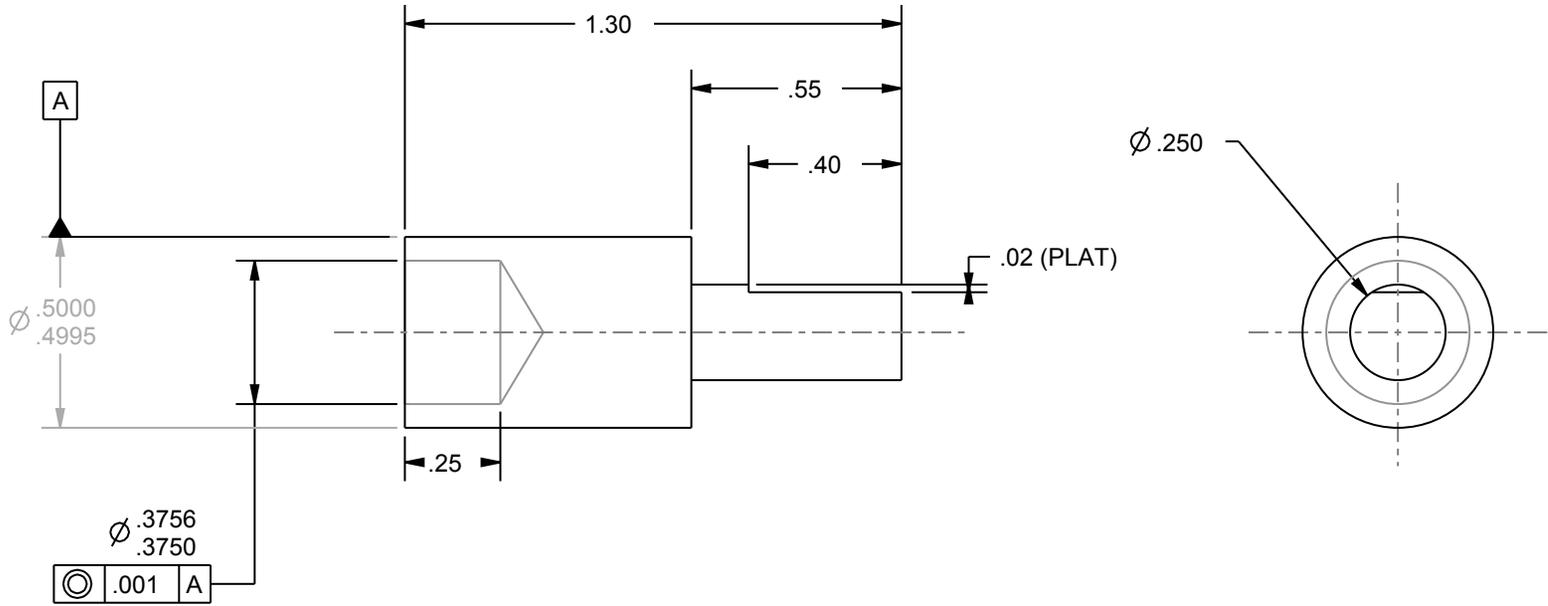
C B A	REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:2	PIÈCE NO.: B	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)	
				G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU :			
				VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :			
				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302				X <input type="checkbox"/> ±0.01 X.XX <input type="checkbox"/> ±0.005 X.XXX <input type="checkbox"/> ±0.0010 X.XXX <input type="checkbox"/> ±0.0010		PROJET : SIMULATEUR D'EPÉE PIÈCE : IMPACT_ASS_B	
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. : X <input type="checkbox"/> ±0.5° X.X <input type="checkbox"/> ±0.2° X.XX <input type="checkbox"/> ±0.1°		ASSEMBLAGE B					
						DESSIN NO.: ASSEMBLAGE_B					

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



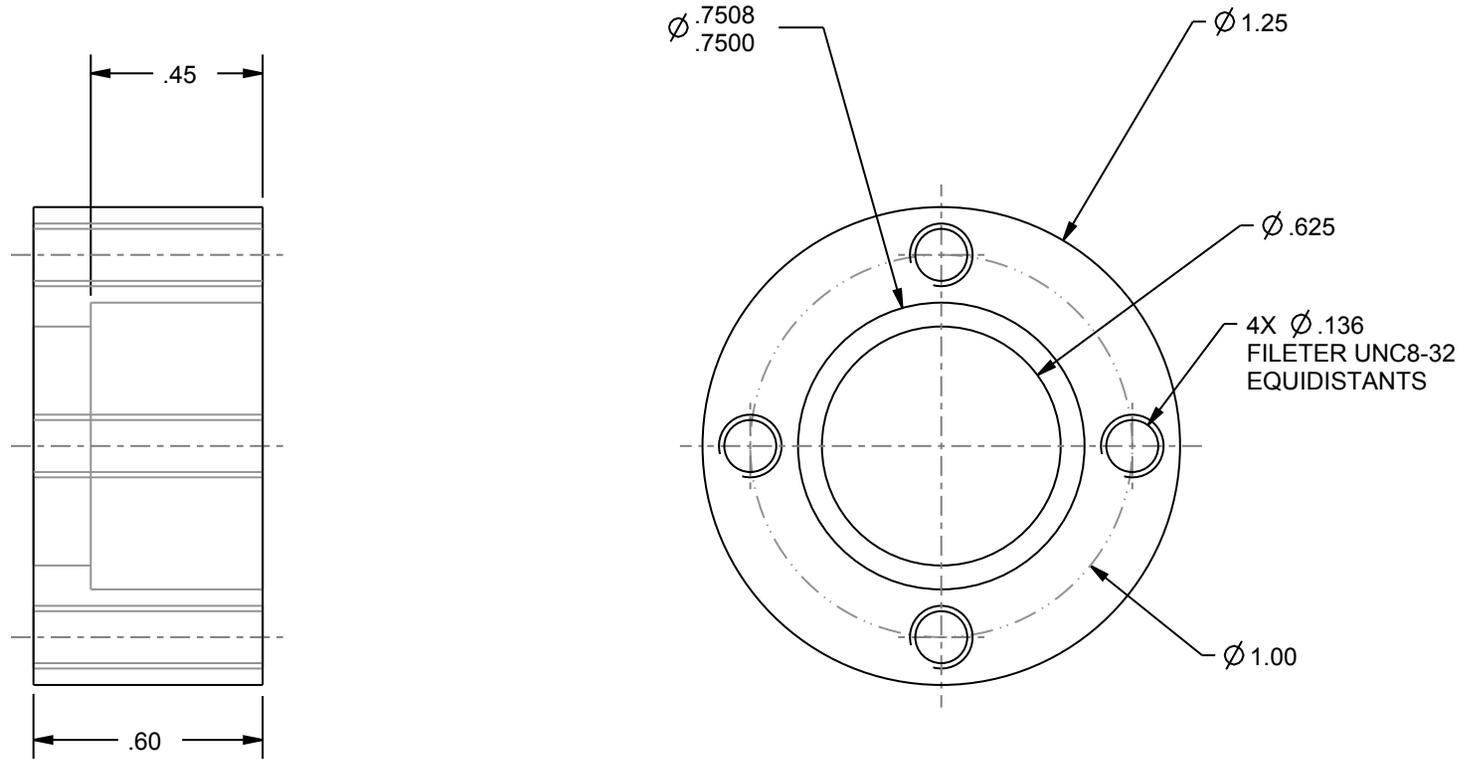
		DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 2:1	PIÈCE NO.: A1	RÉVISION : A	QUANTITÉ : 3 (TOTAL)
		G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ACIER		
		VÉRIFIÉ PAR :	DATE :			NOTE :		
		LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
				X.XX □ ±0.01 X.XXX □ ±0.005 X.XXXX □ ±0.0010		PIÈCE : ARBRE_INTERMEDIAIRE		
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		ARBRE INTERMEDIAIRE		
				X □ ±0.5 ° X.X □ ±0.2 ° X.XX □ ±0.1 °				
C	B	A	REV	DATE	MODIFICATIONS	DESSIN NO.: IMPACT_A1		

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 2:1	PIÈCE NO. : A2	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)		
			G. BILLETTE								
			VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ACIER				
			LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302			TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :			
						X.XX □ ±0.01		X.XXX □ ±0.005		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE	
						X.XXXX □ ±0.0010		TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		PIÈCE : SHAFT_EXTENDER	
							EXTENSION D'ARBRE				
							DESSIN NO. : IMPACT_A2				

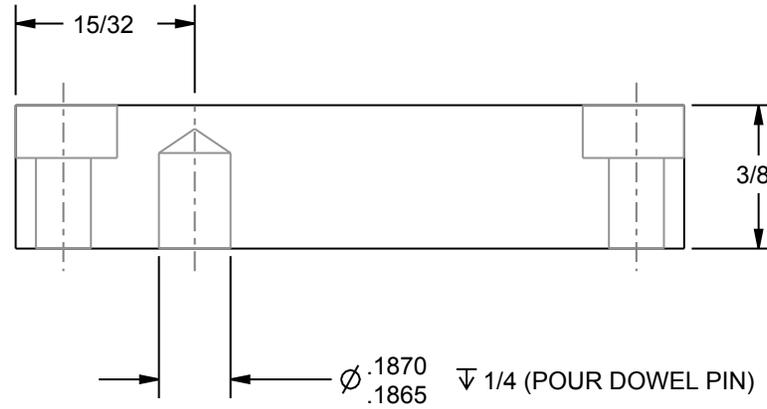
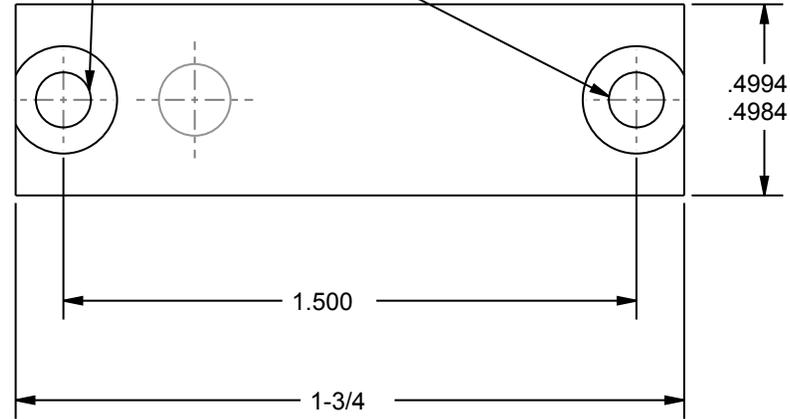
ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



C B A	REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.: A3	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)	
				G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM			
				VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :			
				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. : X □ ±0.5° X.X □ ±0.2° X.XX □ ±0.1°		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE PIÈCE : MARTEAU_CONNECTEUR ANNEAU DE SERRAGE DESSIN NO.: IMPACT_A3			

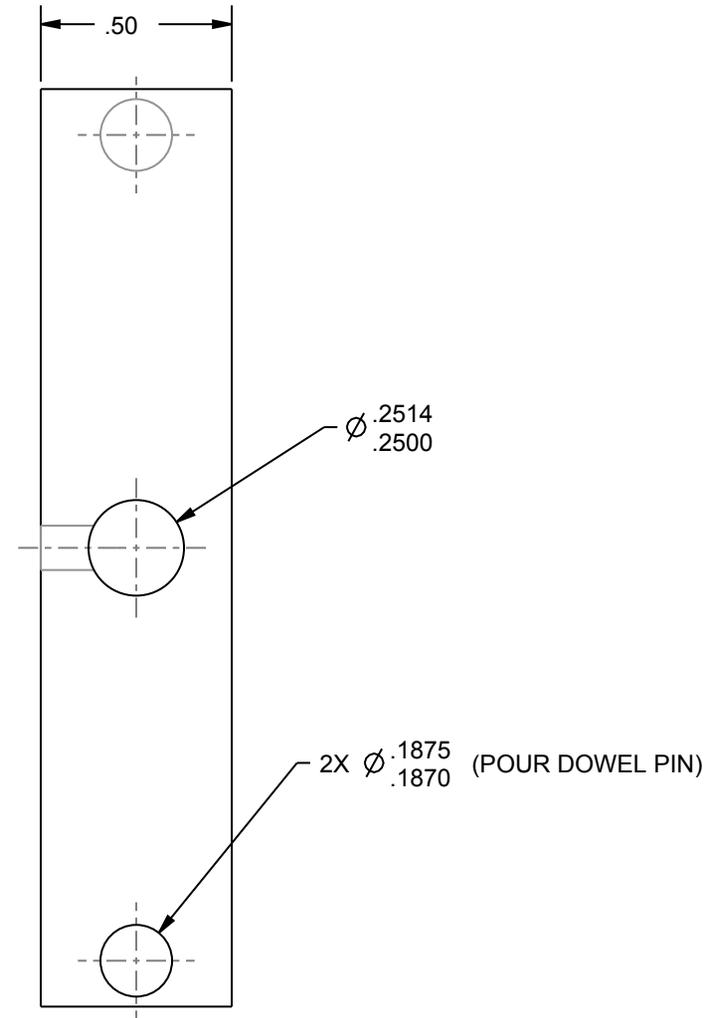
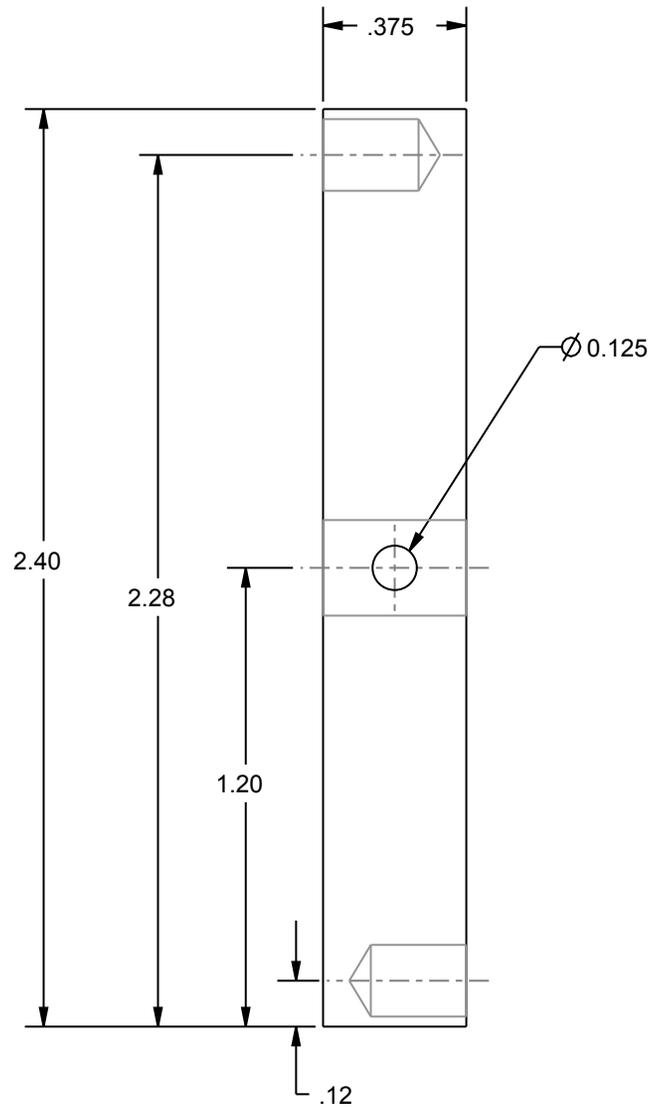
Ø 0.154 — \perp Ø 9/32 ∇ 0.138

