

**Titre:** Etude d'un manipulateur gonflable  
Title:

**Auteur:** Bruno-Marie Béchard  
Author:

**Date:** 1989

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Béchard, B.-M. (1989). Etude d'un manipulateur gonflable [Master's thesis,  
Citation: Polytechnique Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/57914/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**  
Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/57914/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de  
recherche:**  
Advisors:

**Programme:** Unspecified  
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉTUDE D'UN MANIPULATEUR GONFLABLE

par

Bruno-Marie BÉCHARD

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION  
DU GRADE DE MAÎTRE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)

Décembre 1989

National Library  
of Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Canadian Theses Service    Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada  
K1A 0N4

The author has granted an irrevocable non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of his/her thesis by any means and in any form or format, making this thesis available to interested persons.

L'auteur a accordé une licence irrévocable et non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de sa thèse de quelque manière et sous quelque forme que ce soit pour mettre des exemplaires de cette thèse à la disposition des personnes intéressées.

The author retains ownership of the copyright in his/her thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without his/her permission.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège sa thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

ISBN 0-315-58161-1

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

**ÉTUDE D'UN MANIPULATEUR GONFLABLE**

présenté par: Bruno-Marie Béchard

en vue de l'obtention du grade de: Maître ès sciences appliquées

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

Monsieur André Bazergui, Ph.D., président

Monsieur Roman Baldur, M.Sc.A.

Monsieur Luc Baron, M.Sc.A.

À celle dont le support de toujours lui mérite une part de cette réussite...

## **SOMMAIRE**

Un nouveau concept consiste à munir un robot d'un bras gonflable, animé de plusieurs muscles, qui puisse allier une grande flexibilité, des mouvements souples et un poids faible. Ces caractéristiques, inhabituelles pour un robot, ouvrent de nouveaux horizons pour la robotique tels que l'inspection d'endroits difficilement accessibles, le domaine spatial et même les prothèses humaines.

Les travaux présentés dans ce mémoire consistent à développer un design opérationnel pour le manipulateur gonflable, à construire un prototype pour en évaluer les performances et à réaliser le contrôle par ordinateur du nouveau robot.

Le point de départ de cette recherche est l'étude des performances d'un prototype de départ conçu par Wolfgang Blach, étudiant au doctorat à l'École Polytechnique de Montréal. Cette analyse débouche ensuite sur la définition des objectifs et critères qui vont orienter la conception du nouveau manipulateur amélioré.

Cette conception touche trois aspects du manipulateur soit la géométrie du corps principal, la forme des muscles et le système pneumatique. Finalement, des tests préparatoires permettent de prendre les dernières décisions de design tels que les matériaux et l'arrangement des muscles, et le prototype final est construit.

Compte tenu des performances escomptées, les résultats des tests subis par le prototype final sont des plus encourageants: En plus d'éliminer les problèmes de friction, d'instabilité et de plissement du prototype de départ, la flexibilité, la compacité, la précision, la prévisibilité, la légèreté et la force du prototype final sont au-delà des objectifs et critères de design.

Maintenant qu'un design fonctionnel a été conçu et grâce à l'expérience tirée de cette recherche, il est maintenant possible de concevoir un manipulateur qui répond à des besoins spécifiques en ajustant les dimensions, les pressions et en choisissant les matériaux appropriés.

## **ABSTRACT**

A new concept consists in equipping a robot with an inflatable arm, controlled by a large number of muscles, that can combine remarkable flexibility, smooth movements, and light weight. These characteristics, unusual for a robot, open new horizons for robotics such as the inspection of areas difficult to access, the aerospace industry, and even human prosthesis. The research work presented in this thesis consists in developing an operational design for the inflatable manipulator, building a prototype to evaluate its performances, and realising the control of the new robot by computer.

The starting point of this research is the study of a first prototype designed by Wolfgang Blach, doctorate student at l'École Polytechnique de Montréal. This study is the basis for defining the objectives and criteria that will guide the design of the new improved manipulator.

The analysis of the performance of this new manipulator shows that not only the problems of friction, instability, and buckling of the first prototype are solved by the new design, but the flexibility, compactness, precision, predictability, lightness, and strength of the new manipulator are all beyond expectations.

Now that a functional design has been conceived, and with the experience acquired from this research, it is possible to build a manipulator for a specific application by adjusting the dimensions, pressures, and by selecting the appropriate materials.



## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont entouré, soutenu et encouragé durant mes travaux, et en particulier mon directeur de recherches Monsieur Roman Baldur.

Je remercie également le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG), et la compagnie Câbles Phillips Limitée pour leur soutien financier sans lequel je n'aurais pu poursuivre mes études.

Je désire de plus souligner la collaboration spéciale de Messieurs Stéphane Gagnon et Jean Paiement, étudiants aux cycles supérieurs en génie chimique, pour la réalisation du manchon étanche du corps principal du prototype final.

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	1
Le point de départ .....	2
L'évolution du nouveau design .....	8
Conception du corps principal .....	9
Conception des muscles .....	13
Conception du système pneumatique .....	21
Le prototype final .....	25
Tests préparatoires .....	26
Construction du prototype final .....	29
Le contrôle par ordinateur .....	37
L'évaluation des performances .....	39
CONCLUSION .....	49
BIBLIOGRAPHIE .....	51
ANNEXES .....	52

## **LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 3.1. Résultats des tests sur les matériaux. . . . .	26
Tableau 3.2. Résultats des tests sur les fils. . . . .	27
Tableau 5.1. Résultats des tests sur les performances. . . . .	40
Tableau A.1. Résultats des tests sur les arrangements de muscles. . . . .	84
Tableau A.2. Résultats des tests sur les amplitudes des muscles. . . . .	84
Tableau A.3. Résultats des tests sur la flexibilité. . . . .	93
Tableau A.4. Résultats des tests sur le temps de réponse maximal. . . . .	94
Tableau A.5. Résultats des tests sur la charge critique. . . . .	95

## **LISTE DES FIGURES**

Figure 1.1. Croquis du prototype de départ. . . . .	2
Figure 1.2. Effets primaire et secondaire du gonflage. . . . .	3
Figure 1.3. Principe de fonctionnement des premiers muscles. . . . .	4
Figure 1.4. Problème d'instabilité des premiers muscles. . . . .	5
Figure 1.5. Problème de friction des premiers muscles. . . . .	6
Figure 2.1. Principe de conicité du premier corps principal. . . . .	9
Figure 2.2. Solutions envisagées pour le corps principal. . . . .	11
Figure 2.3. Concept de muscle proposé. . . . .	13
Figure 2.4. Cylindres concentriques et joints circonférentiels. . . . .	14
Figure 2.5. Coupe longitudinale du cylindre (cas théorique). . . . .	15
Figure 2.6. Coupe longitudinale du cylindre (cas réel). . . . .	16
Figure 2.7. Principe de base des nouveaux muscles. . . . .	17
Figure 2.8. Plans coupant un cylindre. . . . .	18
Figure 2.9. Signification physique des variables de l'équation 13. . . . .	20
Figure 2.10. Distributeur pour contrôler les nouveaux muscles. . . . .	21
Figure 2.11. Distributeur pour contrôler les muscles antagonistes. . . . .	22
Figure 2.12. Circuit pneumatique complet recommandé. . . . .	23
Figure 3.1. Arrangements possibles de muscles. . . . .	28
Figure 3.2. Première étape de couture. . . . .	29
Figure 3.3. Fixation des ballonnets aux tubes d'alimentation. . . . .	30
Figure 3.4. Insertion des ballonnets dans les pochettes. . . . .	30
Figure 3.5. Manchon étanche du corps principal. . . . .	32
Figure 3.6. Extrémités rigides en aluminium. . . . .	33

Figure 3.7. Possibilités d'utilisation du nouveau socle cubique. . . . .	34
Figure 3.8. Socle du prototype final . . . . .	35
Figure 3.9. Circuit pneumatique complet du prototype final. . . . .	35
Figure 4.1. Circuit électrique pour un canal de contrôle. . . . .	37
Figure 5.1. Angle de flexion maximal versus pression des muscles. . . . .	41
Figure 5.2. Angle de flexion maximal versus pression du corps principal. . .	42
Figure 5.3. Temps de réponse maximal versus pression du corps principal.	43
Figure 5.4. Charge critique versus pression du corps principal. . . . .	45
Figure 5.5. Enveloppe de travail du nouveau manipulateur. . . . .	46
Figure 5.6. Dimensions typiques de l'enveloppe de travail du manipulateur.	47
Figure 5.7. Modélisation géométrique du nouveau manipulateur. . . . .	48
Figure A.1. Définition des variables et paramètres du développement. . . . .	52
Figure A.2. Tracé typique du profil d'un muscle. . . . .	55
Figure A.3. Ordinogramme du logiciel de traçage précis des muscles. . . . .	56
Figure A.4. Ordinogramme du logiciel de contrôle du manipulateur. . . . .	60
Figure A.4. (suite) . . . . .	61
Figure A.4. (suite) . . . . .	62
Figure A.4. (suite) . . . . .	63
Figure A.5. Méthode de fixation avec embouts collés. . . . .	87

## LISTE DES SYMBOLES

$\alpha$	Variable temporaire angulaire (consulter figure A.1) . . . . .	52
$\Theta_{MAX}$	Angle de flexion atteint par le gonflage d'un seul muscle . . . . .	17
$\phi$	Variable temporaire angulaire (consulter figure A.1) . . . . .	52
A	Amplitude maximale d'un muscle . . . . .	19
$A_F$	Amplitude finale d'un muscle (prototype de départ) . . . . .	3
$A_{FR}$	Amplitude finale réelle d'un muscle (prototype final) . . . . .	16
$A_{FT}$	Amplitude finale théorique d'un muscle (prototype final) . . . . .	15
$A_i$	Amplitude initiale d'un muscle (prototype final) . . . . .	14
$A_i'$	Amplitude initiale d'un muscle (prototype de départ) . . . . .	3
D	Diamètre du corps principal du manipulateur . . . . .	20
d	Variable temporaire linéaire (consulter figure A.1) . . . . .	52
$D_A$	Diamètre du corps principal conique à une position A . . . . .	10
$D_B$	Diamètre du corps principal conique à une position B . . . . .	10
$F_A$	Force de retenue du corps principal conique à une position A . . .	10
$F_B$	Force de retenue du corps principal conique à une position B . . .	10
h	Variable temporaire linéaire (consulter figure A.1) . . . . .	52
L	Longueur du corps principal manipulateur . . . . .	46
$L_i$	Longueur initiale du cylindre à paroi double . . . . .	14
N	Nombre de muscles par circonférence du corps principal . . . . .	20
p	Pression d'air dans le corps principal conique . . . . .	10
$P_C$	Pression d'air dans le corps principal (prototype final) . . . . .	40
$P_M$	Pression d'air dans les muscles (prototype final) . . . . .	40
$RCM_R$	Rapport défini par $A_{FR}$ sur $A_i$ . . . . .	16

		xiv
$RCM_{F^r}$	Rapport défini par $A_{F^r}$ sur $A_r$ . . . . .	18
$RCM_{T^r}$	Rapport défini par $A_{T^r}$ sur $A_r$ . . . . .	15
X	Abscisse pour le traçage du profil des muscles . . . . .	20
Y	Ordonnée pour le traçage du profil des muscles . . . . .	19