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



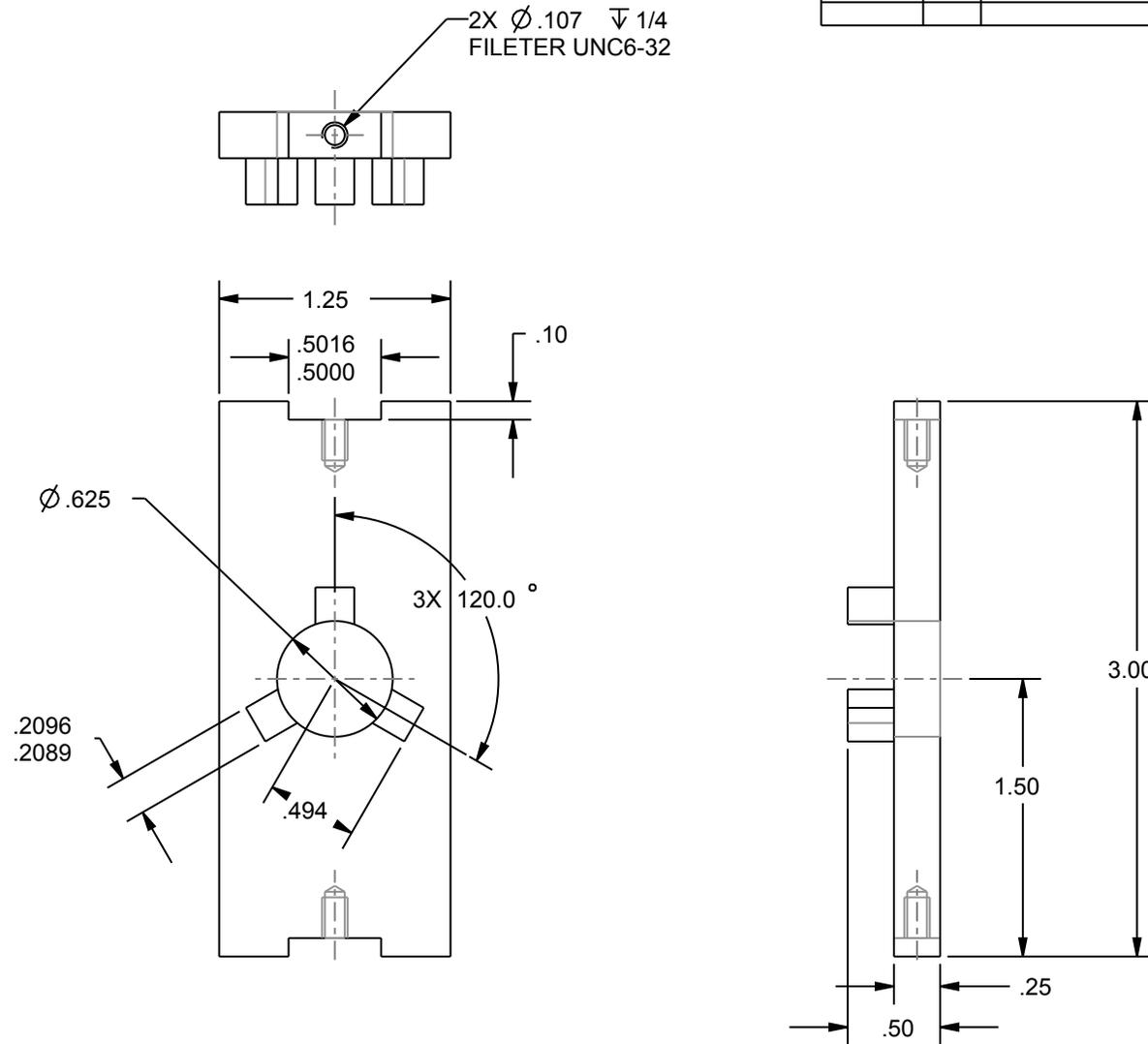
MODIFICATIONS C B A REV. DATE	DÉSSINÉ PAR : G. BILLETTE	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.: A4	RÉVISION : A	QUANTITÉ : 4(TOTAL)	
	VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM			
	LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302			TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. : X.XX □ ±0.01 X.XXX □ ±0.005 X.XXXX □ ±0.0010		NOTE :		
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. : X □ ±0.5° X.X □ ±0.2° X.XX □ ±0.1°		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE PIÈCE : MARTEAU_TOP MARTEAU 2		
					DESSIN NO.: IMPACT_A4			

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



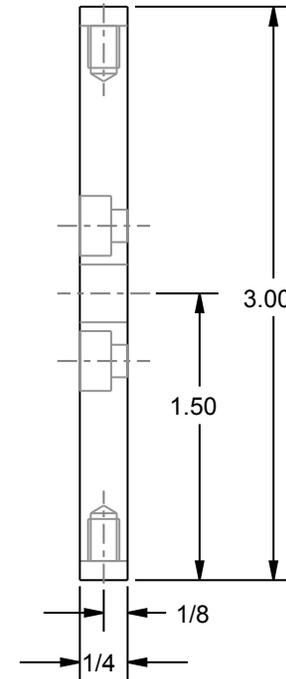
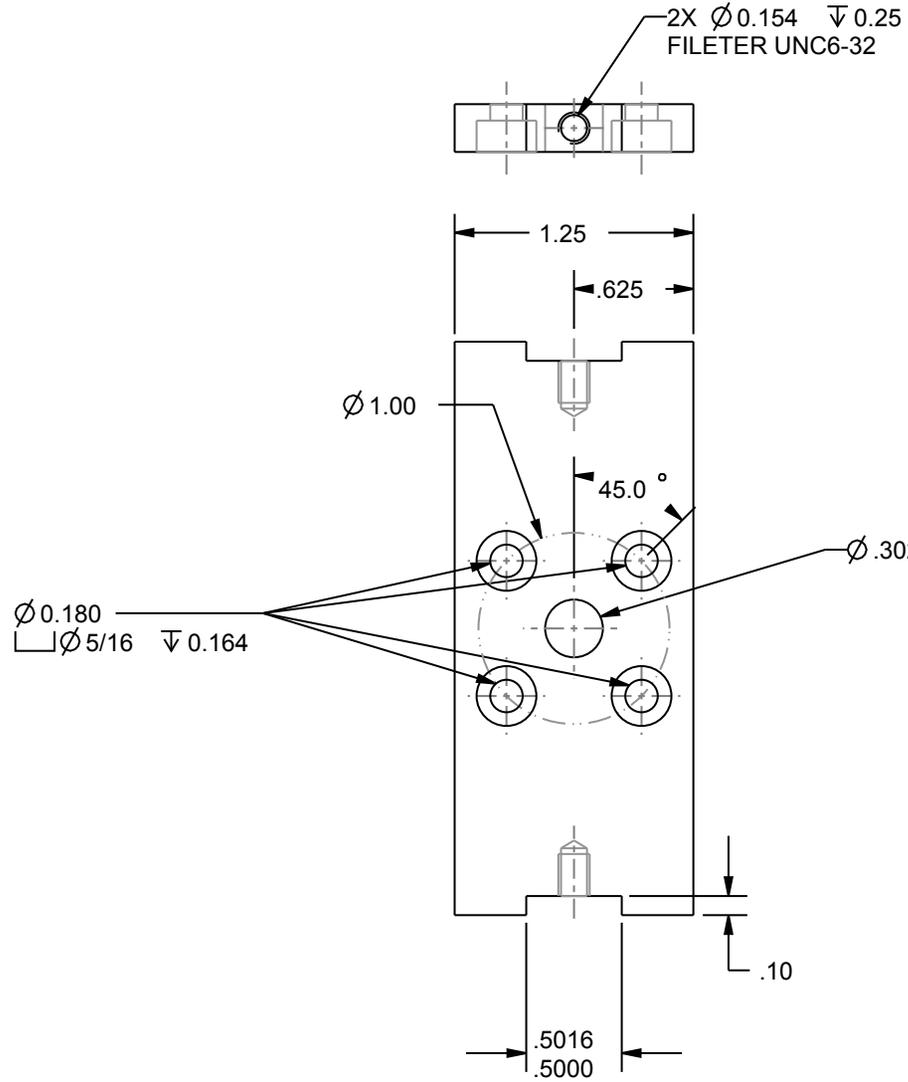
C B A	REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 2:1	PIÈCE NO.: A5	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)	
				G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM			
				VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :			
				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. : X \square $\pm 0.5^\circ$ X.X \square $\pm 0.2^\circ$ X.XX \square $\pm 0.1^\circ$		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE PIÈCE : ENCLUME ENCLUME DESSIN NO.: IMPACT_A5			

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



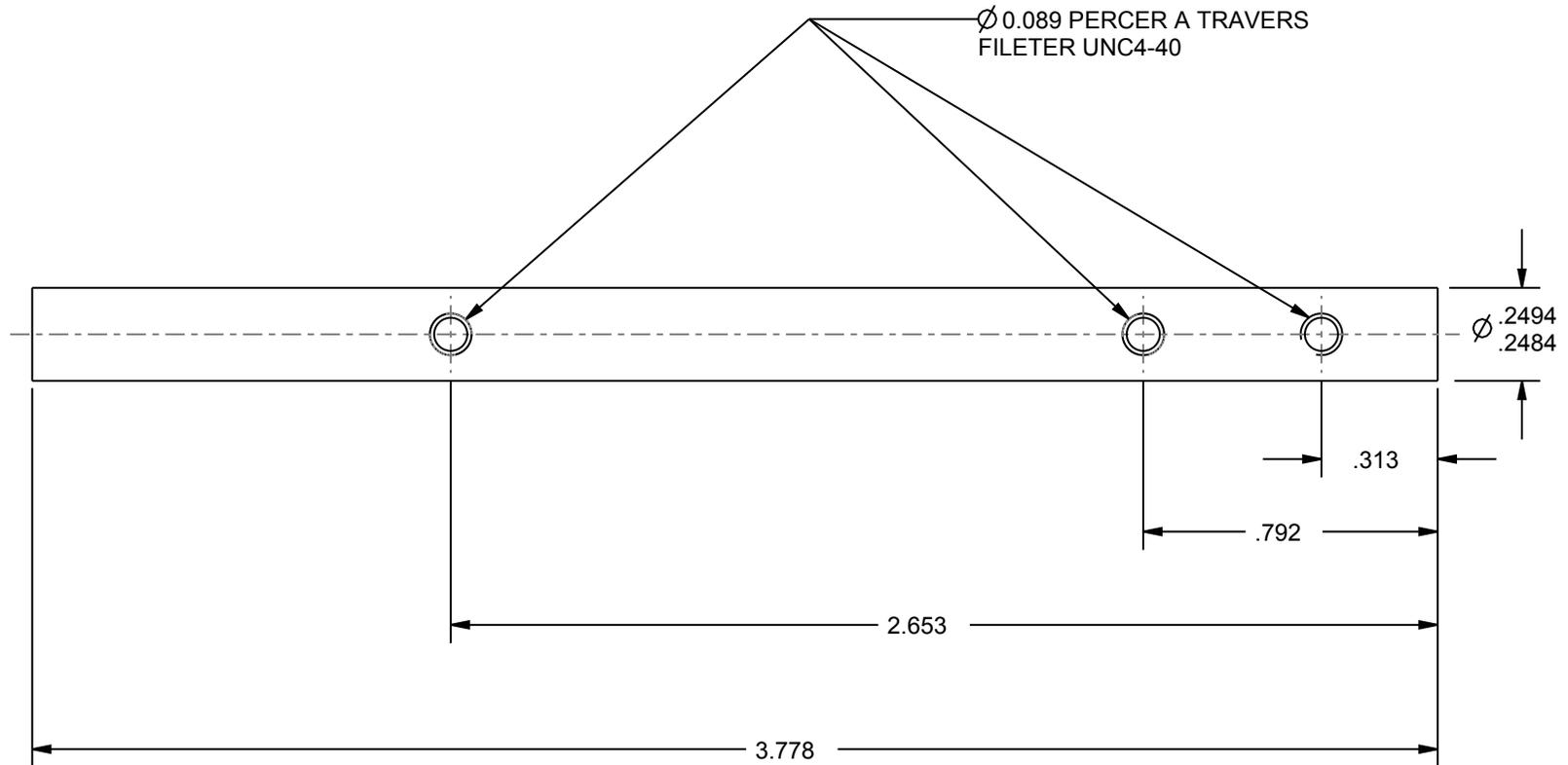
		DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.: A6	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)
		G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU :ALUMINIUM		
		VÉRIFIÉ PAR :	DATE :			NOTE :		
		LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
				X.XX □ ±0.01 X.XXX □ ±0.005 X.XXXX □ ±0.0010		PIÈCE : MARTEAU_CLUTCH		
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		MARTEAU 1		
				X □ ±0.5° X.X □ ±0.2° X.XX □ ±0.1°				
C	B	A				DESSIN NO.: IMPACT_A6		

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



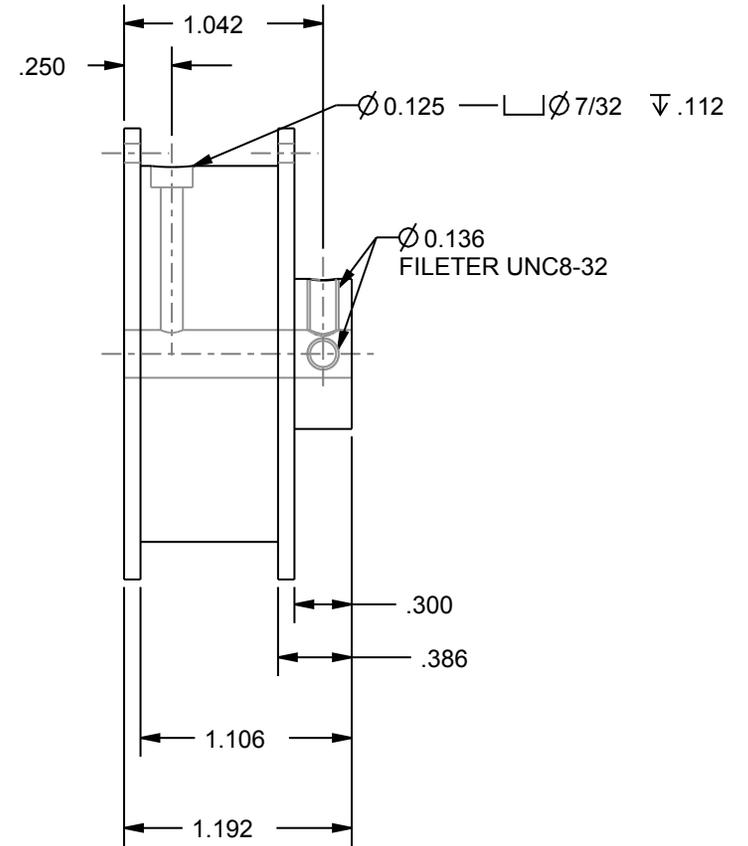
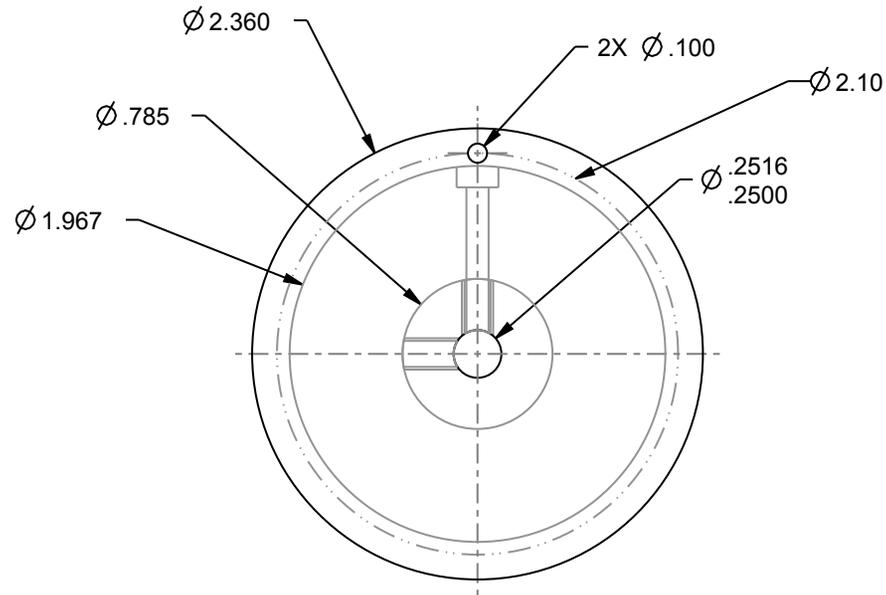
MODIFICATIONS C B A REV DATE	DÉSSINÉ PAR : G. BILLETTE	DATE :	UNITÉS : POUCES ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.: A7	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)	
	VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :	MATÉRIAU : ALUMINIUM			
	LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302			TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. : X.XX □ ±0.01 X.XXX □ ±0.005 X.XXXX □ ±0.0010	NOTE :		
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. : X □ ±0.5 ° X.X □ ±0.2 ° X.XX □ ±0.1 °	PROJET : SIMULATEUR D'EPEE PIÈCE : MARTEAU_ARBRE MARTEAU 3		
				DESSIN NO.: IMPACT_A7			

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



		DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 2:1	PIÈCE NO.: A8	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)
		G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : BARRE D'ACIER 1/4		
		VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :		
				X.XX □ ±0.01		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
				X.XXX □ ±0.005		PIÈCE : ENCLUME_SHAFT		
				X.XXXX □ ±0.0010		ARBRE POUR ENCLUME		
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		DESSIN NO.: IMPACT_A8		
				X □ ±0.5°				
				X.X □ ±0.2°				
				X.XX □ ±0.1°				
C				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302				
B								
A								
REV	DATE	MODIFICATIONS						

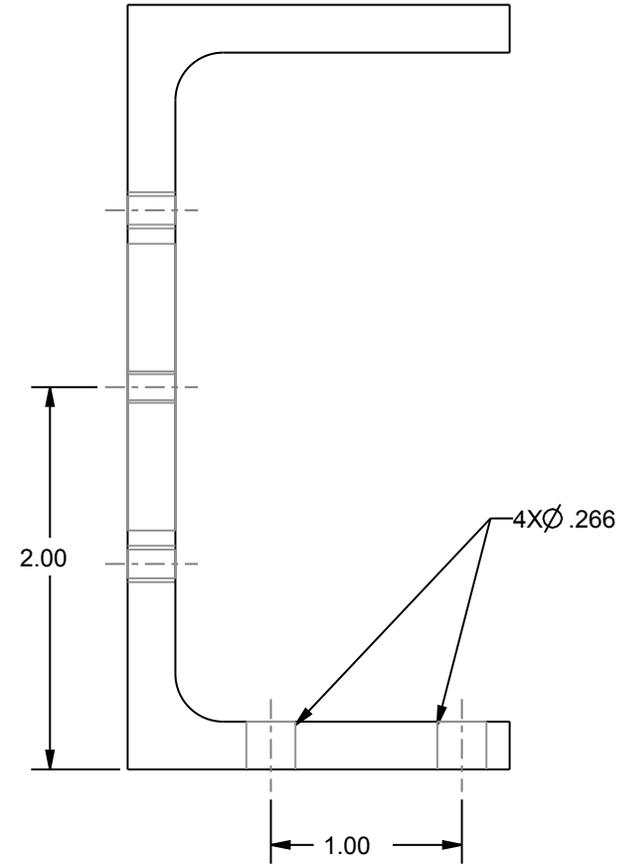
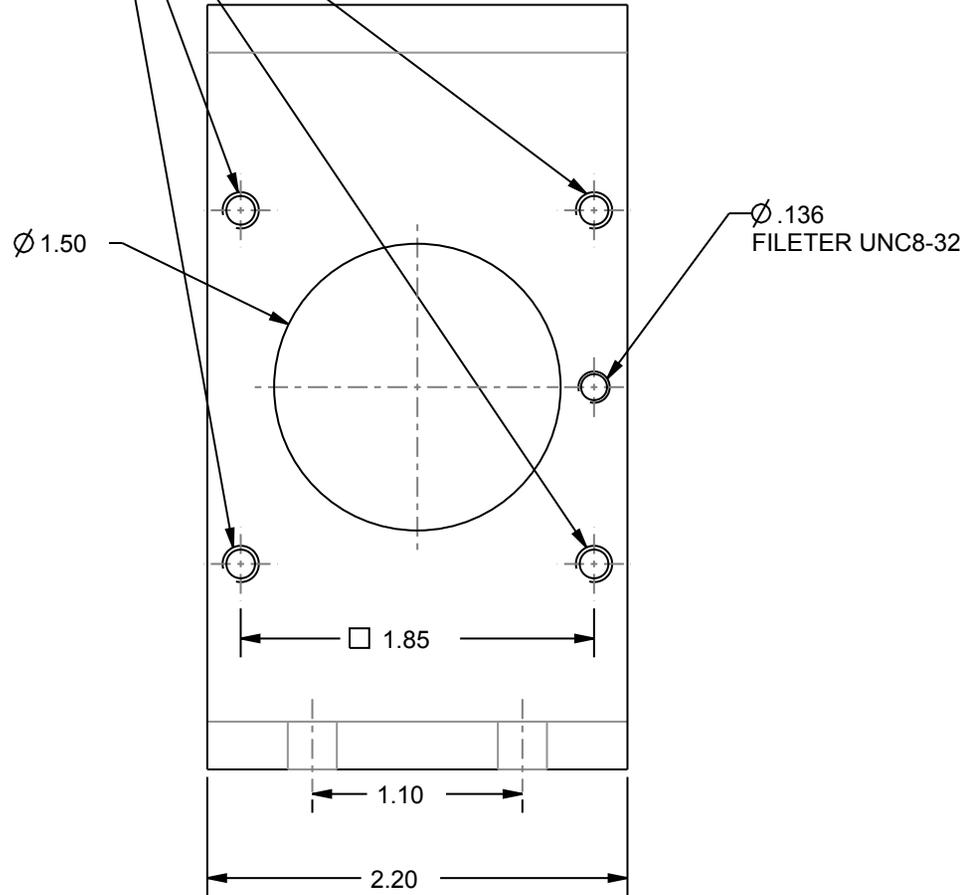
ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO. : A9	RÉVISION : A	QUANTITÉ : 2(TOTAL)
			G. BILLETTE						
			VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM		
			LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :		
					X.XX ± 0.01		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
					X.XXX ± 0.005		PIÈCE : BOBINEV5		
					X.XXXX ± 0.0010		BOBINE		
					TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		DESSIN NO. : IMPACT_A9		
					X $\pm 0.5^\circ$				
					X.X $\pm 0.2^\circ$				
					X.XX $\pm 0.1^\circ$				

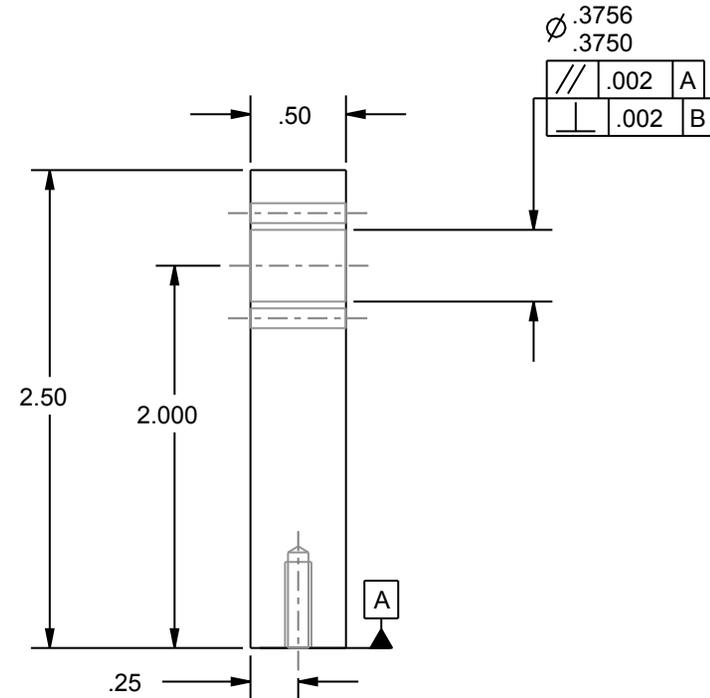
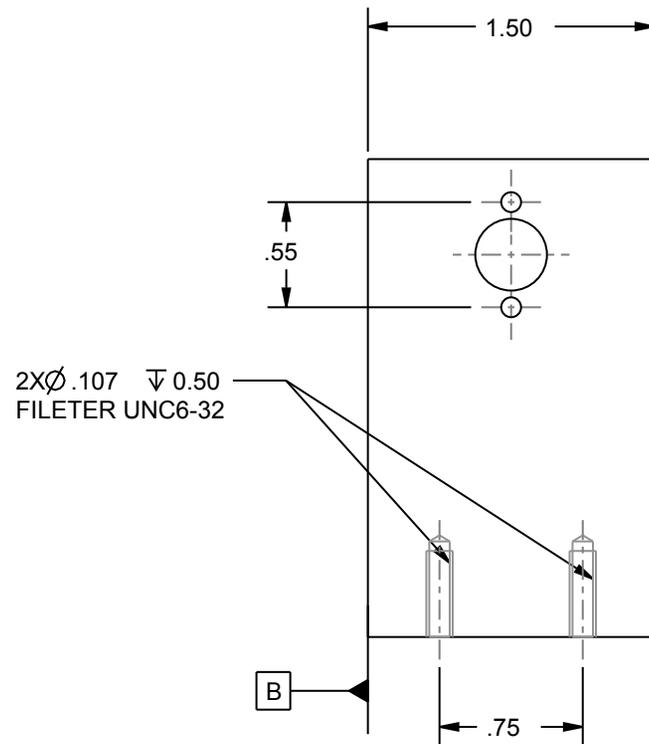
ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR

4X Ø0.150
FILETER UNC10-24



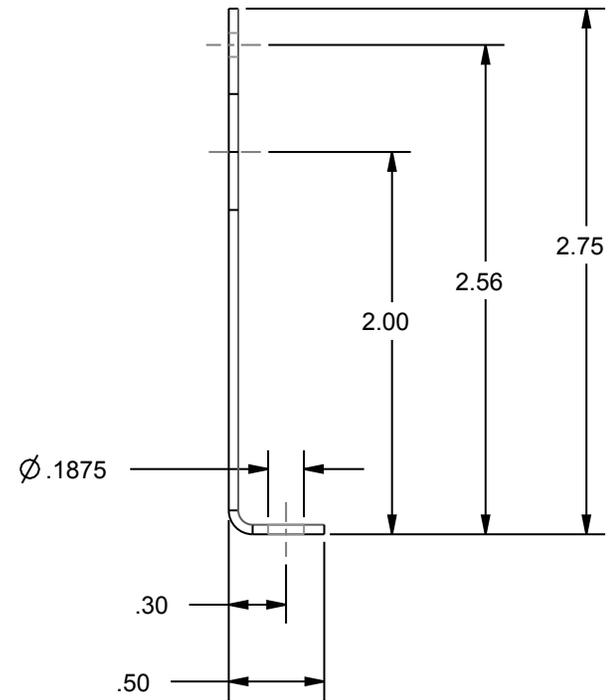
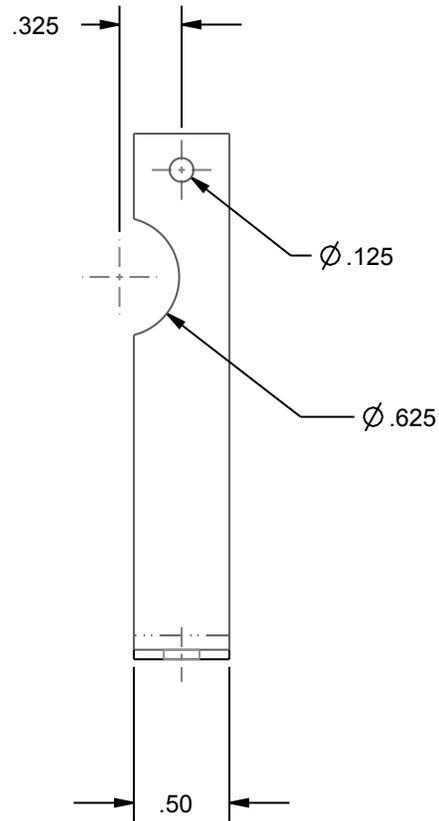
		DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.: B2	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)
		G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM, EXTRUSION EN "C" 4X2		
		VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :		
				X.XX ±0.01		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
				X.XXX ±0.005		PIÈCE : SUPPORT_NEMA23		
				X.XXXX ±0.0010		SUPPORT POUR MOTEUR NEMA 23		
				TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		DESSIN NO.: IMPACT_B2		
				X ° ±0.5				
				X.X ° ±0.2				
				X.XX ° ±0.1				
				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302				

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



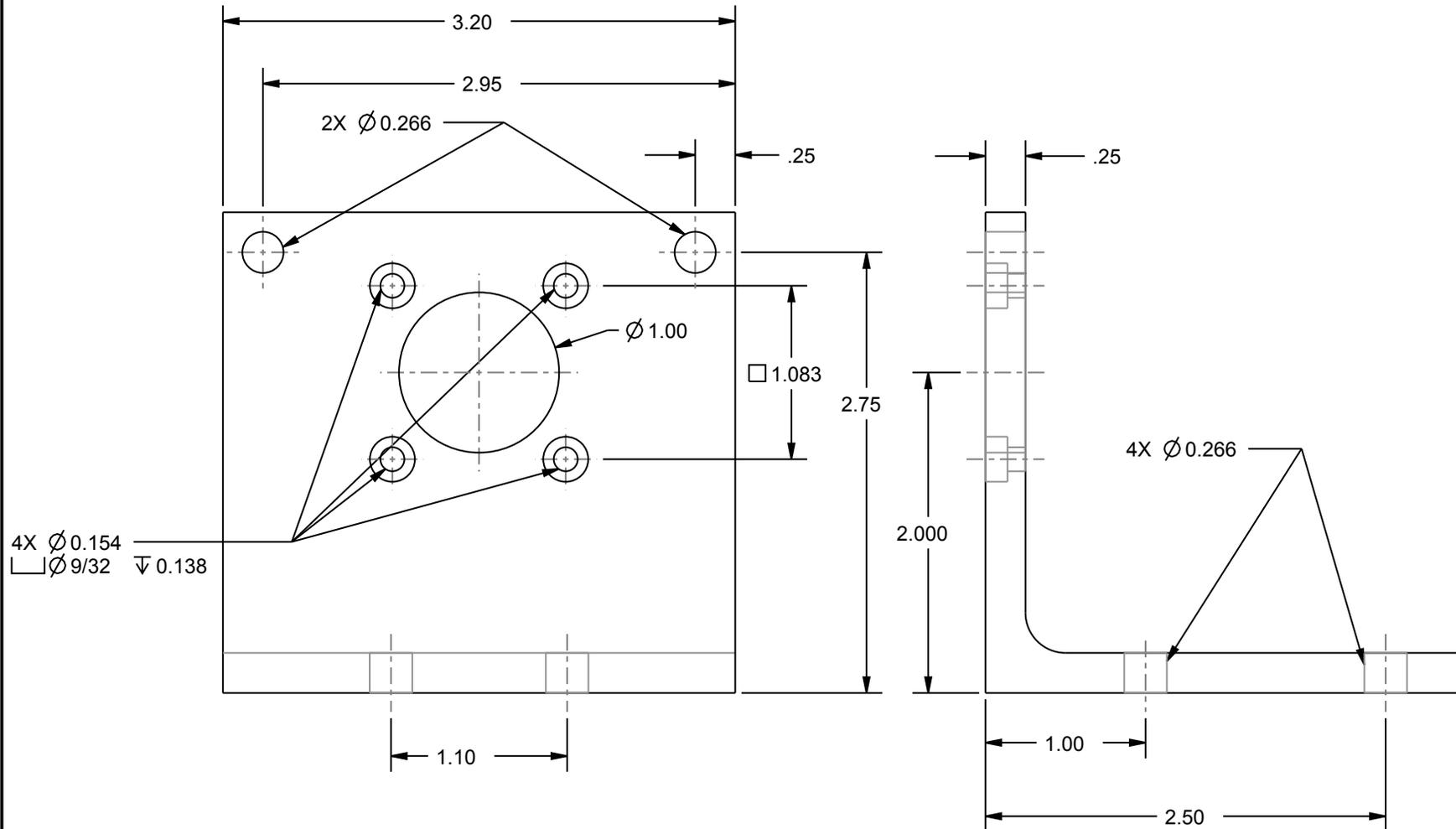
REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.: B3	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)
			G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM		
			VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :		
			LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		X.XX □ ±0.01		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
					X.XXX □ ±0.005		PIÈCE : SUPPORT_INTERMEDIAIRE		
					X.XXXX □ ±0.0010		SUPPORT INTERMEDIAIRE		
					TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		DESSIN NO.: IMPACT_B3		
					X □ ±0.5°				
					X.X □ ±0.2°				
					X.XX □ ±0.1°				

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.: B4	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)	
			G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : TOLE D'ACIER 0.050"			
			VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :			
			LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		X.XX □ ±0.01		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE			
					X.XXX □ ±0.005		PIÈCE : SUPPORT_CLUTCH			
					X.XXXX □ ±0.0010		SUPPORT CLUTCH			
					TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :					
C					X □ ±0.5°		DESSIN NO.: IMPACT_B4			
B					X.X □ ±0.2°					
A					X.XX □ ±0.1°					