## **LISTE DES ANNEXES**

ANNEXE 1: Équation du profil développé des muscles . . . . .	52
ANNEXE 2: Ordinogramme du logiciel de traçage précis des muscles . . . . .	56
ANNEXE 3: Logiciel de traçage des muscles . . . . .	57
ANNEXE 4: Disquette contenant les différents logiciels . . . . .	59
ANNEXE 5: Ordinogramme du logiciel de contrôle du manipulateur . . . . .	60
ANNEXE 6: Logiciel de contrôle du manipulateur . . . . .	64
ANNEXE 7: Expérimentation sur le prototype de départ . . . . .	77
ANNEXE 8: Expérimentation sur les matériaux et les fils . . . . .	80
ANNEXE 9: Expérimentation sur le prototype de test . . . . .	82
ANNEXE 10: Expérimentations supplémentaires . . . . .	86
ANNEXE 11: Expérimentation sur le prototype final . . . . .	90



## INTRODUCTION

L'évolution sans répit de la technologie pose de nouveaux défis aux concepteurs de robots. Afin de prendre la relève dans certaines situations trop dangereuses ou exigeantes pour l'homme, des robots dotés de caractéristiques bien particulières doivent être développés.

Un nouveau concept consiste à munir un robot d'un bras gonflable, animé de plusieurs muscles, qui puisse allier une grande flexibilité, des mouvements souples et un poids faible. Ces caractéristiques, inhabituelles pour un robot, permettent d'entrevoir de nouveaux horizons pour la robotique tels que l'inspection d'endroits difficilement accessibles, le domaine spatial et même les prothèses humaines.

Ce travail consiste donc à développer un design opérationnel pour le manipulateur gonflable, à construire un prototype pour en évaluer les performances et à réaliser le contrôle par ordinateur du nouveau robot.

# **CHAPITRE PREMIER**

## **Le point de départ**

Le point de départ de cette recherche est l'étude d'un prototype de départ conçu par Wolfgang Blach, étudiant au doctorat à l'École Polytechnique de Montréal<sup>1</sup>. Le but de cette étude est d'évaluer les performances de ce manipulateur innovateur et d'en déceler les points faibles afin de l'améliorer. Le corps principal du prototype de départ, d'une longueur de 1m80, est légèrement conique: son diamètre est de 300mm à la base et de 200mm à l'extrémité. Conçu en vinyle renforcé de fibres, le corps principal renferme trois manchons étanches de vinyle clair et supporte les muscles. Un croquis du manipulateur est présenté à la figure 1.1.

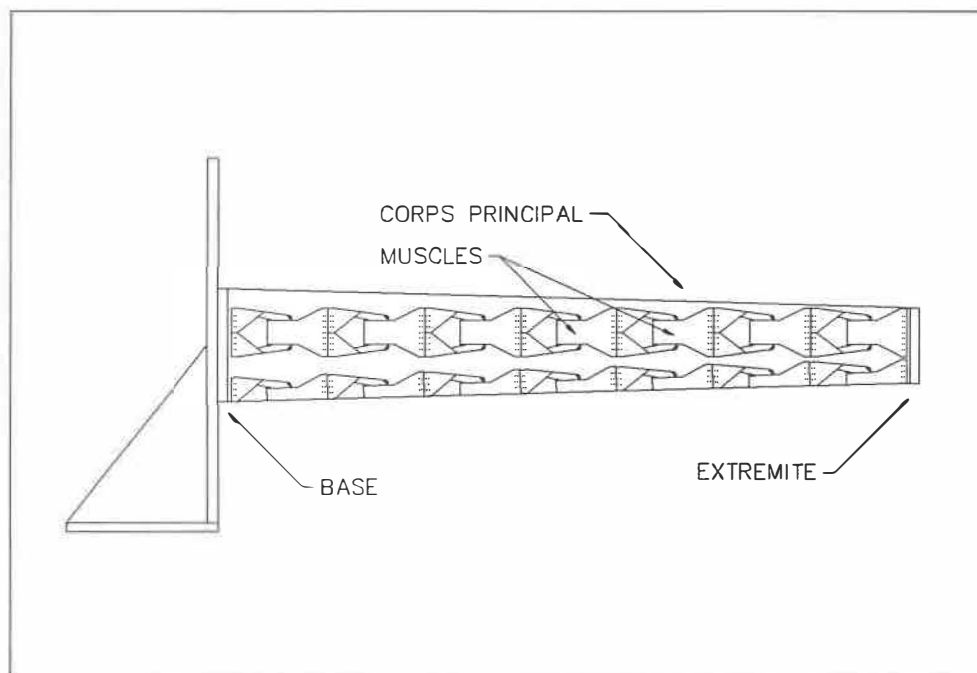


Figure 1.1. Croquis du prototype de départ.

<sup>1</sup> Consulter les références bibliographiques 1 et 2.

Les vingt-et-un muscles du manipulateur sont disposés en sept étages (trois muscles par circonférence). Chaque muscle est constitué d'un ballonnet de caoutchouc inséré dans une pochette de vinyle renforcé qui est elle-même glissée entre deux tendons de néoprène renforcé et fixée en place par quatre vis. Le principe à la base de ce design consiste à utiliser l'effet primaire du gonflage (élongation) des ballonnets pour pousser sur les tendons qui tirent sur la paroi du corps principal. La figure 1.2 illustre les effets primaire et secondaire du gonflage et la figure 1.3 démontre comment les tendons utilisent l'effet primaire du gonflage pour contracter les muscles de l'amplitude initiale  $A_i$  à l'amplitude finale  $A_f$ .

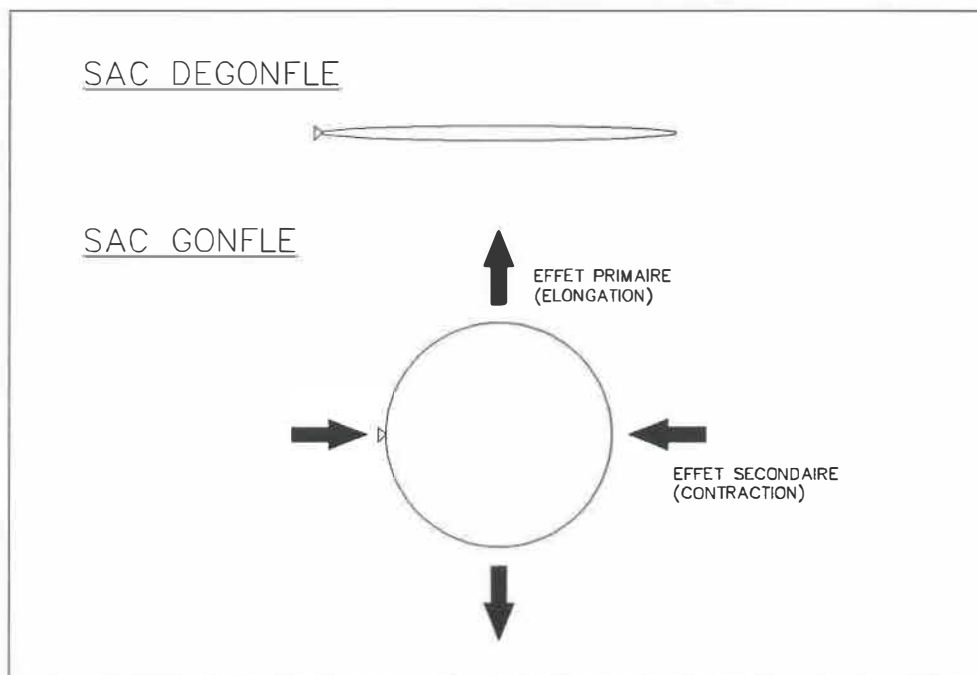


Figure 1.2. Effets primaire et secondaire du gonflage.

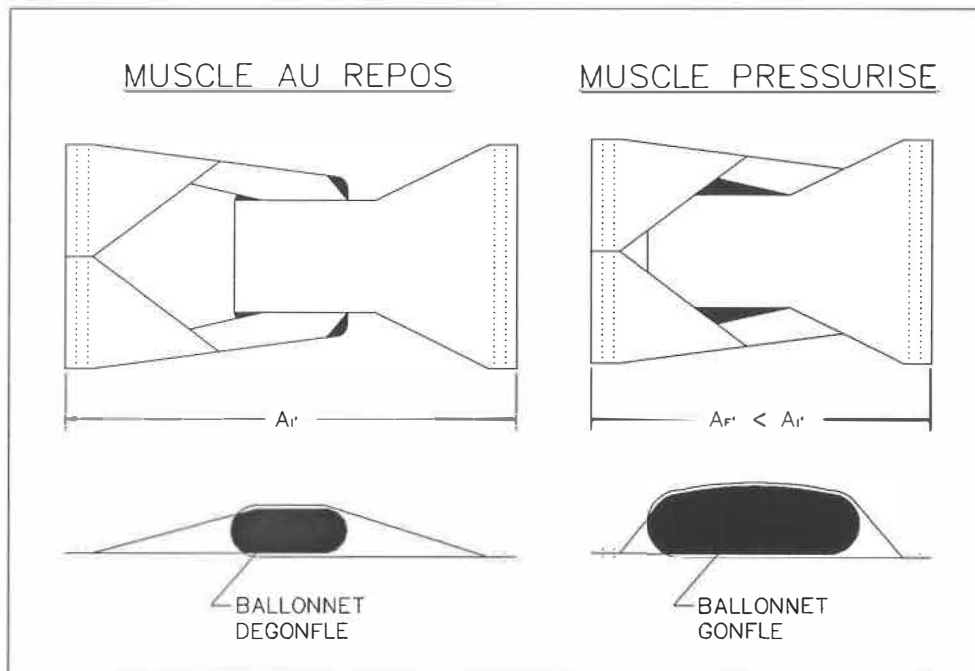


Figure 1.3. Principe de fonctionnement des premiers muscles.

Après l'expérimentation décrite à l'annexe 7, les pressions d'opération sont évaluées à 10kPa pour les manchons étanches du corps principal et à 175kPa pour les muscles. Dans ces conditions de pression et avec les muscles généreusement lubrifiés, le manipulateur démontre une flexibilité de près de 100° de repli sur lui-même mais accuse les problèmes suivants:

- Les muscles sont instables: les ballonnets ont tendance à sortir latéralement des tendons lors de leur mise sous pression.

- Un important problème de friction<sup>1</sup> entre les tendons exige une lubrification constante et abondante des muscles pour permettre les mouvements du manipulateur.
- Les ballonnets des muscles présentent une source de danger puisqu'ils doivent être utilisés près de leur pression d'éclatement (environ 200kPa)<sup>2</sup> pour arriver à plier convenablement le corps principal.
- Le poids important du manipulateur nécessite que le diamètre du corps principal soit considérable afin d'obtenir une rigidité suffisante pour soutenir la structure.

Parmi ces problèmes, l'instabilité des muscles ainsi que la présence de friction sont de première importance et justifient le développement d'un nouveau design plus pratique, fiable et sécuritaire.

L'instabilité des muscles se produit puisque de façon générale les tendons ne sont pas parfaitement alignés lors de la mise sous pression des muscles. Les forces alors engendrées par le gonflage tendent à expulser les ballonnets hors des tendons et à provoquer leur explosion. Ce phénomène est illustré à la figure 1.4.

---

<sup>1</sup> Consulter la référence bibliographique 2.

<sup>2</sup> Consulter l'annexe 7.

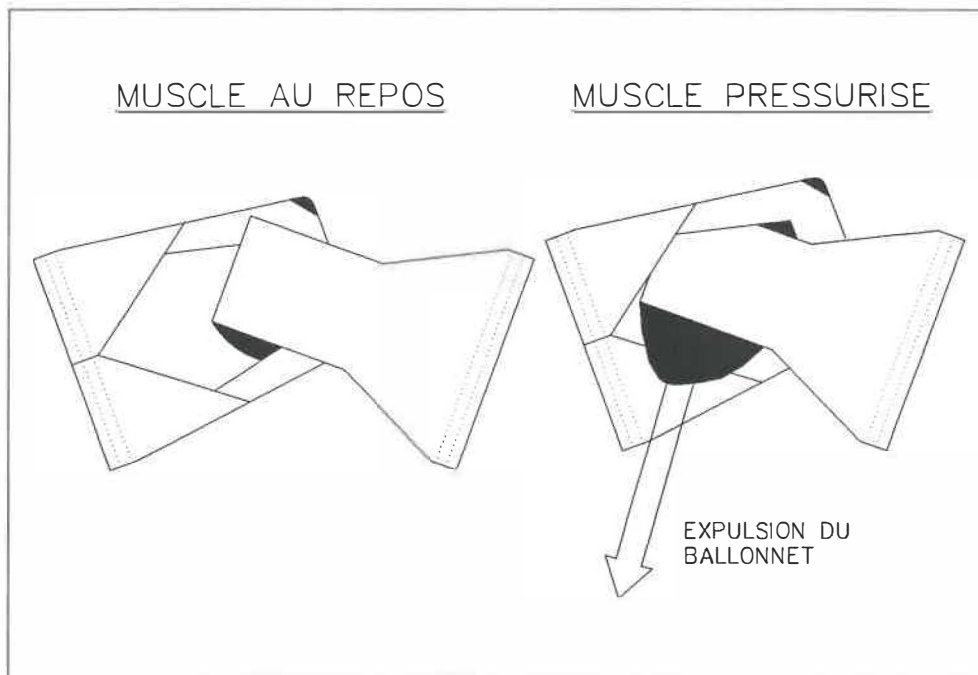


Figure 1.4. Problème d'instabilité des premiers muscles.

Le problème de friction, quant à lui, rend difficile le glissement relatif des tendons lorsque les ballonnets des muscles sont pressurisés. En effet, les pressions alors exercées par le ballonnet et le corps principal sur les tendons augmentent considérablement la friction entre les tendons eux-mêmes et réduisent leur déplacement relatif de façon significative. Selon les tests<sup>1</sup>, la flexibilité du manipulateur est réduite de 70% si les tendons ne sont pas continuellement lubrifiés par de grandes quantités de poudre de talc. Le problème est illustré à la figure 1.5.

---

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 7.

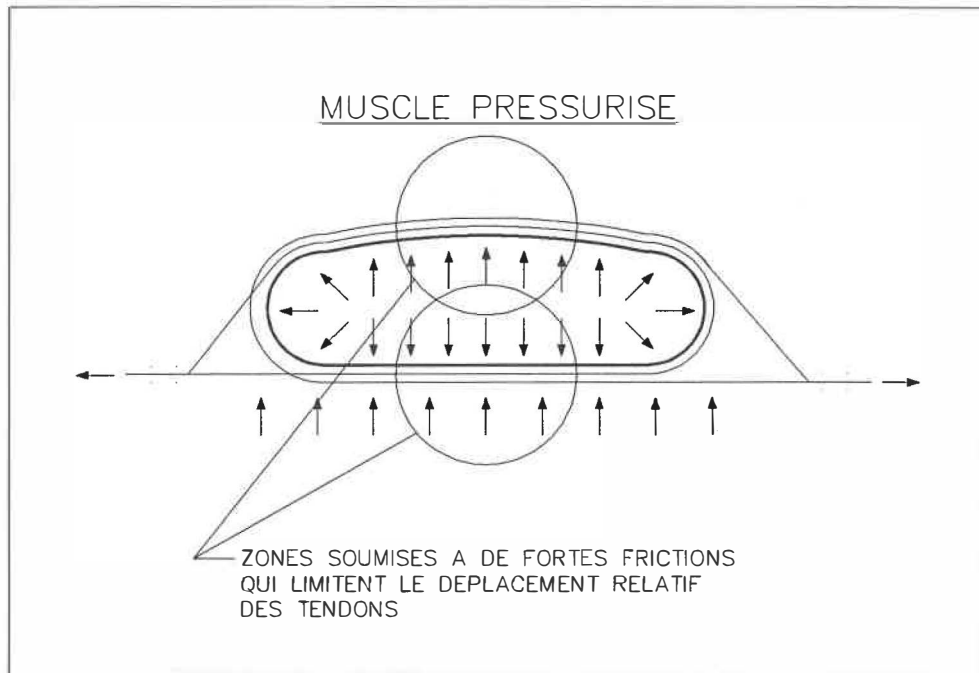


Figure 1.5. Problème de friction des premiers muscles.

Ces observations sur le prototype de départ vont maintenant servir à orienter l'évolution du nouveau design qui fait l'objet du chapitre suivant.

## **CHAPITRE DEUXIÈME**

### **L'évolution du nouveau design**

À la lumière de l'étude des performances du prototype de départ, les objectifs à atteindre dans le développement du nouveau design se résument ainsi:

- La construction ne doit comporter aucune pièce structurale rigide autre que les extrémités.
- Les muscles doivent être stables.
- Les muscles doivent fonctionner sans apport de lubrification.
- L'utilisation du manipulateur doit être sécuritaire.

De plus, le nouveau manipulateur doit montrer une flexibilité au moins comparable à celle obtenue avec le prototype de départ (100° de repli sur lui-même) et sa complexité de construction et son poids doivent être maintenus au minimum.

Ces objectifs et critères vont orienter la conception du manipulateur qui sera divisée en trois parties: la conception du corps principal, des muscles et du système pneumatique.



## PREMIÈRE PARTIE

### Conception du corps principal

La forme conique du corps principal du prototype de départ a pour but de donner à la structure une rigidité décroissante en fonction de la distance par rapport à la base. Cette caractéristique permet de compenser pour le poids du manipulateur dans l'éventualité où il est utilisé en porte-à-faux. Ce principe est illustré à la figure 2.1.

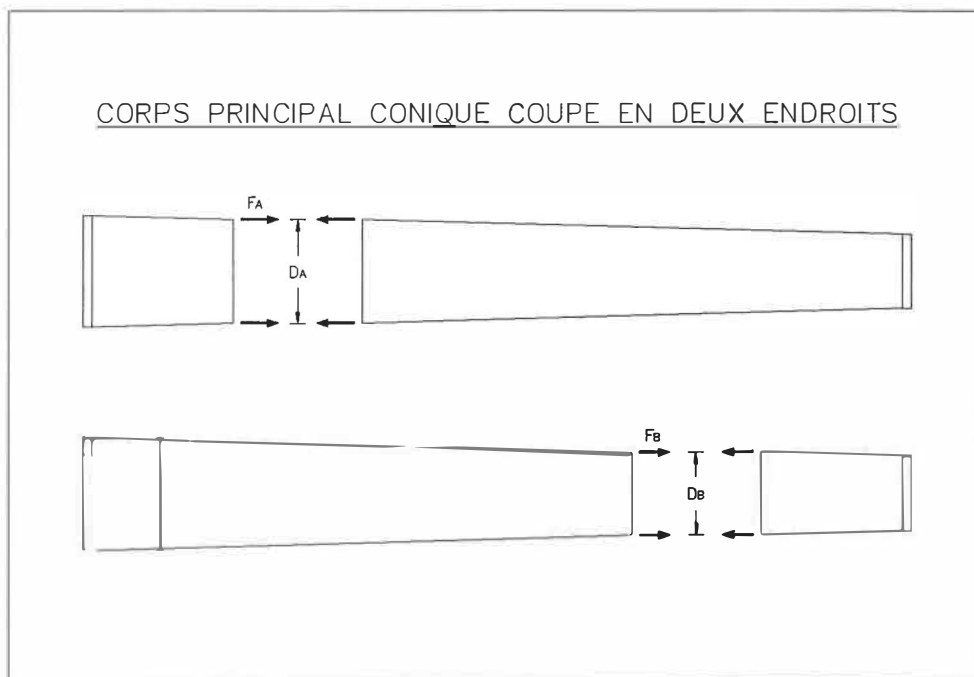


Figure 2.1. Principe de conicité du premier corps principal.