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR

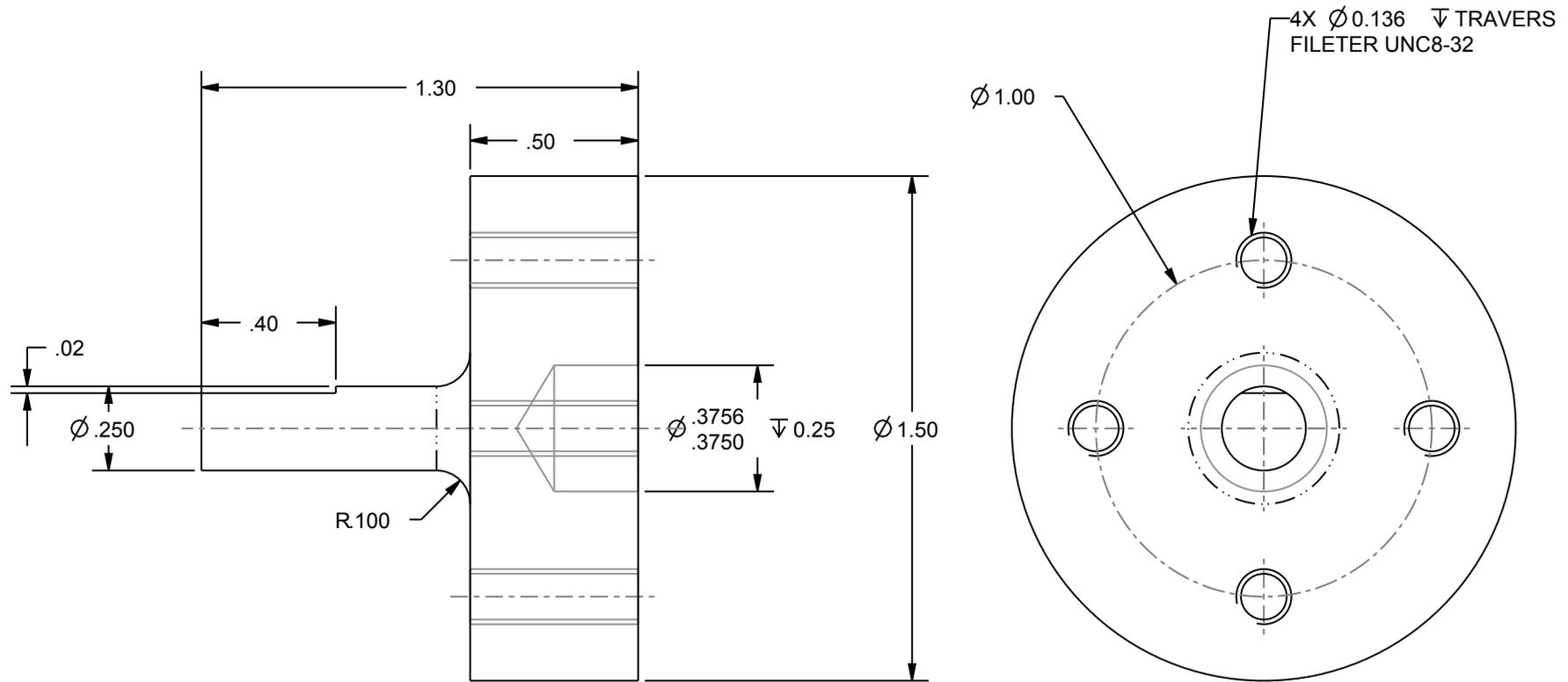


REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO. : B5	RÉVISION : A	QUANTITÉ :2(TOTAL)
			G. BILLETTE						
			VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM, EXTRUSION EN "L" 3X3		
			LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :		
					X.XX □ ±0.01		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
					X.XXX □ ±0.005		PIÈCE : SUPPORT_MOTEURV3		
					X.XXXX □ ±0.0010		SUPPORT POUR MOTEUR PITTMAN		
					TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :		DESSIN NO. : IMPACT_B5		
					X □ ±0.5°				
					X.X □ ±0.2°				
					X.XX □ ±0.1°				

A.1 Modification au design initial

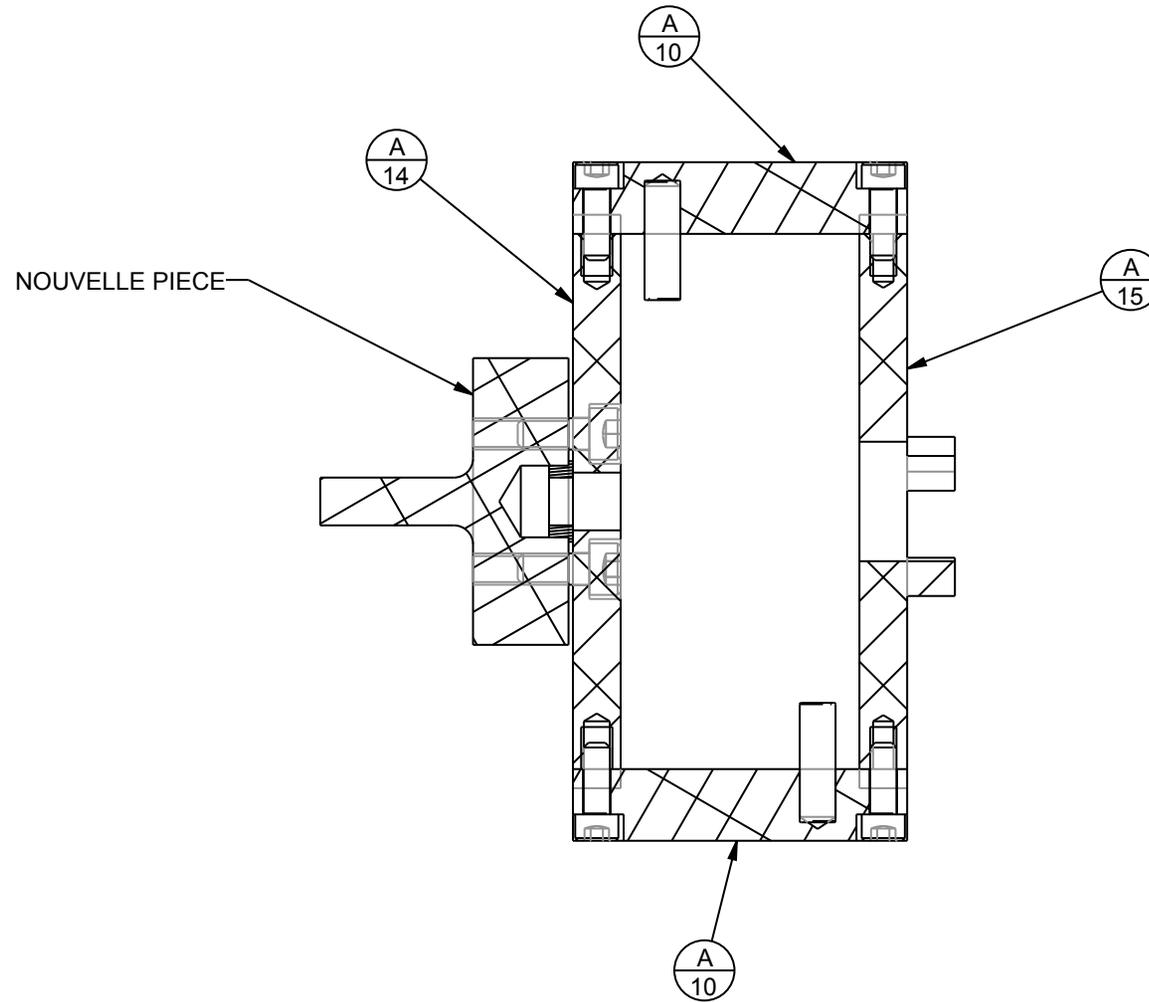
Dans le design initial, un embrayage à rouleau (roller clutch ; pièce A7) était prévu pour aider à réinitialiser le mécanisme après un impact. Il a été découvert par la suite que cet embrayage causait plus de problèmes qu'autre chose alors il a été enlevé. Pour ce faire, les pièces A4 et A5 ont été redessinées en une seule pièce. Cette pièce est montrée à la page suivante et à la page d'après il y a un petit assemblage qui est dessiné pour illustrer comment cette nouvelle pièce s'assemble dans le mécanisme.

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 2:1	PIÈCE NO.:	RÉVISION : A	QUANTITÉ : 1
			G. BILLETTE						
			VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU : ALUMINIUM		
			LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :		
					X.XX ± 0.01		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE		
					X.XXX ± 0.005		PIÈCE : ARBRE_MODIFIE		
					TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. :				
					X $\pm 0.5^\circ$				
					X.X $\pm 0.2^\circ$				
					X.XX $\pm 0.1^\circ$		DESSIN NO.: SHAFT_MODIFIE		

ASSEMBLAGE	PIÈCE	DÉSIGNATION	QTÉ	FOURNI PAR



C B A	REV	DATE	MODIFICATIONS	DÉSSINÉ PAR :	DATE :	UNITÉS : POUCES	ÉCHELLE : 1:1	PIÈCE NO.:	RÉVISION : A	QUANTITÉ :	
				G. BILLETTE		TOLÉRANCES SAUF INDICATION CONTRAIRE :		MATÉRIAU :			
				VÉRIFIÉ PAR :	DATE :	TOLÉRANCE LINÉAIRE GÉN. :		NOTE :			
				LABORATOIRE DE ROBOTIQUE DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, CANADA (418) 656-2131 POSTE 6302		X.XX □ ±0.01 X.XXX □ ±0.005 X.XXXX □ ±0.0010 TOLÉRANCE ANGULAIRE GÉN. : X □ ±0.5 ° X.X □ ±0.2 ° X.XX □ ±0.1 °		PROJET : SIMULATEUR D'EPEE PIÈCE : ASM0001 DESSIN NO.: ASS_MODIF			

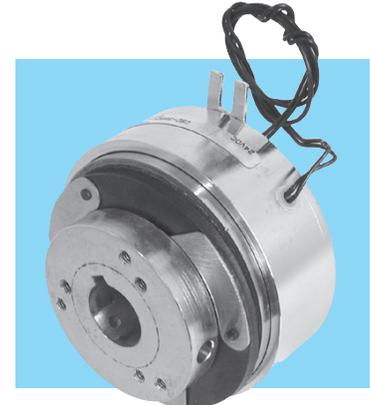
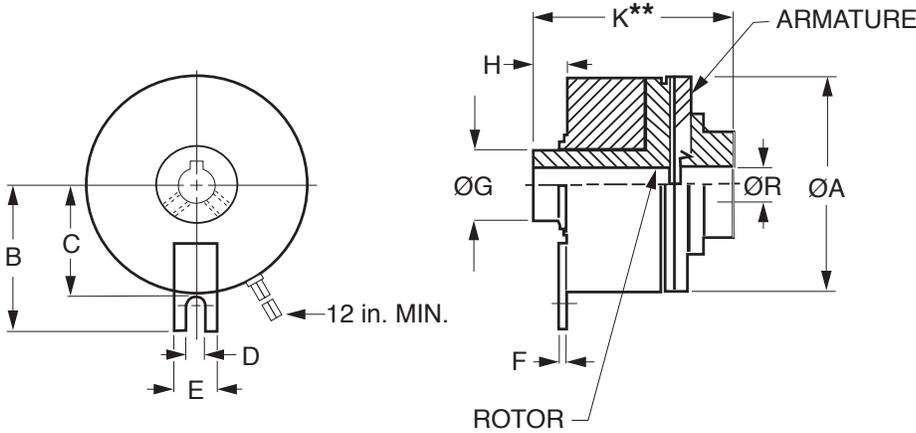
A.2 **Fiches techniques des pièces commandées**

- Pièce A1 : Embrayage S90CSC-15A0404 de la compagnie SDP/SI
- Pièce A17 : Embrayage EC-25 de la compagnie Reell
- Pièce B1 : Moteur 23SMDC-LSCC de la compagnie Servo Systems Co.
- Pièce B2 : Moteur 14204 de la compagnie Pittman

■ 24 VOLTS DC

■ ZERO-BACKLASH ARMATURE

■ FOR IN-LINE LOADS



Catalog Number	Static Torque* lb. in.	Nominal Resist. ohms	Max. Wattage	Armature Inertia lb. in. sec ²	Rotor Inertia lb. in. sec ²	Energy Dissipation lb. ft. / min.	Armature	
							Engagement msec	Disengagement msec
ΔS90CSC-11A0404	5	128	5	3.4x10 ⁻⁵	2.6x10 ⁻⁵	175	5	18
S90CSC-15A0404	10	130	5	6.6x10 ⁻⁵	5.2x10 ⁻⁵	295	8	22
S90CSC-17A0404	15	108	6	8.1x10 ⁻⁵	11.4x10 ⁻⁵	420	10	27
S90CSC-22A0606	40	75	8.5	33.1x10 ⁻⁵	32.3x10 ⁻⁵	1400	12	32
S90CSC-26A0606	80	65	9.5	81.0x10 ⁻⁵	62.0x10 ⁻⁵	2600	15	35
S90CSC-26A0808								
S90CSC-30A1010	125	44	15	179.5x10 ⁻⁵	203.0x10 ⁻⁵	2900	18	45
S90CSC-30A1212								

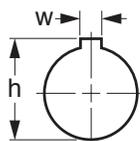
Catalog Number	R Bore	A	B	C	D	E	F	G	H	K**	Wt. lb.
Δ S90CSC-11A0404	.250	1.25	.87	.56	.13	.38	.03	.487	.22	1.28	.2
S90CSC-15A0404	.250	1.53	1.10	.75	.19	.50	.06	.560	.38	1.68	.4
S90CSC-17A0404	.250	1.78	1.32	.91	.19	.50	.06	.620	.30	1.55	.6
S90CSC-22A0606	.375	2.26	1.52	1.16	.19	.44	.06	.750	.36	2.06	1.1
S90CSC-26A0606	.375										
S90CSC-26A0808	.500	2.63	1.75	1.34	.19	.50	.06	.875	.34	2.11	1.4
S90CSC-30A1010	.625										
S90CSC-30A1212	.750	3.27	2.05	1.69	.19	.50	.09	1.125	.36	2.14	3.3

NOTE: Other voltages and dissimilar bore combinations are available on special order.

*Typical torque after burnishing; units shipped burnished.

**For Catalog Numbers: -11A0404, 15A0404, 17A0404, initial working air gap at installation shall be .004/.009.
 -22A0606, 26A0606, 26A0808, initial working air gap at installation shall be .006/.013.
 -30A1010, 30A1212, initial working air gap at installation shall be .008/.018.

ΔKeyway not available in rotor.



Keyway Dimensions					
Bore	.250	.375	.500	.625	.750
h	.286	.425	.564	.709	.837
w	.062	.094	.125	.188	.188



Electric Wrap Spring Clutch Technical Datasheet

How it works

As electric current is passed through the stationary coil, lines of magnetic flux are generated and used to attract the control ring to the shoulder. This control ring is attached to the spring, which wraps down onto a hub as the input is turned. Torque is transferred from the input, through the spring, to the output. After electric current is removed, the magnetic attraction is lost, causing the clutch to disengage as the spring unwraps.

Radial Electric Wrap Spring Clutch Concept

Connector:
Energizes clutch from outside source

Magnetic Flux:
Lines of magnetic flux cause the ring to engage

Shaft:
Used as input or output as dictated by application. Driven by cross pin slot on opposite end

Three Dog Hub:
Used as input or output as dictated by application

Spring:
Fixed on three dog hub. During engagement spring wraps down on wrap hub to transfer torque

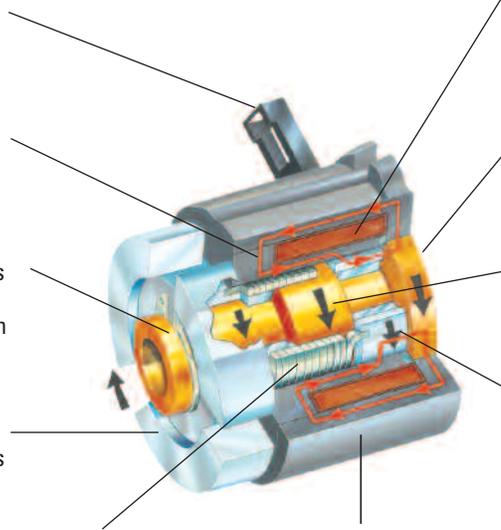
Stationary Case:
Encloses clutch components, protecting them from contamination

Stationary Coil:
Generates magnetic flux when energized

Shoulder:
Pressed on shaft for control ring attraction

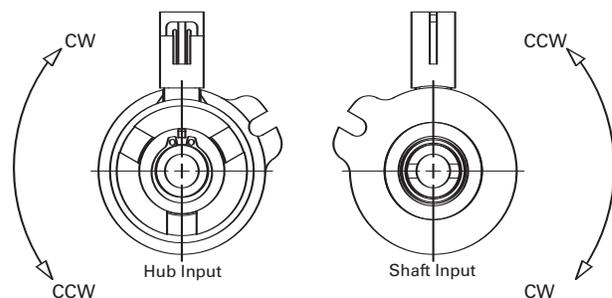
Wrap Hub:
Pressed on shaft for spring torque transfer

Floating Control Ring:
Attracted to shoulder when magnetized



How to Determine the Direction of Rotation

Direction of rotation viewed from the input end of the clutch.