Ainsi, si le corps principal, gonflé à une pression  $p$ , est coupé près de sa base à un endroit où son diamètre égale  $D_A$ , la force  $F_A$  qui retient les deux parties s'exprime

$$F_A = \frac{p \pi D_A^2}{4} . \quad (1)$$

De même, si le même corps principal dans les mêmes conditions est coupé près de son extrémité à un endroit où son diamètre égale  $D_B$ , la force  $F_B$  qui retient les deux parties s'exprime

$$F_B = \frac{p \pi D_B^2}{4} . \quad (2)$$

Donc, puisque

$$D_A > D_B \quad (3)$$

et que la pression interne  $p$  est uniforme, il appert que

$$F_A > F_B . \quad (4)$$

De la même façon, il est possible de prouver que la relation entre les forces par unité de longueur aux deux endroits de coupure s'exprime

$$\frac{F_A}{\pi D_A} > \frac{F_B}{\pi D_B} \quad (5)$$

car en substituant (1) et (2) dans (5) on obtient, après simplification,

$$D_A > D_B \quad (6)$$

ce qui est une donnée déjà énoncée en (3).

Cette solution, quoique théoriquement valable, s'avère peu adéquate lors des essais et montre les inconvénients suivants:

- La complexité de réalisation est largement accrue.
- La flexion du corps principal par les muscles est différente à chaque étage à cause des diamètres différents.
- Le degré de conicité doit être calculé selon le poids des matériaux utilisés.

D'autres solutions conçues pour rigidifier la base du manipulateur sont illustrées à la figure 2.2. Elles ont pour but d'amoinrir les faiblesses du prototype de départ tout en déplaçant le point de flexion maximale de la base vers l'extrémité du corps principal.

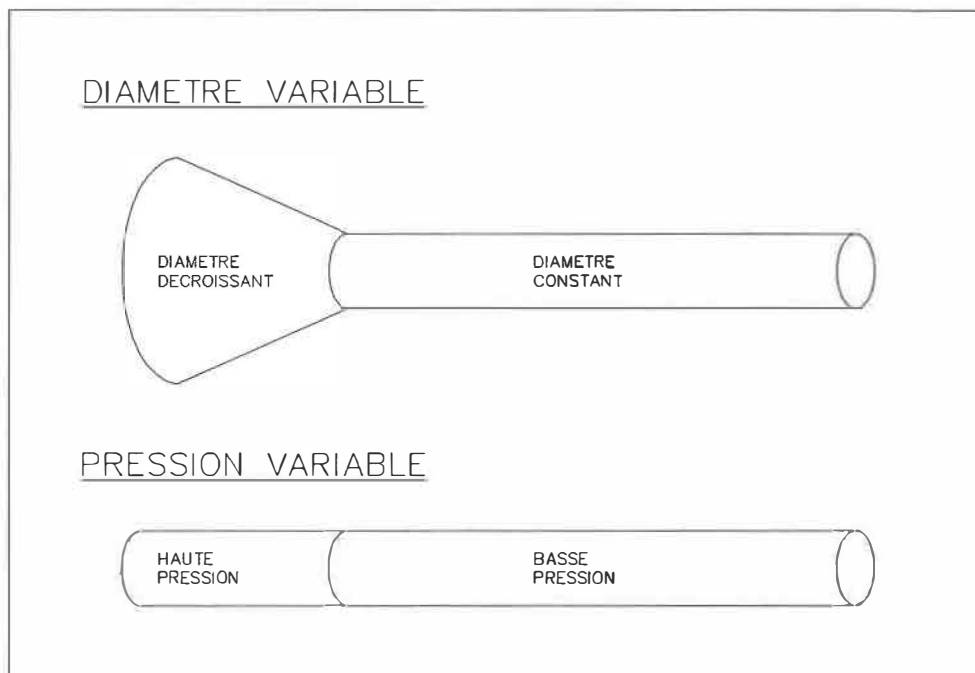


Figure 2.2. Solutions envisagées pour le corps principal.

Toutefois, pour le nouveau design, le cylindre droit à pression uniforme est retenu pour des raisons de simplicité et pour permettre un comportement similaire des muscles des différents étages. De plus, à cause du souci de ramener le manipulateur à un poids plus faible, l'importance de la conicité requise est maintenant très réduite. Aussi, l'utilisation du manipulateur à la verticale (suspendu ou érigé) répond mieux à la tendance actuelle en robotique qui permet d'élargir le plan de la zone de travail des robots. Dans ces conditions, la conicité du corps principal du manipulateur devient pratiquement inutile.

## DEUXIÈME PARTIE

### Conception des muscles

Tel que vu au dernier chapitre, utiliser l'effet primaire du gonflage des ballonnets des muscles requiert qu'un système mécanique, en l'occurrence les tendons, transforme le mouvement d'élongation des ballonnets en mouvement de contraction. C'est ce système qui, en plus d'être instable, cause les problèmes de friction qui limitent la puissance et la flexibilité du manipulateur.

Une solution prometteuse, basée sur l'utilisation de l'effet secondaire du gonflage (contraction), consiste à intégrer les ballonnets des muscles à même la paroi double du corps principal. Cette solution, illustrée à la figure 2.3, évite les problèmes de friction et est essentiellement stable.

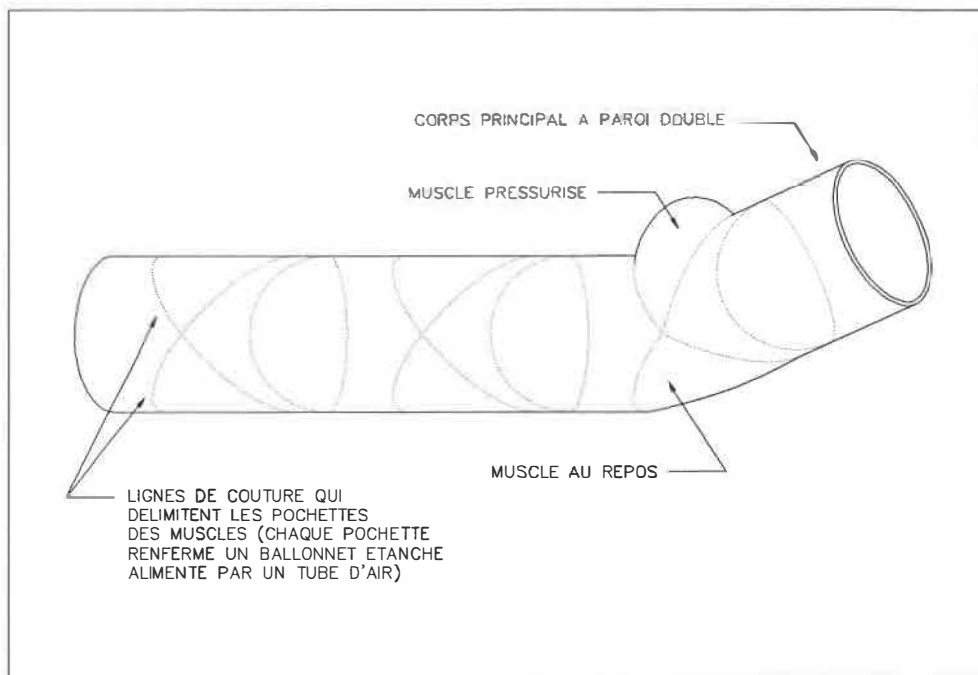


Figure 2.3. Concept de muscle proposé.

Afin d'évaluer théoriquement les performances de ce nouveau design, on étudie l'effet secondaire du gonflement. On considère un cylindre à paroi double de longueur  $L$  fait d'un matériau souple dont les parois sont reliées par deux joints hermétiques circonférentiels distants de  $A$ , tel que montré à la figure 2.4. Pour faire une analyse unidimensionnelle du phénomène, on considère que  $L$  et le diamètre du cylindre sont très grands par rapport à  $A$  (au moins 4 fois plus grands), et on néglige les effets de plissement et d'étirement du matériau. La mise sous pression de la pochette délimitée par les deux joints entraîne alors la formation d'un tore circulaire. À la figure 2.5, une coupe longitudinale du cylindre à double paroi montre les formes initiale et finale de la pochette.

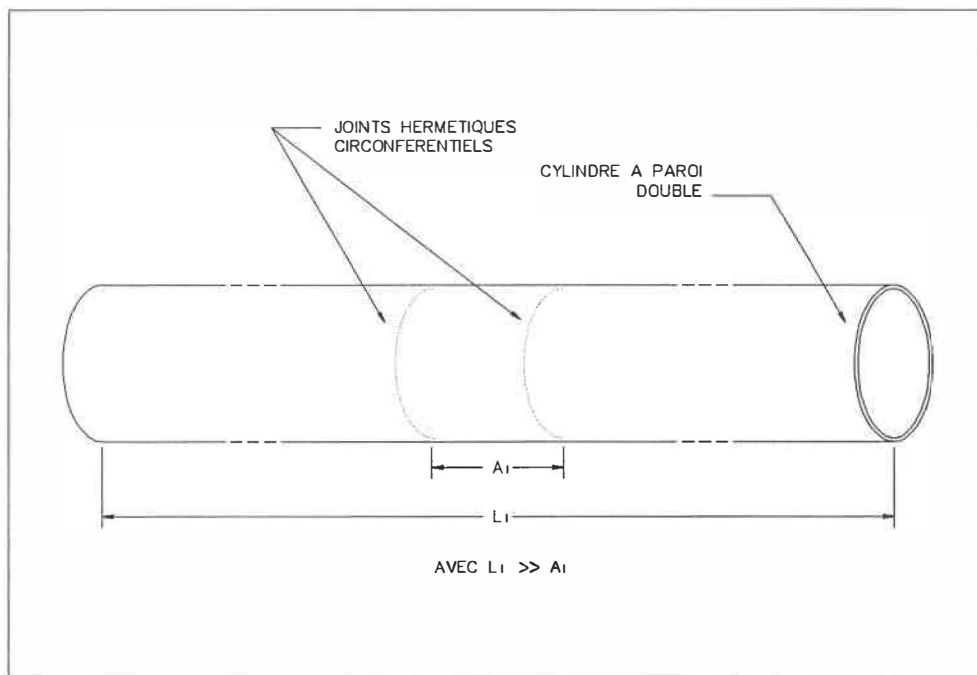


Figure 2.4. Cylindres concentriques et joints circonférentiels.