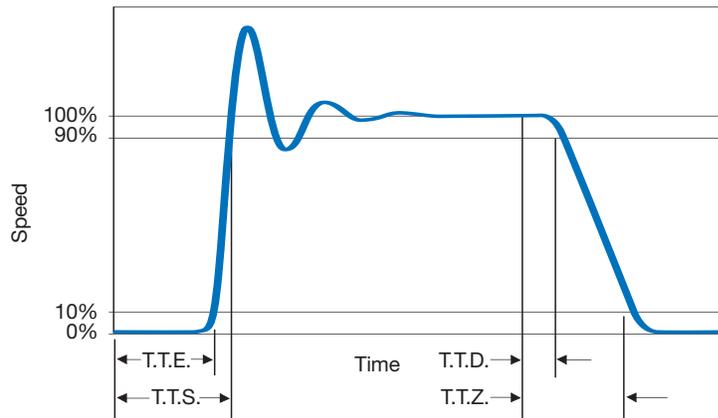


Electric Wrap Spring Clutch Performance Information

Speed to Time Curve

T.T.E. — Time-to-Engage:
Time for magnetic flux buildup in clutch to activate the control ring and wrap spring.

T.T.S. — Time-to-Speed:
T.T.E. + the time for the system to accelerate.



T.T.D. — Time-to-Disengage:
Time for magnetic flux to decay and the spring to unwrap.

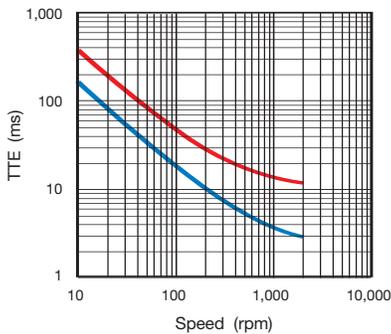
T.T.Z. — Time-to-Zero:
T.T.D. + deceleration time of the system.



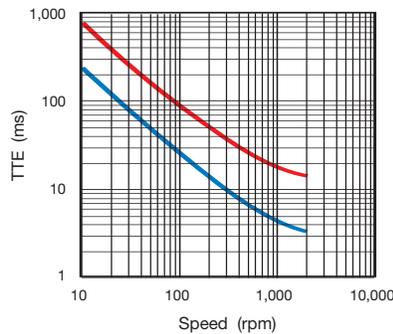
Time-to-Engage (T.T.E.)

Time-to-Engage is directly related to the input speed. The higher the input speed, the quicker the clutch will engage.

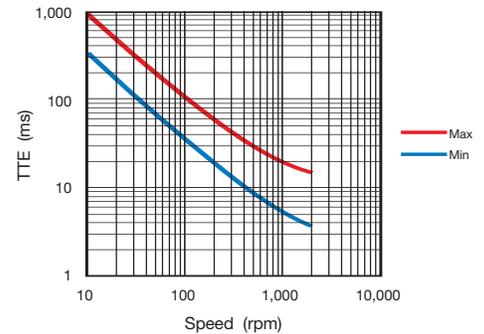
EC5
Time to Engage vs. Speed



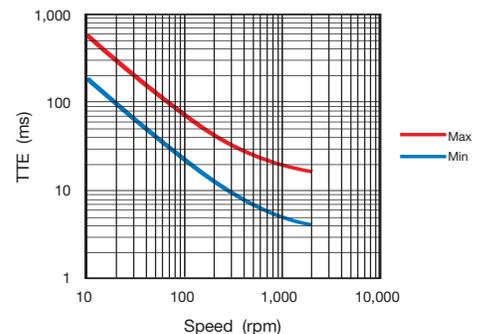
EC20, EC20CBLL, EC25, EC25LL
Time to Engage vs. Speed



EC15, EC30, EC30LL
Time to Engage vs. Speed



EC75, EC75LL
Time to Engage vs. Speed



Time-to-Disengage Characteristics

(all Reell electric clutches)

T.T.D.	Maximum voltage transient (24 v coil)	Arc Suppression Circuit
30 ms max (all clutches) ± 5ms cycle-to-cycle	≈ 24.7	<p>A</p> <p>diode</p>
12 ms max (all clutches) ± 2ms cycle-to-cycle	≈ 36.7	<p>B</p> <p>diode & 12 v zener</p>

The arc suppression circuit used with the clutch affects disengagement time. As with any magnetic coil, high voltage transients will occur when power is removed. Circuit A shows a simple, economical arc suppression circuit that results in very low transients and fast, consistent disengagement. Circuit B gives even faster and more consistent disengagement but with higher transients.

Reell Wrap Spring Clutch Total Load Worksheet

The worksheet below is a step-by-step procedure to determine the load exerted on your clutch. The total load on your clutch is the sum of the load caused by friction and the load due to inertia of the driven system. **DO NOT IGNORE THE EFFECTS OF INERTIAL** Inertia is the tendency of an object to resist a change in rotation. The rotation of an object with a large inertia will be harder to change than the rotation of an object with less inertia. The weight of an object is not the only variable affecting inertia. The geometric shape is also important.

Reell wrap spring clutches have a quick and positive engagement. Loads will be accelerated from zero to full speed in less than 3 milliseconds. This quick acceleration is the reason inertia effects are important.

The inertia about the axis of a cylinder is given by the formula:
 $I = \pi/32 \times D^4 \times L \times \rho$

- I=Inertia lb-in² (kg-m²)
- D=Diameter in (m)
- L=Length in (m)
- ρ=Density lb/in³ (kg/m³)

Approximate values for ρ:

Steel	0.284 (7860)
Aluminum	0.098 (2700)
Plastic	0.047 (1300)
Rubber	0.047 (1300)

Example: two steel cylinders

- #1. D= 4 inches
L=1 inch
- #2. D=2.3 inches
L=3.02 inches

Each has a volume of 12.55 cubic inches but the inertia of each is different. (Cylinder #1 has an inertia value of 7.13 lb-in². Cylinder #2 has an inertia value of 2.35 lb-in².)

Step 1. Determine the torque due to friction acting on clutch

The torque due to friction acts on the clutch output. The value for friction torque may be obtained through direct measurement or approximation. In many systems, measurements may be made with a torque wrench.

Friction torque _____
 If friction torque >75 lb-in (8.5 N-m), see Note 1.

Step 2. Calculate the system inertia

Calculate the inertia of your system. Reasonable approximations can be made by breaking your system into cylinders and adding up the inertia values from each. If system components operate at different speeds, subtotal inertia for each speed.

- Inertia of cylinder #1 _____
- Inertia of cylinder #2 _____
- Inertia of cylinder #3 _____
- Total INERTIA _____

Step 3. Determine inertia torque

Accelerating the system components exerts a torque load due to the inertia. To determine this torque, use the inertia values calculated in step 2, the system component speed, and the **Estimated Torque to Accelerate Inertia Graphs**. If system components operate at different speeds, determine the inertia torque for each speed. Add these results to determine the total inertia torque.

Inertia torque _____
 If inertia torque >75 lb-in (8.5 N-m), see Note 1.

Step 4. Determine total load

Add results from steps 1 and 3 together to determine total load.

Total load _____
 If total load >75 lb-in (8.5 N-m), see Note 1.

Use the "Estimated Electric Clutch Actuation Life Matrix" to determine which clutch best suits your needs.

Example: The inertia of a 6-inch long, 1.2-inch diameter rubber roller is:
 (Reference the graphs on the back page.)

$$I = 3.1416/32 \times 1.2^4 \times 6 \times 0.047 = 0.057 \text{ lb-in}^2 \text{ (1)}$$

At 500 rpm (2) the inertia load is 10 lb-in (3)

Total Load =
 3.0 + 10 (from graph for EC25) = 13 lb-in

From the life table, we find that the model EC25 is suitable if the application life requirement is 10 million cycles. The EC15 can be used if a life of 1 million cycles is acceptable.

NOTE 1: If total load or any of its components exceeds 75 lb-in (8.5 N-m) for one million cycles life requirement. For more information, please see the online calculators at www.reell.com/calculator.htm or contact Reell at 651-484-2447.

Estimated Electric Wrap Spring Clutch Actuation Life Matrix

Reell's electric wrap spring clutches are designed to meet the types of requirements typically found in paper feed systems of office equipment. The versatility of its design lends itself to use in a wide variety of applications where high torque, small package size, and consistent engagement is required.

The following conditions may reduce the life of the clutch:

- Speeds over 800 rpm
- Temperature above 140°F (40°C) and/or below 32°F (0°C)
- Idle or constantly engaged conditions for more than 1,000 hours
- Poor installation (end or side loading)

If your application has life requirements greater than those listed, consult with your Reell sales representative to discuss the application condition in detail.

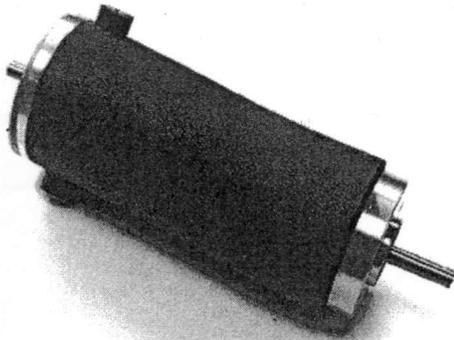
Life Requirement	Maximum Allowable Torque Load lb-in (N-m)				
	Model EC15	Model EC20/ EC20 CBLL	Model EC25/ EC25LL	Model EC30/ EC30LL	Model EC75/ EC75LL
1 Million Cycles	15 (1.7)	20 (2.3)	25 (2.8)	30 (3.4)	75 (8.5)
3 Million Cycles	12 (1.4)	16 (1.8)	20 (2.3)	24 (2.7)	60 (6.8)
10 Million Cycles	9 (1.0)	12 (1.4)	15 (1.7)	18 (2.0)	45 (5.1)

Life Requirement	Maximum Allowable Torque Load lb-in (N-m)
	Model EC5
0.5 Million Cycles	6 (0.68)
1 Million Cycles	5 (0.57)
2 Million Cycles	4 (0.45)

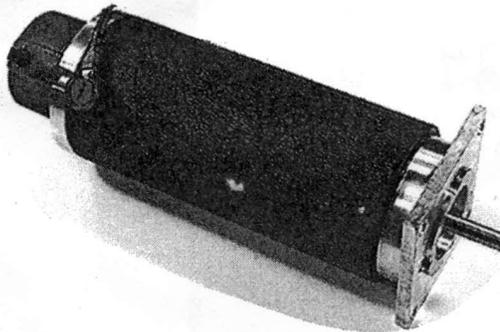
Slip Devices and Flexible Couplers could be added to extend life and quiet application noise.

BRUSH TYPE DC SERVO MOTOR

with Optical Encoder, Gearhead and NEMA23 Mount Options



Motor Only



Motor with NEMA23 Mount and Encoder Option

Servo Systems Co. P/N 23SMDC-LCSS

Motor Ratings

- Continuous Stall Torque: 55 oz-in.
- Peak Torque: 400 oz-in.
- Max. Terminal Voltage: 60VDC
- Max. Operating Speed: 6000 RPM

Mechanical Data

- Rotor Inertia: 0.008 oz-in./sec/sec
- Damping Constant: 0.25oz-in./KRPM
- Thermal Resistance: 4 Deg. C/Watt
- Max. Armature Temp: 155 Deg. C
- Max. Friction Torque: 3 oz-in.
- Max. Radial Load (1" from Bearing): 10 Lbs.
- Weight: 3.5 Lbs.(motor only)

Electrical Data

- Torque Constant: 13.7 oz-in./Amp
- Voltage Constant: 10.2 V./KRPM
- Terminal Resistance: 1.6 Ohms
- Electrical Time Constant: 2.6 msec.
- Mechanical Time Constant: 8.9 msec.
- Max. Continuous Current: 4 Amps
- Armature Inductance: 4.1 mh.
- Max. Peak Current: 34 Amps

SEE NEXT PAGE FOR OUTLINE DIMENSIONS AND SPECIFICATIONS

Recommended Servo Amplifier is Advanced Motion Controls Model# 25A8 \$295.00

Ordering Information

Stock No. RDM-103
 P/N 23SMDC-LCSS \$189.00
 Servo Motor with dual shaft (no encoder)
SEE FIGURE #1 FOR DIMENSIONS

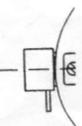
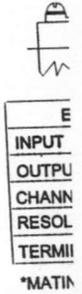
Stock No. RDM-103
 P/N 23SMDC-LCSS \$189.00
 Servo Motor with H.P. 500 ppr single ended modular incremental encoder mounted.
 P/N HEDS-5640-A06 \$82.00
 Stock No. ADC-244
SEE FIGURE #2 FOR ENCODER DATA

Stock No. RDM-103
 P/N 23SMDC-LSCC \$189.00
 Servo Motor with Dynapar 1000 ppr line driver output modular incremental encoder with 3 foot shielded cable.
 P/N SSCM15-1000-5VLD \$110.00
 Stock No. ADC-256
SEE FIGURE #4 FOR ENCODER DATA

Optional NEMA23 Mount add \$30.00 to price
SEE FIGURE #3

Other Encoder Resolutions available

Precision Gearheads available



**Motor
 Mount
 Servo**

BRUSH TYPE DC SERVO MOTOR

Mechanical Dimension Data

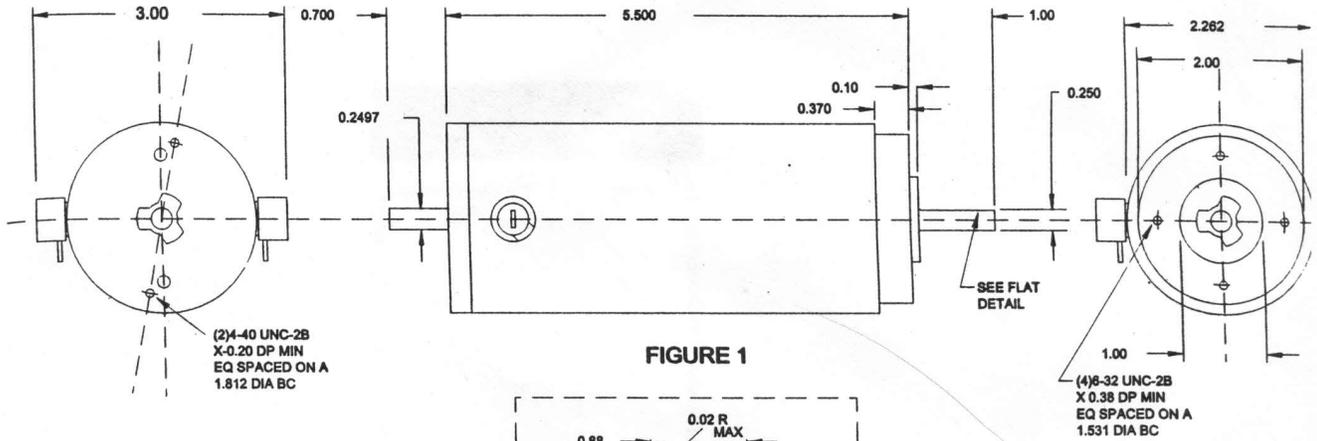
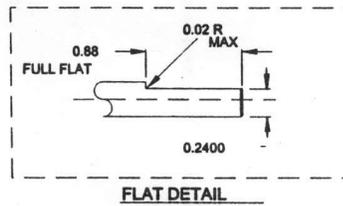
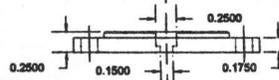


FIGURE 1



FLAT DETAIL



4 HOLES EQUALLY SPACED
COUNTERSINK ON A 1.531
DIA. BC..

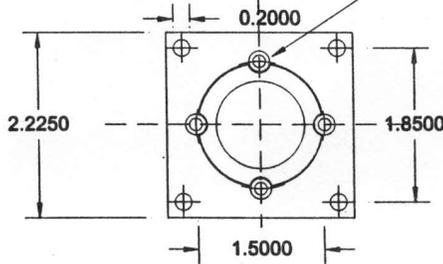
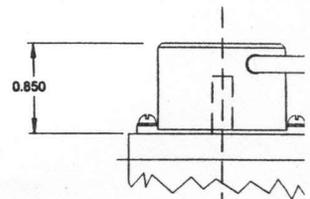


FIGURE 3



ENCODER SPECS.