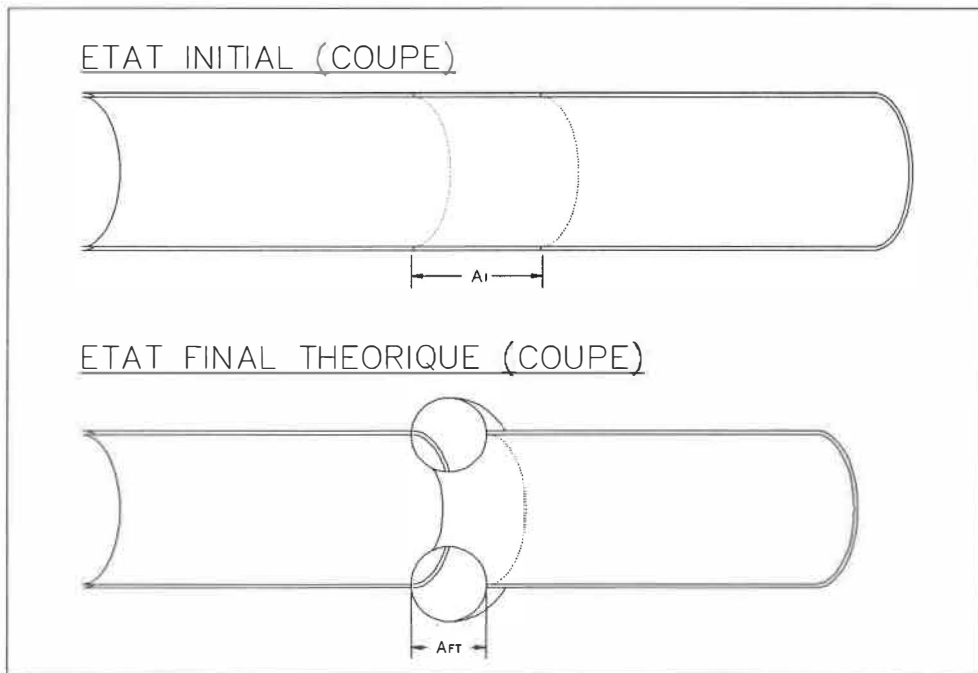


Figure 2.5. Coupe longitudinale du cylindre (cas théorique).

Il s'agit maintenant de déterminer la relation entre l'amplitude initiale  $A_I$  et l'amplitude finale théorique  $A_{FT}$  de la pochette. Si on considère que le matériau est inextensible dans le sens longitudinal, il appert que  $A_I$  égale le demi-périmètre du cercle de diamètre  $A_{FT}$ , soit

$$A_I = 0,5 \pi A_{FT} . \quad (7)$$

Dans ce cas, le rapport de contraction maximale théorique  $RCM_T$  défini par

$$RCM_T = \frac{A_{FT}}{A_I} \quad (8)$$

égale

$$RCM_T = 0,64 \quad (9)$$

et s'applique si la forme obtenue lors du gonflage est un tore circulaire. Puisque le cylindre principal doit être gonflé pour se supporter, sa paroi est soumise à une certaine tension longitudinale. Le tore obtenu lors du gonflage est donc déformé pour assurer l'équilibre des forces, et l'amplitude finale réelle  $A_{FR}$  sera plus grande que la valeur théorique  $A_{FT}$ , tel qu'illustré à la figure 2.6. L'équation 8 devient donc

$$RCM_R = \frac{A_{FR}}{A_i} \quad (10)$$

ce qui exprime le rapport de contraction maximale réel  $RCM_R$  du nouveau design, soit

$$RCM_R \geq 0,64 . \quad (11)$$

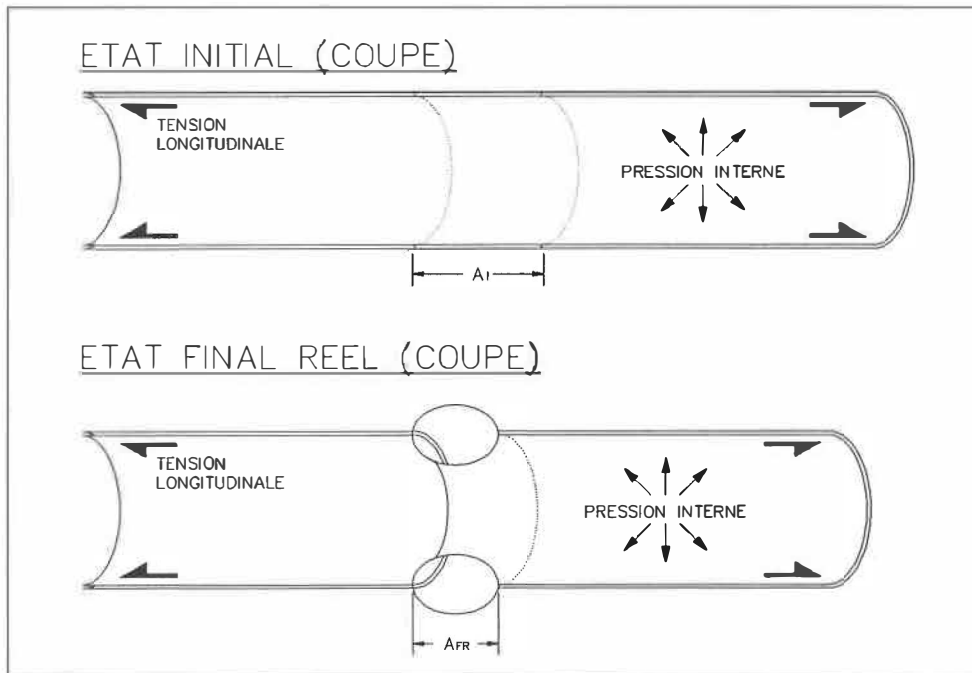


Figure 2.6. Coupe longitudinale du cylindre (cas réel).



Si maintenant la pochette circonférentielle est divisée en deux éléments par deux joints longitudinaux diamétralement opposés, le gonflage partiel ou total d'un élément fait fléchir le cylindre principal d'un angle pouvant atteindre  $\Theta_{MAX}$  dans une direction, alors que le gonflage de l'autre élément cause le mouvement inverse. Il s'agit là du principe même à la base du nouveau design des muscles, tel que montré à la figure 2.7.

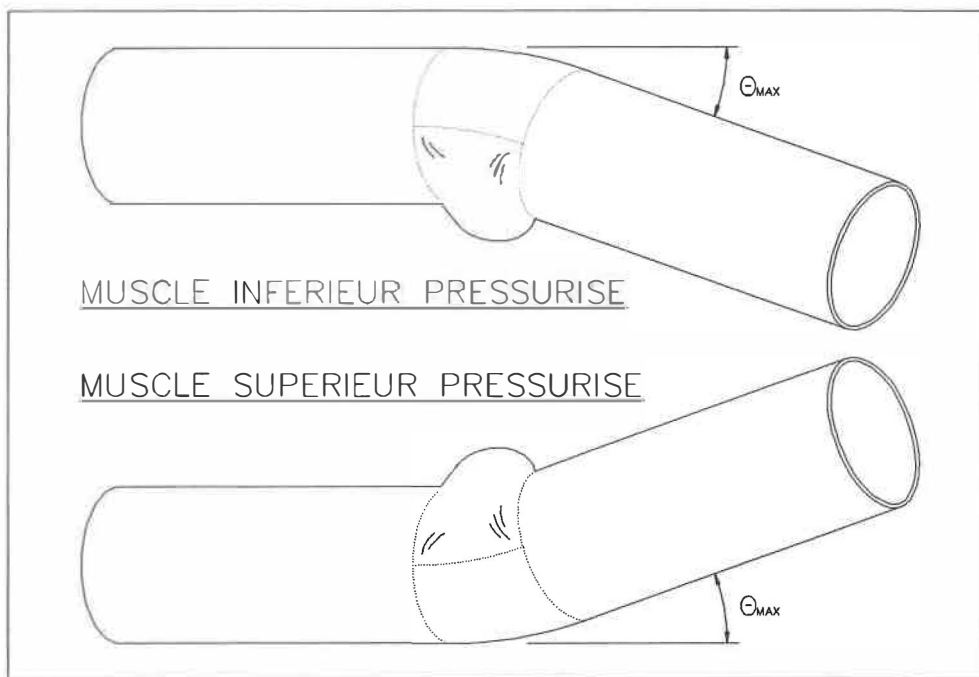


Figure 2.7. Principe de base des nouveaux muscles.

Il est maintenant facile de comprendre l'importance de la valeur du rapport de contraction maximale réel  $RCM_R$  défini en (10). En effet, plus ce rapport est faible, plus l'angle de flexion maximal  $\Theta_{MAX}$  du corps principal causé par le gonflage du muscle est important. Il est à noter que la valeur calculée pour

le nouveau design est comparable aux résultats expérimentaux obtenus avec les muscles du prototype de départ dans les meilleures conditions, soit

$$RCM_{R} \approx 0,73^1 . \quad (12)$$

Afin de mieux distribuer les forces engendrées par le gonflage des muscles sur le bras et d'éviter la formation de plis, les nouveaux muscles doivent être conçus avec une forme bien particulière. De plus, le développement du nouveau design doit permettre de diviser la circonférence du corps principal en 2, 3 ou 4 muscles. De cette façon, chaque étage de muscle peut compter 3, 4 ou 2 fois 2 muscles pour permettre des mouvements dans toutes les directions en combinant l'effet de un ou plusieurs muscles à la fois.