INPUT	5 VDC
OUTPUT	5V TTL
CHANNELS	A,B,Z
RESOLUTION	500 PPR
TERMINATION	PINS*

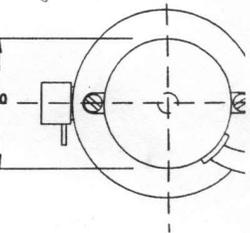


FIGURE 4

ENCODER SPECS.	
INPUT	5 VDC
OUTPUT	5V TTL
CHANNELS	A,B,Z
RESOLUTION	500 PPR
TERMINATION	PINS*

*MATING CONN. SUPPLIED

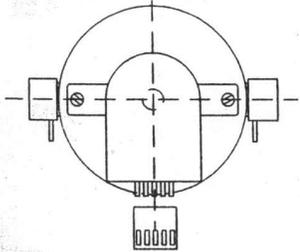
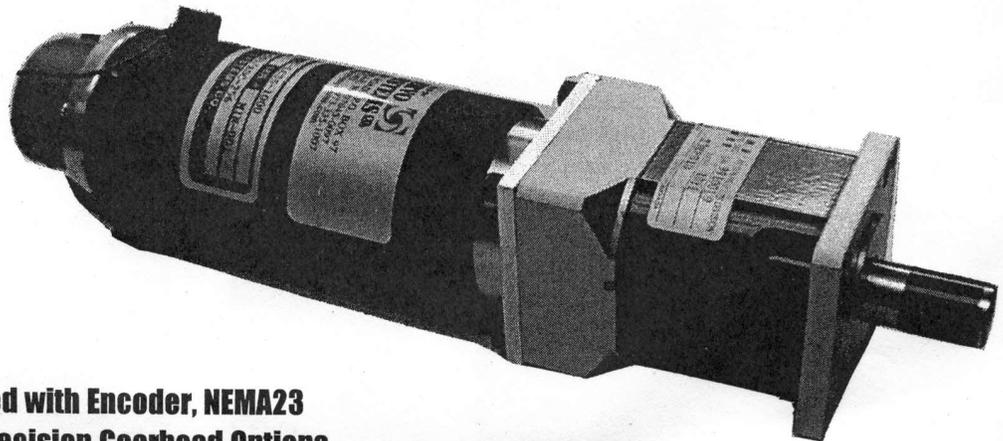


FIGURE 2



Motor Pictured with Encoder, NEMA23
Mount and Precision Gearhead Options

ns

MA23 Mount
Option

... \$189.00
(encoder)

... \$189.00
single ended
integrated.
... \$82.00

ATA

... \$189.00
for line driver
encoder with

... \$110.00

DATA

... .00 to price

Model 14XX3/14XX4 Winding Data (other windings available upon request)

Line No.	Parameter	Symbol	Units	14XX3				14XX4			
23	Reference Voltage	E	V	12.0	19.1	24.0	30.3	12.0	19.1	24.0	30.3
24	Torque Constant	K_T	oz-in/A (N-m/A)	4.63 (32.7 X 10 ⁻³)	7.41 (52.3 X 10 ⁻³)	9.26 (65.4 X 10 ⁻³)	11.7 (82.6 X 10 ⁻³)	4.33 (30.7 X 10 ⁻³)	6.86 (48.5 X 10 ⁻³)	8.67 (61.2 X 10 ⁻³)	10.8 (76.5 X 10 ⁻³)
25	Back-EMF Constant	K_E	V/krpm (V/rad/s)	3.42 (32.7 X 10 ⁻³)	5.48 (52.3 X 10 ⁻³)	6.85 (65.4 X 10 ⁻³)	8.67 (82.6 X 10 ⁻³)	3.21 (30.7 X 10 ⁻³)	5.08 (48.5 X 10 ⁻³)	6.41 (61.2 X 10 ⁻³)	8.01 (76.5 X 10 ⁻³)
26	Resistance	R_T	Ω	0.37	0.89	1.38	2.19	0.27	0.65	1.01	1.57
27	Inductance	L	mH	0.56	1.45	2.26	3.63	0.40	1.00	1.60	2.50
28	No-Load Current	I_{NL}	A	0.48	0.30	0.24	0.19	0.52	0.33	0.26	0.21
29	Peak Current (Stall)	I_p	A	32.7	21.5	17.4	13.9	43.7	29.6	23.8	19.2

Model 14XX5/14XX6 Winding Data (other windings available upon request)

Line No.	Parameter	Symbol	Units	14XX5				14XX6			
30	Reference Voltage	E	V	12.0	19.1	24.0	30.3	12.0	19.1	24.0	30.3
31	Torque Constant	K_T	oz-in/A (N-m/A)	5.25 (37.1 X 10 ⁻³)	8.31 (58.7 X 10 ⁻³)	10.5 (74.2 X 10 ⁻³)	13.1 (92.7 X 10 ⁻³)	4.74 (33.5 X 10 ⁻³)	7.89 (55.8 X 10 ⁻³)	10.0 (70.6 X 10 ⁻³)	12.6 (89.2 X 10 ⁻³)
32	Back-EMF Constant	K_E	V/krpm (V/rad/s)	3.88 (37.1 X 10 ⁻³)	6.15 (58.7 X 10 ⁻³)	7.76 (74.2 X 10 ⁻³)	9.71 (92.7 X 10 ⁻³)	3.50 (33.5 X 10 ⁻³)	5.84 (55.8 X 10 ⁻³)	7.39 (70.6 X 10 ⁻³)	9.34 (89.2 X 10 ⁻³)
33	Resistance	R_T	Ω	0.30	0.71	1.11	1.73	0.22	0.54	0.84	1.32
34	Inductance	L	mH	0.45	1.13	1.81	2.83	0.31	0.85	1.36	2.17
35	No-Load Current	I_{NL}	A	0.49	0.31	0.25	0.20	0.56	0.33	0.26	0.21
36	Peak Current (Stall)	I_p	A	40.1	27.0	21.6	17.5	54.2	35.6	28.6	23.0

Model 14XX7 Winding Data (other windings available upon request)

Line No.	Parameter	Symbol	Units	14XX7			
37	Reference Voltage	E	V	15.1	19.1	24.0	30.3
38	Torque Constant	K_T	oz-in/A (N-m/A)	6.0 (42.4 X 10 ⁻³)	8.0 (56.5 X 10 ⁻³)	10.0 (70.6 X 10 ⁻³)	12.7 (89.7 X 10 ⁻³)
39	Back-EMF Constant	K_E	V/krpm (V/rad/s)	4.44 (42.4 X 10 ⁻³)	5.92 (56.5 X 10 ⁻³)	7.39 (70.6 X 10 ⁻³)	9.37 (89.7 X 10 ⁻³)
40	Resistance	R_T	Ω	0.24	0.39	0.59	0.93
41	Inductance	L	mH	0.31	0.56	0.87	1.40
42	No-Load Current	I_{NL}	A	0.51	0.38	0.30	0.24
43	Peak Current (Stall)	I_p	A	62.4	49.3	40.4	32.6

$V - E_b = R_i$

$V = R_i + V$

SERIES 14000

Motor Data

Line No.	Parameter	Symbol	Units	14XX1	14XX2	14XX3	14XX4	14XX5	14XX6	14XX7
1	Continuous Torque(Max.) ¹	T _C	oz-in (N-m)	10.0 (70.6 X 10 ⁻³)	14.0 (98.9 X 10 ⁻³)	21.0 (148.3 X 10 ⁻³)	26.0 (183.6 X 10 ⁻³)	31.0 (218.9 X 10 ⁻³)	36.5 (257.8 X 10 ⁻³)	50.0 (353.1 X 10 ⁻³)
2	Peak Torque (Stall) ²	T _{PK}	oz-in (N-m)	62.8 (.44)	107 (.76)	159 (1.12)	204 (1.44)	225 (1.59)	284 (2.01)	410 (2.90)
3	Motor Constant	K _M	oz-in/√W (N-m/√W)	4.45 (31.4 X 10 ⁻³)	5.93 (41.9 X 10 ⁻³)	7.88 (55.6 X 10 ⁻³)	8.63 (60.9 X 10 ⁻³)	9.97 (70.4 X 10 ⁻³)	10.9 (77.0 X 10 ⁻³)	13.1 (92.5 X 10 ⁻³)
4	No-Load Speed	S _{NL}	rpm (rad/s)	4230 (443)	4087 (428)	3456 (362)	3702 (388)	3056 (320)	3216 (337)	3211 (336)
5	Friction Torque	T _F	oz-in (N-m)	1.20 (8.5 X 10 ⁻³)	1.20 (8.5 X 10 ⁻³)	1.60 (11.3 X 10 ⁻³)	1.60 (11.3 X 10 ⁻³)	2.00 (14.1 X 10 ⁻³)	2.00 (14.1 X 10 ⁻³)	2.20 (15.5 X 10 ⁻³)
6	Rotor Inertia	J _M	oz-in-s ² (kg-m ²)	1.6 X 10 ⁻³ (1.13 X 10 ⁻⁵)	2.3 X 10 ⁻³ (1.62 X 10 ⁻⁵)	3.0 X 10 ⁻³ (2.12 X 10 ⁻⁵)	3.7 X 10 ⁻³ (2.61 X 10 ⁻⁵)	4.4 X 10 ⁻³ (3.11 X 10 ⁻⁵)	5.2 X 10 ⁻³ (3.67 X 10 ⁻⁵)	6.7 X 10 ⁻³ (4.73 X 10 ⁻⁵)
7	Electrical Time Constant	τ _E	ms	0.91	1.47	1.64	1.58	1.63	1.62	1.50
8	Mechanical Time Constant	τ _M	ms	11.4	9.26	6.84	7.04	6.27	6.19	5.50
9	Viscous Damping— Infinite Source Impedance	D	oz-in/krpm (N-m/(rad/s))	0.17 (1.14 X 10 ⁻⁵)	0.17 (1.14 X 10 ⁻⁵)	0.18 (1.21 X 10 ⁻⁵)	0.18 (1.21 X 10 ⁻⁵)	0.19 (1.28 X 10 ⁻⁵)	0.19 (1.28 X 10 ⁻⁵)	0.25 (1.69 X 10 ⁻⁵)
10	Viscous Damping— Zero Source Impedance	K _D	oz-in/krpm (N-m/(rad/s))	14.7 (9.91 X 10 ⁻⁴)	26.0 (1.75 X 10 ⁻³)	45.9 (3.09 X 10 ⁻³)	55.0 (3.71 X 10 ⁻³)	73.5 (4.96 X 10 ⁻³)	88.0 (5.93 X 10 ⁻³)	127.0 (8.56 X 10 ⁻³)
11	Maximum Winding Temperature	θ _{MAX}	°F (°C)	311 (155)						
12	Thermal Impedance	R _{TH}	°F/watt °C/watt	49.8 (9.90)	48.2 (9.00)	46.6 (8.10)	41.3 (7.19)	45.1 (7.30)	44.2 (6.80)	41.0 (4.98)
13	Thermal Time Constant	τ _{TH}	min	22.0	24.0	26.0	26.82	29.4	33.6	32.3
14	Motor Weight (Mass)	W _M	oz (g)	20.8 (589.7)	26.0 (737.1)	31.2 (884.5)	35.2 (997.9)	39.5 (1119.8)	45.4 (1287.1)	54.5 (1545.1)
15	Motor Length, 1410X, 1420X	L ₁	in max (mm max)	2.953 (75.0)	3.203 (81.4)	3.703 (94.1)	4.078 (103.6)	4.453 (113.1)	4.953 (125.8)	5.703 (144.9)

2.01XV⁻⁵

Model 14XX1/14XX2 Winding Data (other windings available upon request)

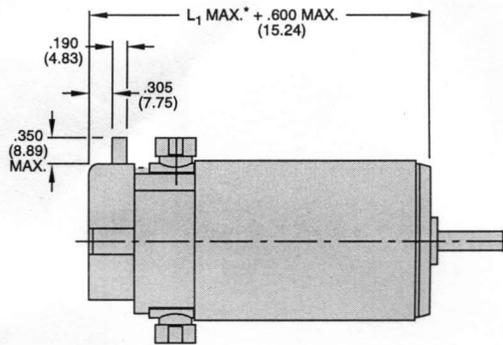
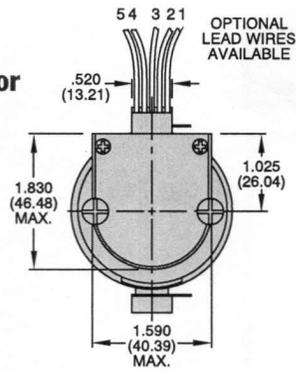
Line No.	Parameter	Symbol	Units	14XX1				14XX2			
16	Reference Voltage	E	V	12.0	19.1	24.0	30.3	12.0	19.1	24.0	30.3
17	Torque Constant	K _T	oz-in/A (N-m/A)	3.72 (26.3 X 10 ⁻³)	5.89 (41.6 X 10 ⁻³)	7.44 (52.5 X 10 ⁻³)	9.46 (66.8 X 10 ⁻³)	3.90 (27.5 X 10 ⁻³)	6.16 (43.5 X 10 ⁻³)	7.80 (55.1 X 10 ⁻³)	9.85 (69.6 X 10 ⁻³)
18	Back-EMF Constant	K _E	V/krpm (V/rad/s)	2.75 (26.3 X 10 ⁻³)	4.36 (41.6 X 10 ⁻³)	5.50 (52.5 X 10 ⁻³)	6.99 (66.8 X 10 ⁻³)	2.88 (27.5 X 10 ⁻³)	4.55 (43.5 X 10 ⁻³)	5.77 (55.1 X 10 ⁻³)	7.29 (69.6 X 10 ⁻³)
19	Resistance	R _T	Ω	0.72	1.76	2.79	4.45	0.45	1.09	1.73	2.74
20	Inductance	L	mH	0.63	1.59	2.54	4.10	0.63	1.58	2.54	4.05
21	No-Load Current	I _{NL}	A	0.52	0.33	0.26	0.20	0.49	0.31	0.24	0.19
22	Peak Current (Stall)	I _P	A	16.7	10.8	8.60	6.80	26.4	17.5	13.9	11.1

¹Continuous torque specified at 25°C ambient temperature and without additional heat sink.

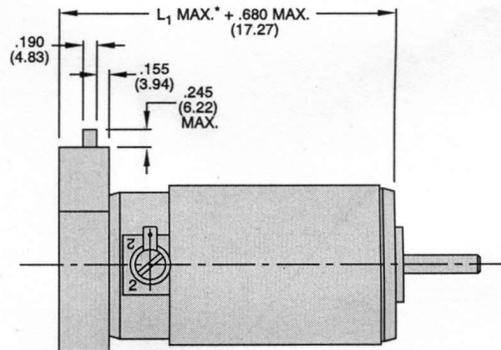
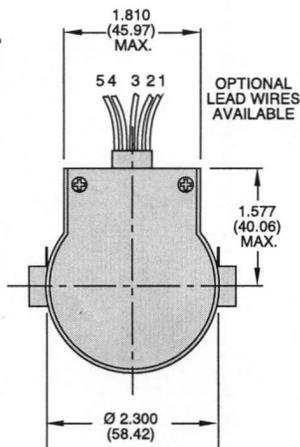
²Theoretical values supplied for reference only.