Le design du profil des nouveaux muscles est basé sur le fait que, tel que montré en (9), le rapport de contraction maximale théorique  $RCM_{T}$  d'une section d'un muscle égale une constante qui ne dépend pas de l'amplitude initiale  $A_i$  de ce muscle. Cette caractéristique permet de supposer que si un muscle est délimité par l'intersection du corps principal avec deux plans symétriques par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe du corps principal, chacune des deux lignes de couture qui délimitent le muscle ne sera pas déformée lors du gonflage et demeurera contenue dans un plan. Ce principe est montré à la figure 2.8.

---

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 7.

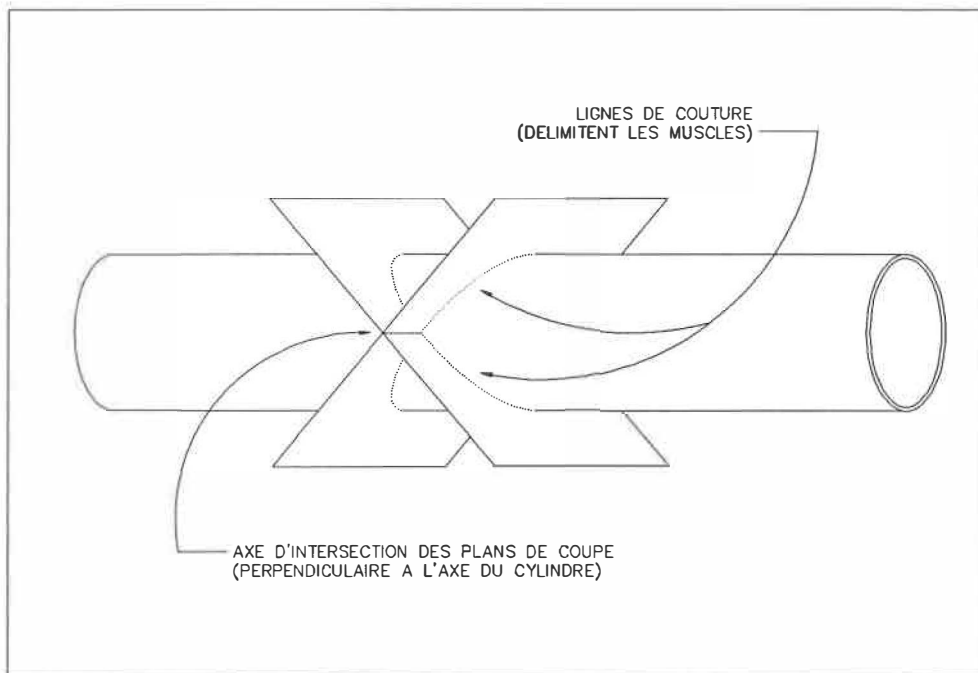


Figure 2.8. Plans coupant un cylindre.

Le développement soumis à l'annexe 1 permet d'établir l'équation qui décrit la géométrie du profil des muscles sur le corps principal développé, soit

$$Y = \frac{A \left( \cos \frac{2X}{D} - \cos \frac{\pi}{N} \right)}{2 \left( 1 - \cos \frac{\pi}{N} \right)} \quad (13)$$

avec

$$-\frac{\pi D}{2N} \leq X \leq \frac{\pi D}{2N}$$

et

$$N \geq 2$$

où les variables sont

Y pour l'ordonnée du profil (sens longitudinal du corps principal)

A pour l'amplitude maximale du muscle

X pour l'abscisse du profil (sens circonférentiel du corps principal)

D pour le diamètre du corps principal du manipulateur

N pour le nombre de muscles par circonférence

et les cosinus sont évalués pour des angles exprimés en radians. La figure 2.9 illustre la signification physique de ces variables.

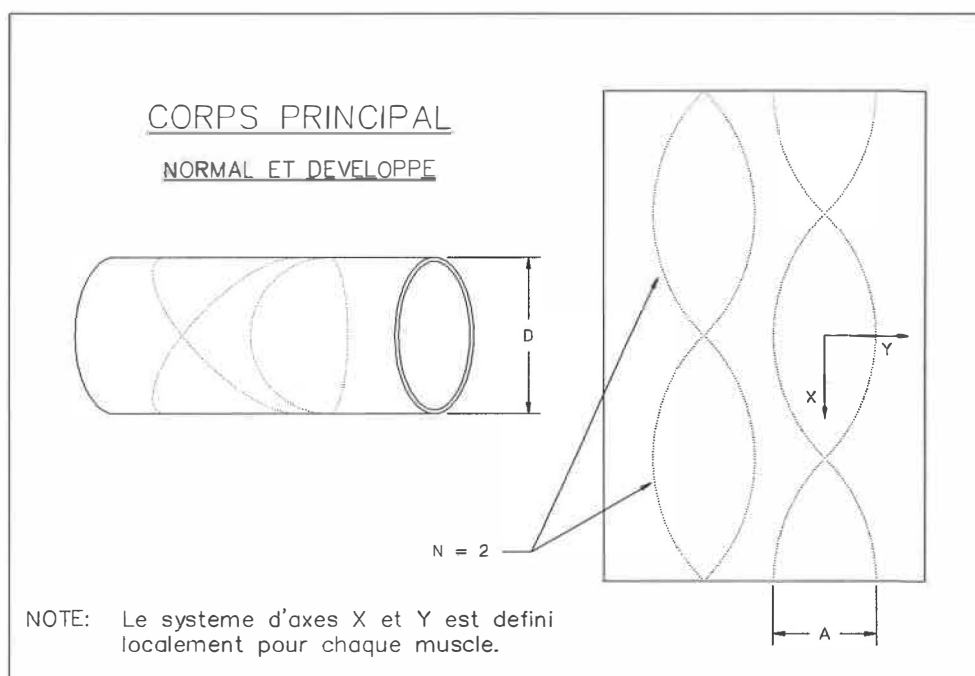


Figure 2.9. Signification physique des variables de l'équation 13.

L'équation 13 peut maintenant être utilisée pour tracer les patrons nécessaires à la réalisation du manipulateur. Un logiciel écrit en langage BASIC permet de faire le traçage de façon précise selon les valeurs désirées pour le diamètre D, l'amplitude A et le nombre de muscles N. Un ordinogramme du logiciel est soumis à l'annexe 2, une liste des instructions BASIC est incluse à l'annexe 3, et les fichiers source et compilé sont fournis sur disquette à l'annexe 4.

## TROISIÈME PARTIE

### Conception du système pneumatique

Afin d'exploiter toute la flexibilité qu'offre le nouveau manipulateur, chaque muscle doit pouvoir être gonflé partiellement ou totalement, maintenu pressurisé et dégonflé individuellement. Pour ce faire, chaque muscle doit être relié à un distributeur pneumatique à 3 voies et 3 positions, tel que montré à la figure 2.10.

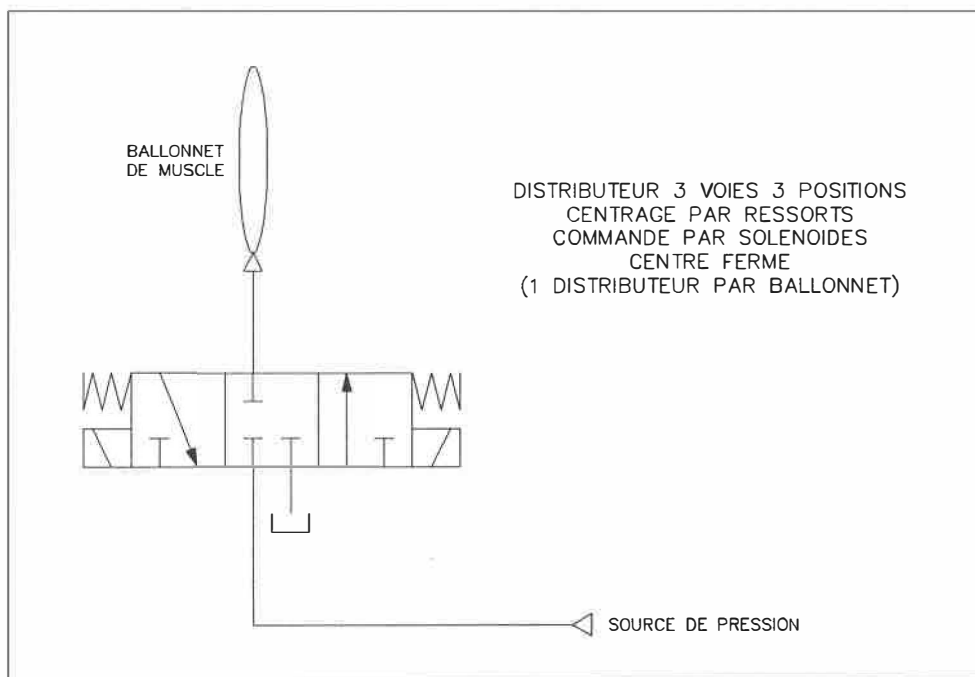


Figure 2.10. Distributeur pour contrôler les nouveaux muscles.

Il est également possible, dans le cas où les muscles sont utilisés par paires (N pair), de mettre à profit l'effet antagoniste des muscles et d'utiliser un distributeur à 4 voies et 3 positions pour chaque paire de muscles (voir la figure 2.11). Avec cette option, le nombre de distributeurs requis ainsi que la complexité du circuit électrique de commande sont réduits de moitié. Cependant, un système supplémentaire de remise à zéro doit être prévu pour permettre le dégonflage simultané de tous les muscles du manipulateur.