PITTMAN[®]

**141XX/142XX Motor
with 91X0 Encoder**



**141XX/142XX Motor
with 90X0 Encoder**



Encoder Connection Chart

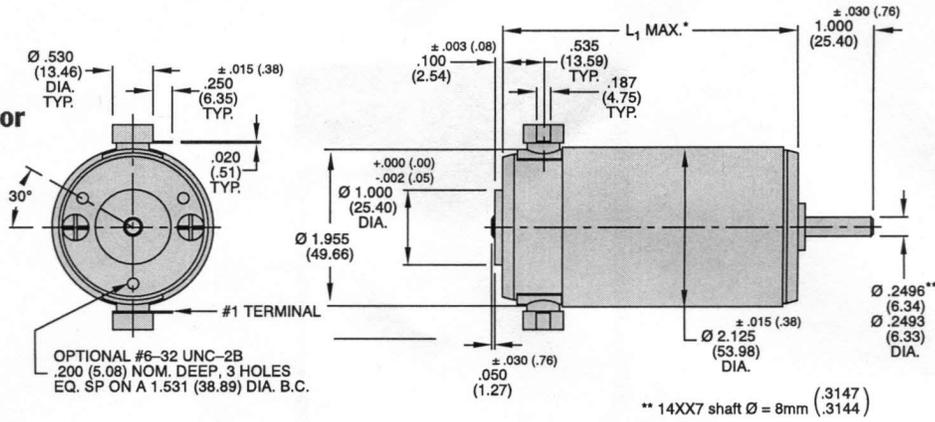
Pin No.	Color	Connection
1	Black	Ground
2	Green	Index/NC
3	Yellow	Channel A
4	Red	Vcc
5	Blue	Channel B

Notes:

- Unless otherwise specified, all tolerances are to be ± 0.005 (.01)
- All measurements are in inches (mm)
- *See line number 15 in motor data chart

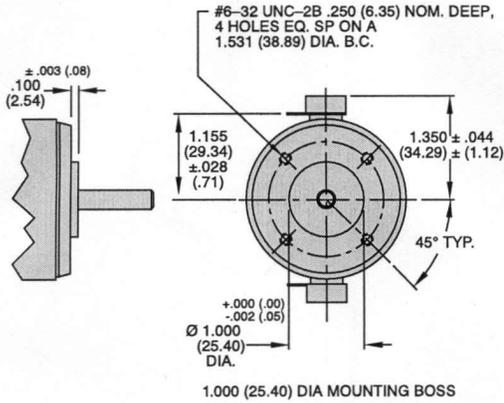
SERIES 14000

141XX/142XX Motor

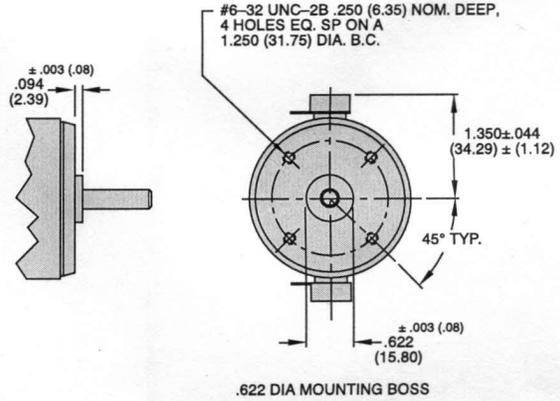


Front Mounting Options

142XX



141XX



Notes:

- Unless otherwise specified, all tolerances are to be $\pm .005$ (.01)
- All measurements are in inches (mm)
- *See line number 15 in motor data chart

PITTMAN®

Annexe B

Le programme de contrôle de l'interface

B.1 Les composantes de l'interface haptique à câbles

Pour bien expliquer comment le programme de contrôle fonctionne, il est important de bien comprendre comment les composantes physiques de l'interface sont interconnectées. C'est précisément ce qui sera fait dans cette annexe et pour se faire, il faut

premièrement expliquer la notation qui est utilisée dans le programme pour identifier les composantes physiques.

Pour étiqueter chacun des moteurs, on a premièrement attribué une lettre à chacun des enrouleurs. Par exemple : l'enrouleur situé le plus à gauche dans la fig. B.1 est attribué appelé « A ». Ensuite, pour étiqueter les moteurs maîtres, on utilise le chiffre « 1 ». Donc, le moteur maître de l'enrouleur de gauche se nomme « moteur A1 ». Pour le reste, on utilise la notation suivante :

- moteur A1 : Le moteur maître de l'enrouleur « A »
- embrayage A1 : L'embrayage du mécanisme d'impact de l'enrouleur « A »
- moteur A2 : Le moteur d'impact de l'enrouleur « A »
- embrayage A2 : L'embrayage d'impact de l'enrouleur « A »

La raison pour laquelle on utilise les notations A1 et A2 deux fois vient du fait que le moteur A1 et l'embrayage A1 sont connectés à l'amplificateur par le même câble. Il en est de même pour le moteur A2 et l'embrayage A2. Ceci est dû au design des câbles ainsi qu'au design des connecteurs de l'amplificateur. Ceux-ci ont été conçus pour prévoir l'alimentation d'un moteur à courant continu, l'alimentation d'un frein ainsi que pour recevoir les données d'un encodeur. Puisque les embrayages pouvaient être alimentés avec le même courant qu'un frein, il était donc logique de brancher ceux-ci avec un moteur.

Chaque amplificateur est muni de quatre connecteurs. Puisqu'il y a six groupes moteur-embrayage, il fallait donc deux amplificateurs pour l'interface. Aussi, puisque chaque amplificateur détient son propre noeud de calcul, il y a nécessairement deux noeuds de calcul en tout.

Étant donné le fait qu'il y a deux amplificateurs pour six groupes moteur-embrayage, il a été décidé d'installer trois groupes moteur-embrayage par amplificateur afin de bien distribuer la puissance fournie aux diverses composantes. Aussi, puisqu'il fallait utiliser deux noeuds de calcul, le programme de contrôle a été divisé en plusieurs modules qui eux ont été distribués entre les deux noeuds. Le but était de faire en sorte que la puissance de calcul était bien partagée même si tout le programme aurait bien pu rouler sur un noeud de calcul. Pour le programme lui-même, il a été écrit avec Matlab/SimulinkTM et compilé en programme de contrôle par le biais du programme

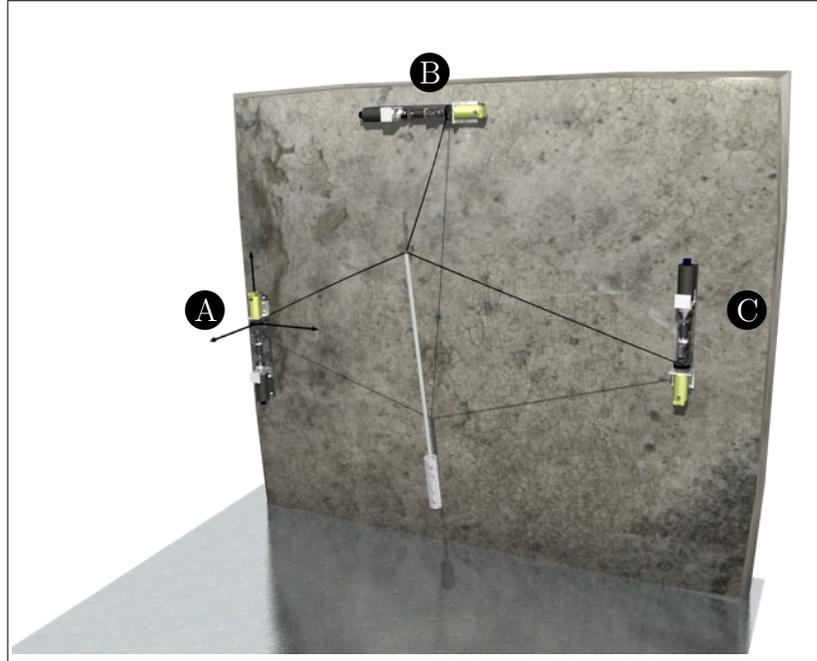


FIG. B.1: L'étiquetage des enrouleurs

RT-LABTM de la compagnie Opal-RT[©].

La fig. B.2 illustre le branchement entre les diverses composantes physiques qui constituent l'interface haptique. On y retrouve les composantes suivantes :

1. Capteur « Flock of birdsTM » de la compagnie Ascension[©]. Utilisé pour obtenir l'orientation de l'effecteur.
2. Ordinateur sur table ayant Windows XP comme système d'exploitation. Utilisé pour contrôler la simulation, produire le rendu visuel ainsi que pour écrire et modifier le programme de contrôle.
3. Noeud esclave.
4. Noeud maître.
5. Amplificateur esclave.
6. Amplificateur maître.
7. Groupe A1
8. Groupe A2
9. Groupe B1

10. Groupe B2
11. Groupe C1
12. Groupe C2

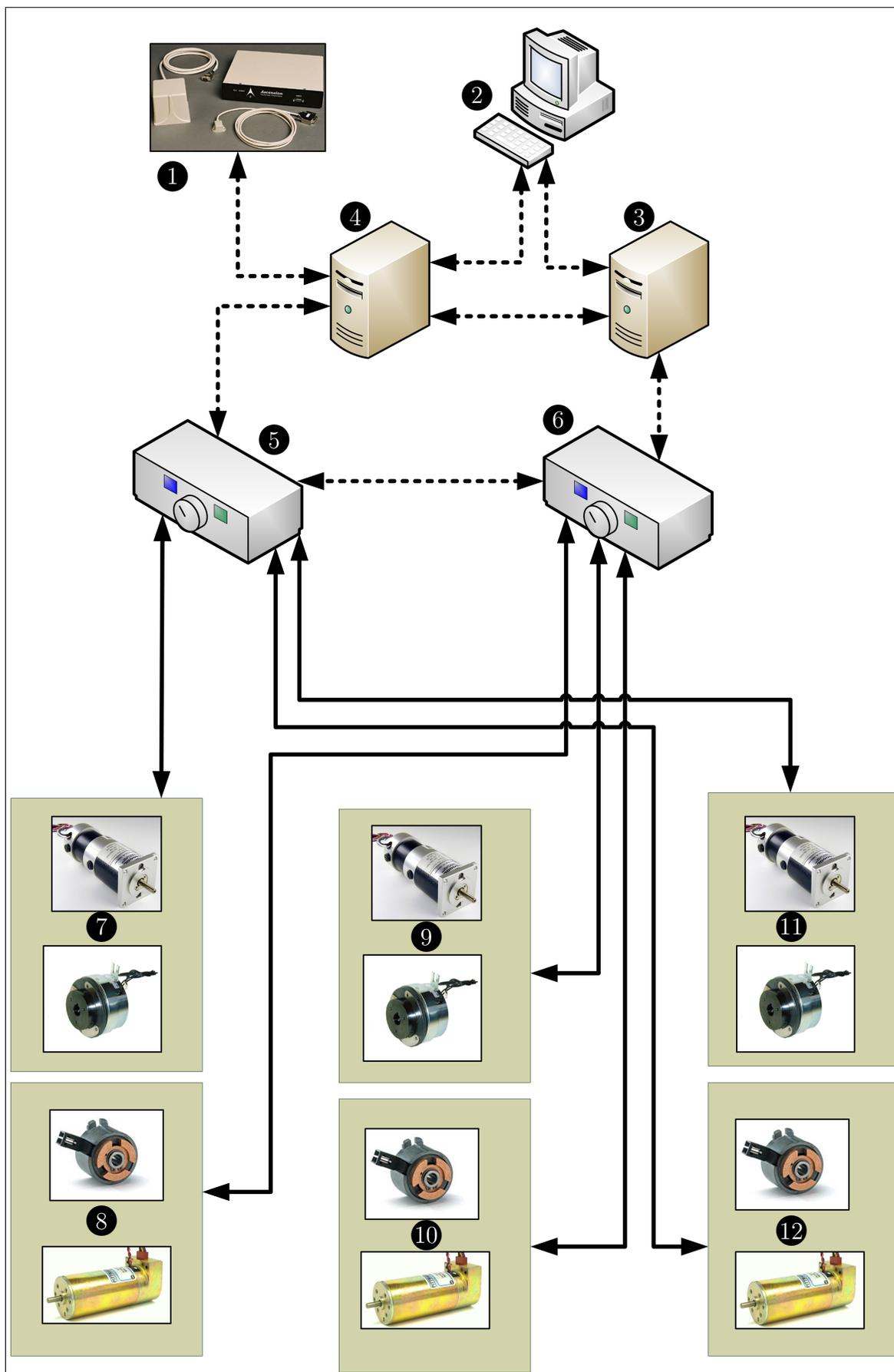


FIG. B.2: Les composantes physiques de l'interface haptique

B.2 Communication entre les noeuds et l'ordinateur

La fig. B.3 illustre bien la communication entre les deux noeuds de calcul ainsi que l'ordinateur de contrôle. On y voit les deux sous-programmes qui roulent sur les noeuds maître et esclave ainsi que le sous-programme de contrôle qui roule sur l'ordinateur de contrôle. La plupart des données sont regroupées dans des vecteurs ayant des noms comme « SC→SM » par exemple, pour identifier que le vecteur passe des données du système de contrôle (SC) au noeud maître (SM).

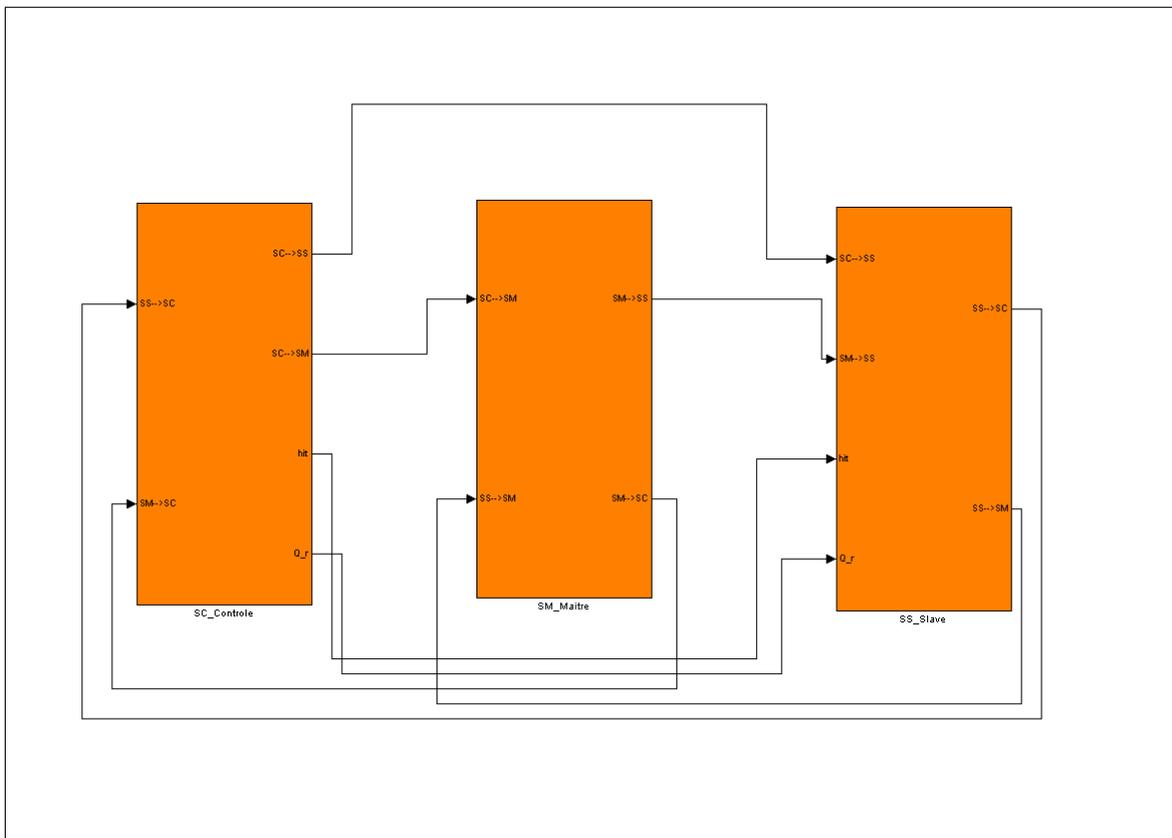


FIG. B.3: La communication entre les noeuds et l'ordinateur

B.3 Composants de l'interface de contrôle

L'interface de contrôle présenté à la fig. B.4 est exécutée sur l'ordinateur de bureau et c'est à partir de cette interface que l'on contrôle la simulation. On y trouve toutes les commandes nécessaires pour démarrer la simulation ainsi que plusieurs indicateurs numériques qui affichent quelques valeurs utiles pour le débogage. Cette interface de contrôle est aussi responsable de l'affichage de l'environnement virtuel. Deux affichages ont été développés, le premier étant un affichage de base qui montre la position et l'orientation des épées dans l'espace en utilisant des graphiques vectoriels. Cet affichage a été développé en premier sans le souci de créer un environnement virtuel détaillé. Le deuxième affichage est un peu plus évolué puisqu'il utilise des modèles 3D pour illustrer les épées ainsi que l'environnement virtuel de l'arrière-plan. Il est donc beaucoup plus détaillé que le premier.

1. Affichage numérique : utilisé principalement pour des fins de débogage.
2. Alimentation des amplificateurs/moteurs : contrôle les relais situés dans les amplificateurs.
3. Commande de vitesse pour les moteurs d'impact : utilisé pour des fins de débogage.
4. Mise à zéro de la position de l'effecteur.
5. Activation du mécanisme d'impact : Il n'est pas possible de produire des impacts lorsque cet interrupteur est ouvert.
6. Activation de la dynamique de l'épée virtuelle : La dynamique est désactivée lorsque cet interrupteur est ouvert.
7. Interface visuelle de la simulation avec Matlab Virtual Reality ToolboxTM. Voir fig. B.5 ¹.
8. Interface visuelle de la simulation de base faite avec Matlab. Voir fig. B.6.
9. Commande d'orientation pour l'épée virtuelle : Cette commande n'est plus utilisée en raison du fait que l'orientation de l'épée virtuelle est dictée par le capteur « Flock of Bird ».