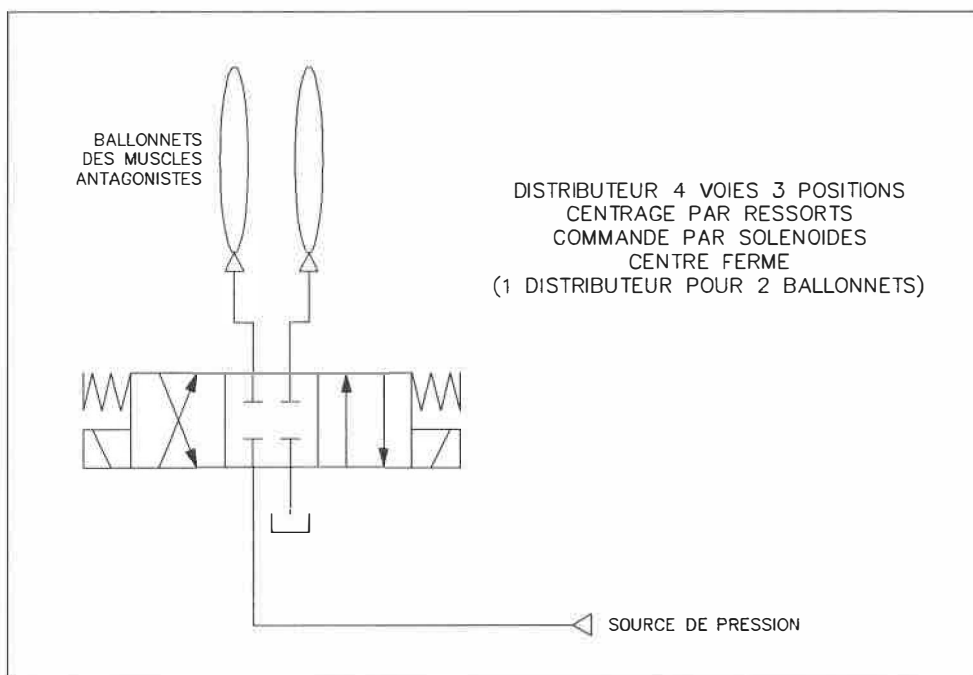


Figure 2.11. Distributeur pour contrôler les muscles antagonistes.

Le circuit pneumatique doit également comporter un sous-circuit de basse pression pour alimenter le corps principal, afin de maintenir sa rigidité.

Finalement, des limiteurs de pression de sécurité doivent être installés afin de s'assurer que les pressions dans le circuit ne s'approchent pas des pressions d'éclatement des ballonnets ou du corps principal. Ainsi, un facteur de sécurité d'au moins 2,0 doit être utilisé pour demeurer sécuritaire. Un schéma du circuit pneumatique complet recommandé est montré à la figure 2.12.

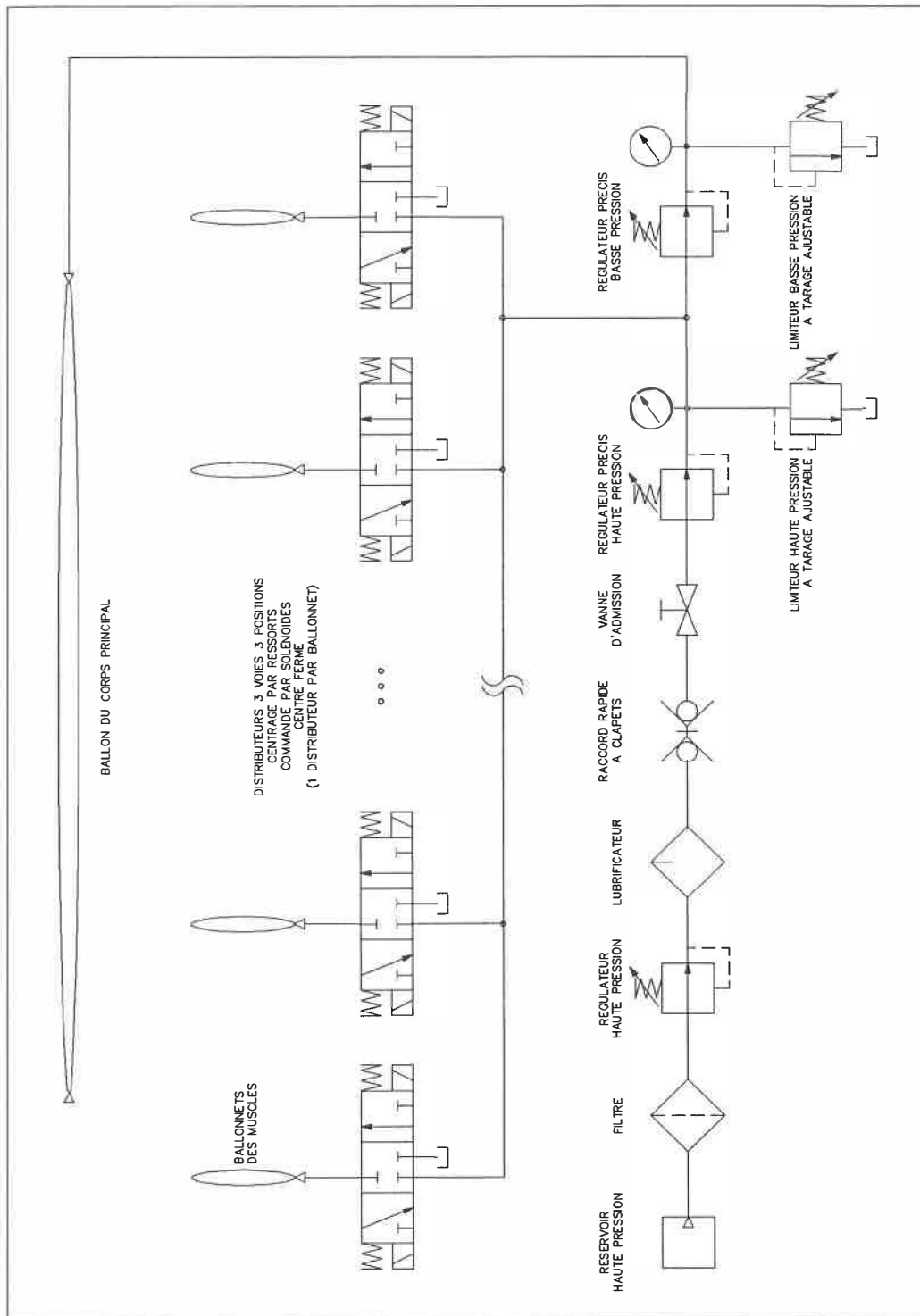


Figure 2.12. Circuit pneumatique complet recommandé.



# **CHAPITRE TROISIÈME**

## **Le prototype final**

Afin de vérifier la validité et de mesurer les performances du nouveau design développé au chapitre dernier, un prototype final est maintenant construit.

Le présent chapitre couvre les différents aspects de cette réalisation et se divise en deux parties: La première partie traite des tests préparatoires qui permettent de prendre les dernières décisions de design (matériaux, arrangement des muscles) et la deuxième partie relate les différentes étapes de construction du prototype final.

## PREMIÈRE PARTIE

### Tests préparatoires

Le choix d'un matériau approprié pour confectionner le corps principal est primordial. Ce matériau doit être léger, flexible et peu déformable sous charge dans au moins une direction. Le vinyle renforcé de fibres utilisé pour le prototype de départ doit être abandonné à cause de son poids élevé.

Afin d'éclairer ce choix, des tests décrits à l'annexe 8 sont effectués. Des muscles typiques de dimensions identiques sont construits à partir de matériaux différents. Ces muscles sont ensuite gonflés jusqu'à éclatement et leur comportement est étudié (déformation, explosion). Le tableau 3.1 résume les résultats expérimentaux pour les candidats les plus prometteurs. À la lumière de ces tests, le nylon épais est choisi pour sa texture appropriée, sa grande résistance et son poids léger.

MATÉRIAU	TEXTURE	POIDS (par m <sup>2</sup> )	FORME À 100kPa	PRESSION ET RAISON D'ÉCLATEMENT	
Vinyle renforcé	Bâche épaisse	639g	O.K.	350kPa	Couture
Néoprène	Bâche épaisse	817g	O.K.	350kPa	Couture
Dacron	Papier, voile	174g	Plissé	350kPa	Couture et tissus
Nylon épais	Drapeau épais	111g	O.K.	350kPa	Couture et tissus
Laminage nylon et polyuréthane	Recto: drapeau Verso: caoutchouc	171g	O.K.	275kPa	Tissus déchire
Nylon mince	Drapeau mince	63g	Déformé	150kPa	Mailles étirent

Tableau 3.1. Résultats des tests sur les matériaux.

Aussi, des tests semblables<sup>1</sup> sont effectués avec des fils de matériaux et de grosseurs différentes. Les résultats de ces tests sont résumés au tableau 3.2, et démontrent que le fil synthétique à 72% polyester et 28% coton de 0,80mm de diamètre offre la pression d'éclatement la plus élevée et ne pose aucun problème de couture ni d'étirement.

FIL	DIAMÈTRE	PRESSION D'ÉCLATEMENT DU MUSCLE DE TEST ET NOTE	
Nylon fin	0,25mm	300kPa	S'étire beaucoup avant rupture
Nylon gros	0,35mm	-	Bloque la machine à coudre
Coton fin	0,40mm	200kPa	Casse souvent
Coton gros	0,65mm	275kPa	
Polyester/coton gros	0,80mm	350kPa	Résistant et facile à coudre

Tableau 3.2. Résultats des tests sur les fils.

Il s'agit maintenant de déterminer le nombre de muscles par circonférence et par étage qui sera utilisé pour la construction du corps principal. En effet, trois arrangements de muscles permettent de plier le corps principal dans toutes les directions. Ces possibilités sont illustrées à la figure 3.1. Un prototype de test mesurant 1m25 de long sur 150mm de diamètre est donc construit pour étudier les performances des trois arrangements de la figure 3.1 et pour comparer le comportement de muscles d'amplitudes différentes variant entre 50mm et 150mm. De ces tests, décrits à l'annexe 9, il appert que l'étage de deux paires

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 8.

de muscles antagonistes démontre de loin les meilleures performances ( $\Theta_{MAX}$  plus grand), tout en étant plus naturel à contrôler. C'est donc cet arrangement de muscles qui sera utilisé pour les étages du prototype final. Aussi, le muscle d'amplitude 100mm est choisi pour le  $\Theta_{MAX}$  élevé qu'il permet tout en ne causant qu'une faible striction du corps principal.