¹Une licence supplémentaire est nécessaire pour ce module de MatlabTM

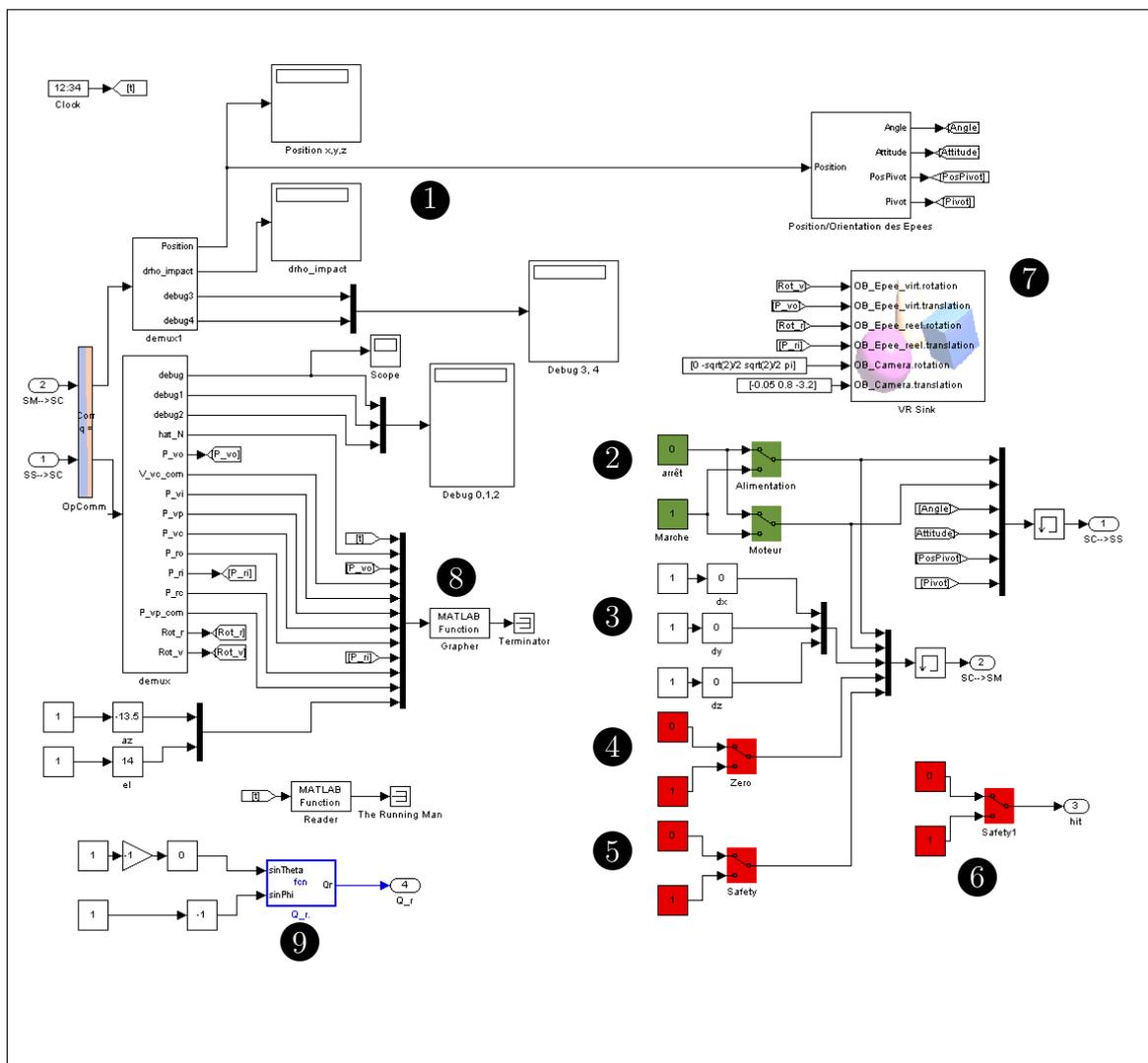


FIG. B.4: L'interface de control

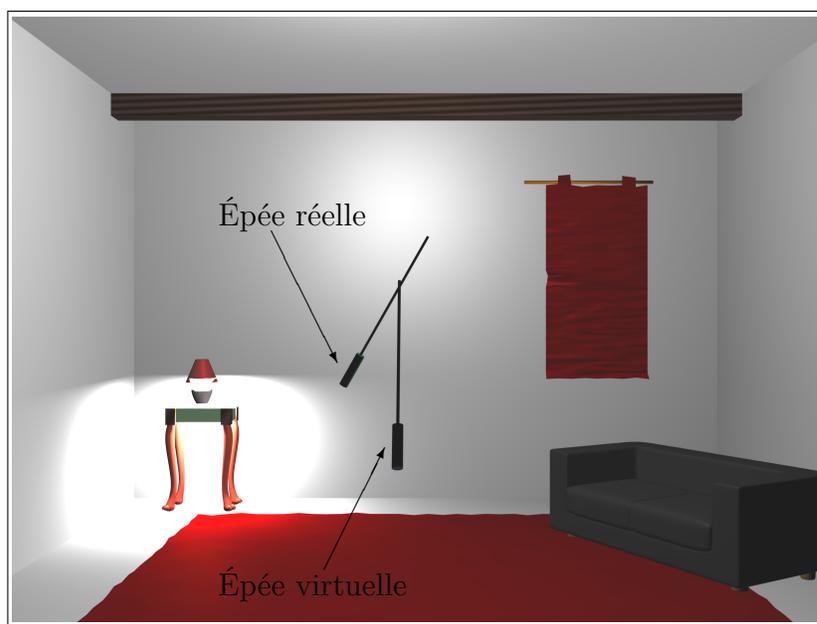


FIG. B.5: L'environnement virtuelle avec Virtual Reality ToolboxTM

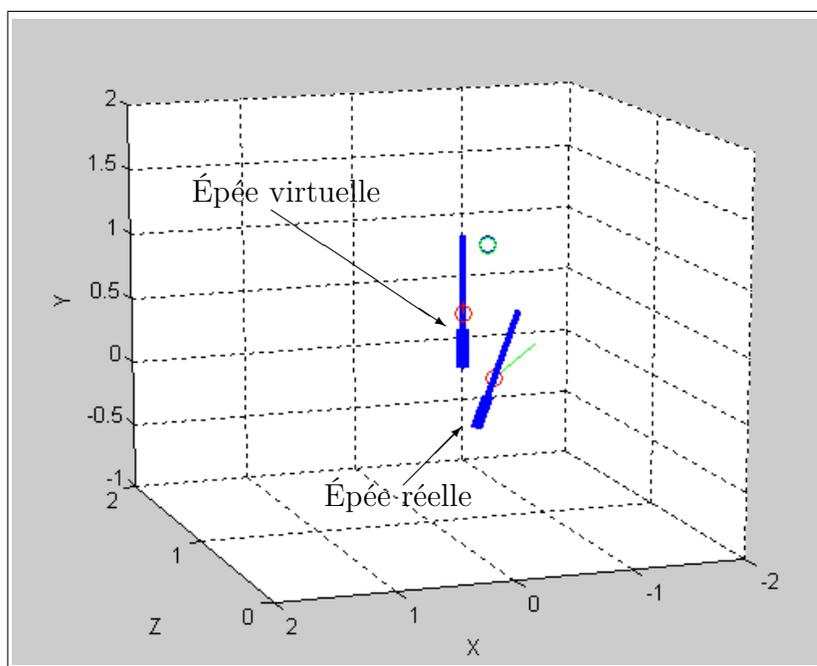


FIG. B.6: L'environnement virtuel de base fait avec MatlabTM

B.4 Composants du programme du noeud maître.

1. Bloc de programme « Logique », responsable des fonctions suivantes :
 - Régulation de la tension dans les câbles (section 3.1.2).
 - Problème géométrique direct de la position de l'effecteur virtuel (semblable à l'équation 3.2).
 - Problème géométrique direct de la vitesse mesurée de l'effecteur virtuel.
 - Problème géométrique indirect de la vitesse de l'effecteur commandée (Donne la consigne des moteurs d'impact).
 - Contrôle des impacts (sections 2.2.2 et 2.2.3).
 - Réinitialisation du mécanisme d'impact.
2. Bloc de programme «PGD» : Calcul le problème géométrique direct de la position de l'effecteur (section 3.1.1)
3. Régulateurs de types PID pour la vitesse des moteurs d'impact.
4. Lecture des encodeurs pour les moteurs A1, C1 et C2.
5. Bloc de communication pour le Flock of BirdsTM.
6. Sortie de puissance pour les groupes A1, C1 et C2.

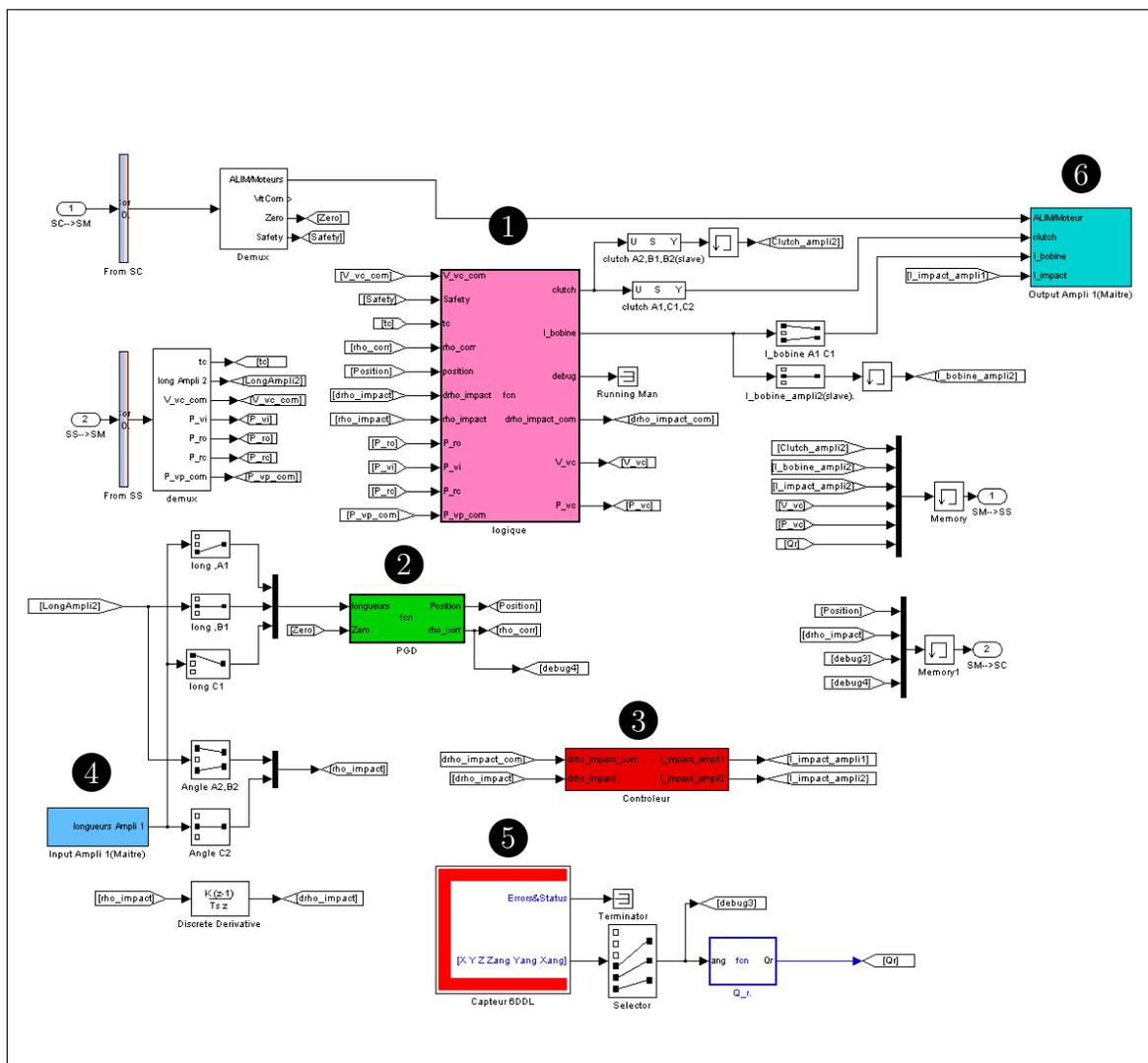


FIG. B.7: Le noed de calcul maître

B.5 Composants du programme du noeud esclave.

1. Bloc de programme « Dynamique de l'épée virtuelle ». Responsable des fonctions suivantes :
 - Le contrôle de l'orientation de l'épée virtuelle (section 3.2.1).
 - La dynamique de l'épée virtuelle (section 3.2.2).
2. Bloc de programme « Selecteur ». Ce bloc ne fait que calculer plusieurs valeurs de vitesses et de position utile pour le bloc « Dynamique de l'épée virtuelle» par exemple : \mathbf{Q}_r , \mathbf{P}_{ri} et \mathbf{V}_{ri} .
3. Lecture des encodeurs des moteurs A2, B1 et B2.
4. Sortie de puissance pour les groupes A2, B1 et B2.

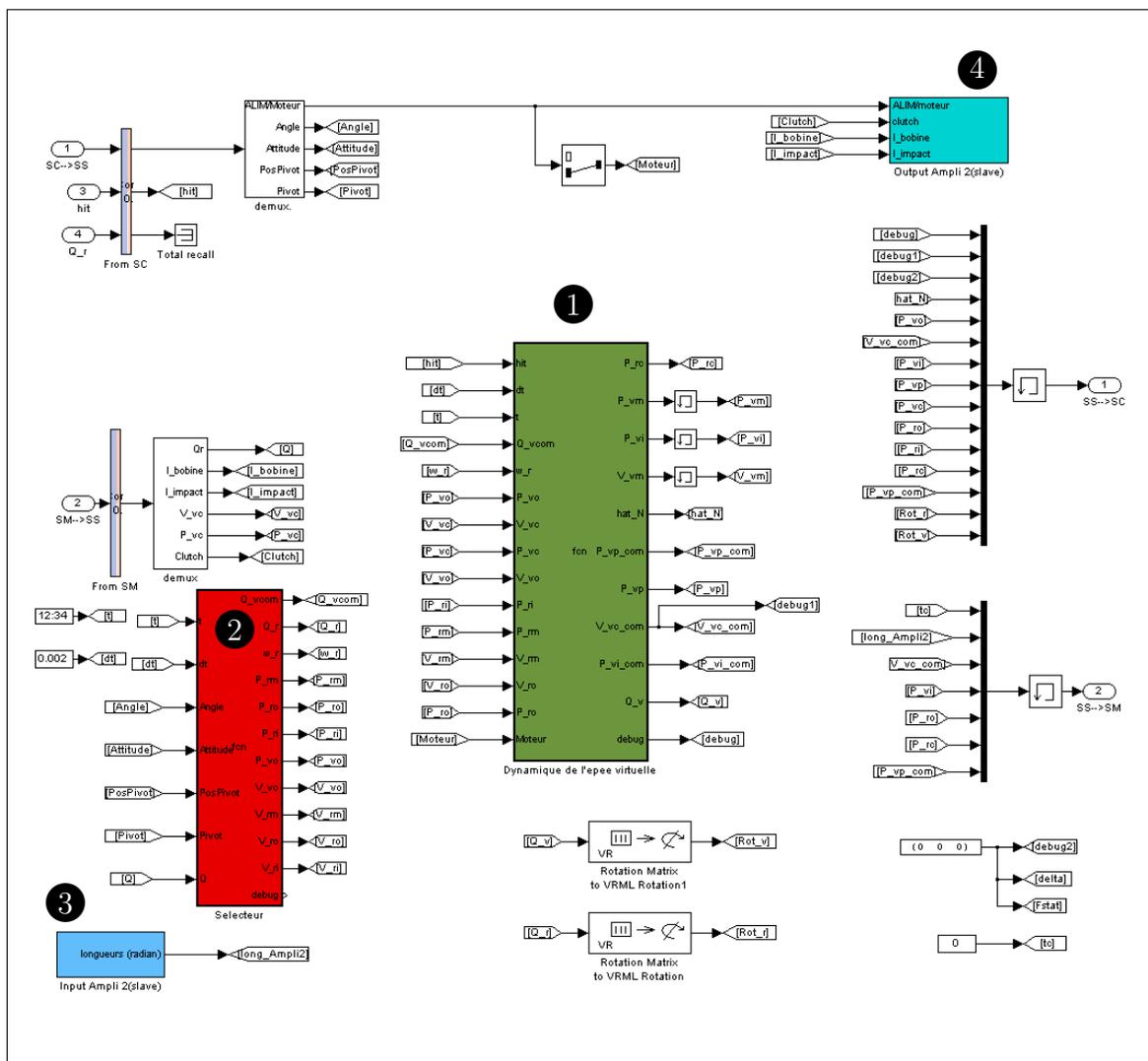


FIG. B.8: Le noeud de calcul esclave