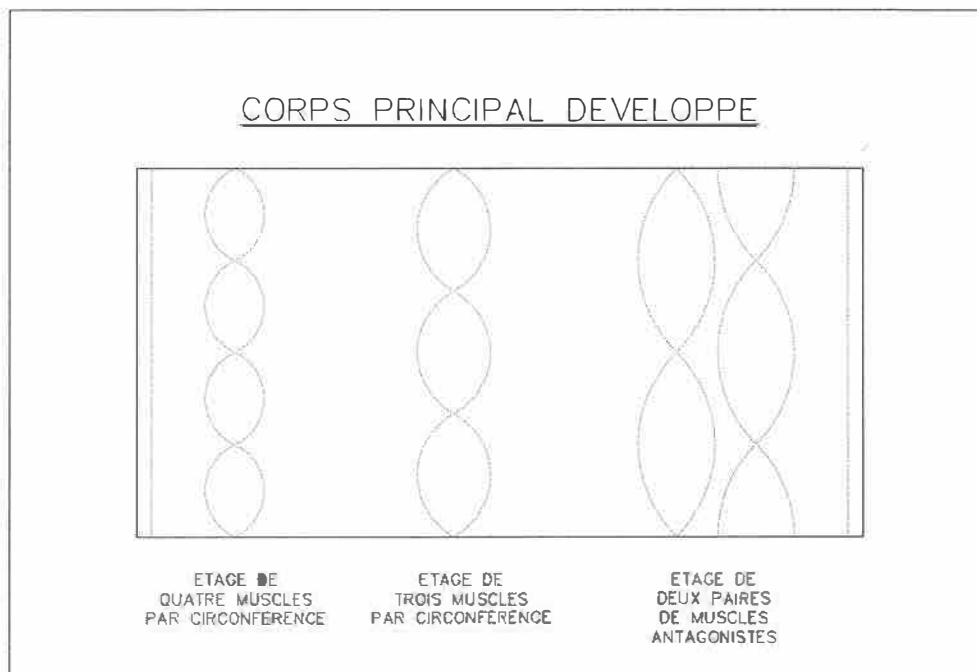


Figure 3.1. Arrangements possibles de muscles.

## DEUXIÈME PARTIE

### Construction du prototype final

D'abord, la longueur du prototype final est fixée à 1m65, afin de faciliter la comparaison des performances avec le prototype de départ. Le diamètre choisi est le même que celui utilisé pour le prototype de test, soit 150mm. En effet, le prototype de test offre un compromis adéquat entre la rigidité et la souplesse. Sur cette structure, neuf étages de quatre muscles peuvent être confectionnés.

À l'aide du patron imprimé par le logiciel de l'annexe 3, le profil de tous les muscles est d'abord tracé sur la paroi développée du corps principal. Ensuite, un trou est percé dans une seule épaisseur de la paroi double à une extrémité de chaque pochette à l'aide d'un instrument chaud (fer à souder): ces trous vont permettre le passage des tubes d'alimentation pneumatique des ballonnets étanches qui sont logés dans chaque muscle. Il est à noter qu'il est important que les trous soient percés aux extrémités des pochettes, zones de moindre sollicitation, et que leur diamètre n'excède pas le diamètre extérieur des tubes d'alimentation afin d'éviter la sortie des ballonnets. Une fois les trous percés et refroidis, une machine à coudre industrielle est utilisée pour coudre les bords du rectangle ainsi que la moitié du profil des muscles. Le résultat de cette opération est illustré à la figure 3.2.

Maintenant, les ballonnets doivent être fixés aux tubes d'alimentation pneumatique. Des tests décrits à l'annexe 10 justifient le choix des tubes de polyéthylène rigide de 6mm de diamètre extérieur qui, en plus d'être 41% plus

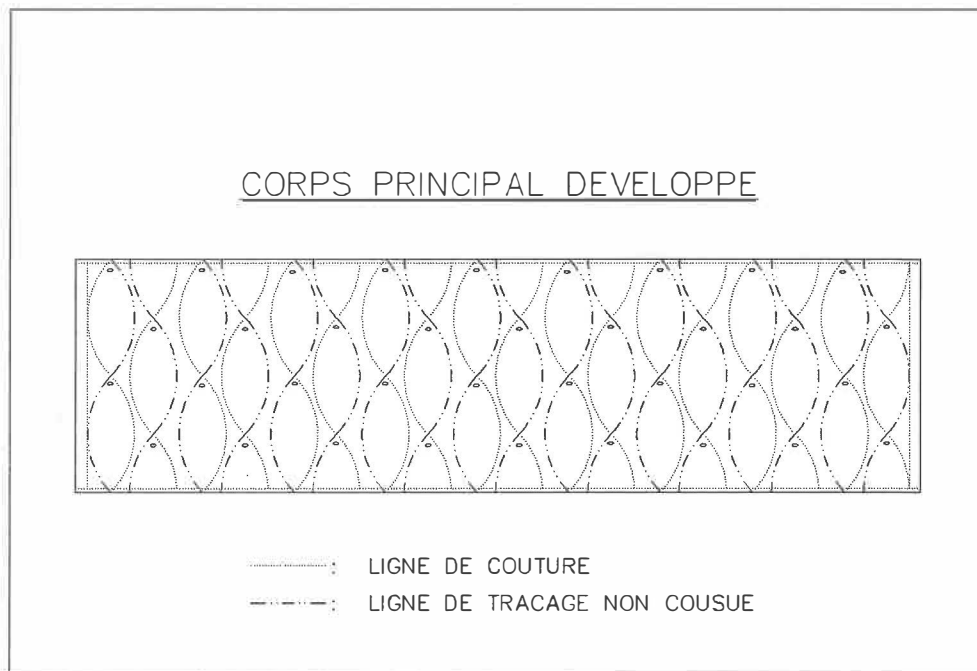


Figure 3.2. Première étape de couture.

légers que les tubes de vinyle du prototype de départ<sup>1</sup>, permettent plus de débit grâce à leur diamètre interne plus grand (4mm au lieu de 3mm). Aussi, d'autres essais<sup>2</sup> démontrent que le type d'attache le plus fiable consiste à fixer hermétiquement le ballonnet au tube par une attache de nylon. Ce système de fixation est montré à la figure 3.3. Il s'agit maintenant d'insérer les ballonnets à l'intérieur des muscles avant de coudre l'autre moitié de leur profil, en laissant les tubes d'alimentation s'échapper par les trous, tel qu'illustré à la figure 3.4.

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 7.

<sup>2</sup> Consulter l'annexe 10.

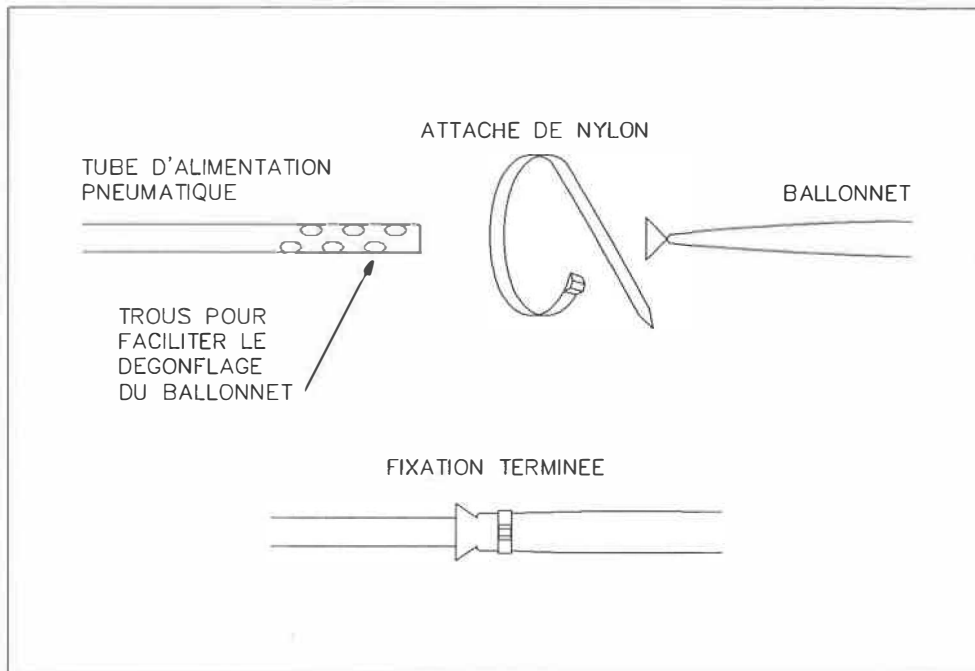


Figure 3.3. Fixation des ballonnets aux tubes d'alimentation.

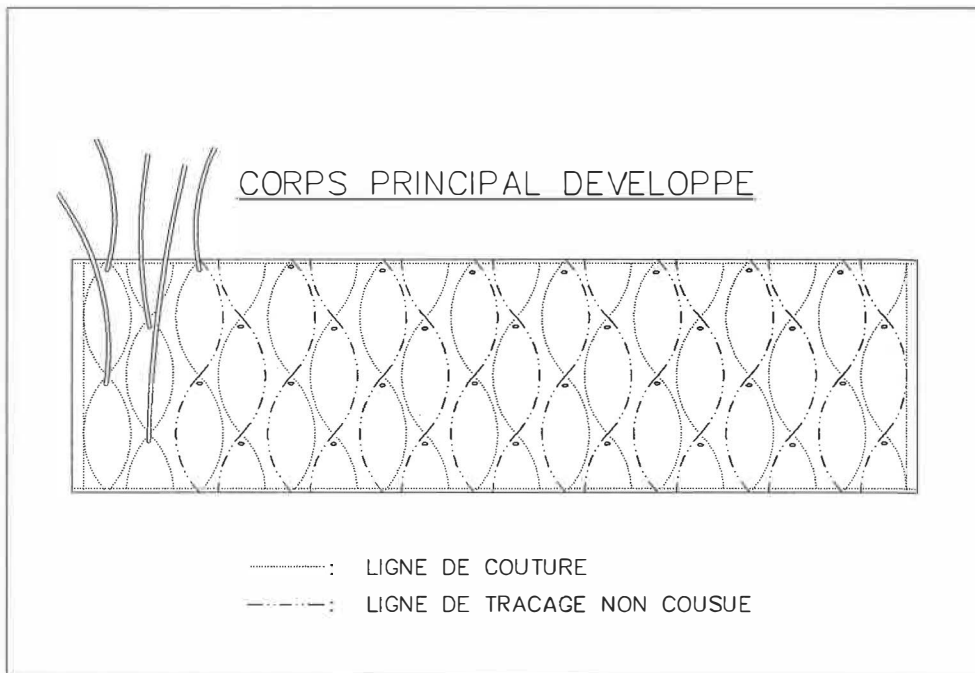


Figure 3.4. Insertion des ballonnets dans les pochettes.

Il ne reste plus qu'à coudre le reste des profils des pochettes en évitant soigneusement de percer les ballonnets, et à refermer le corps principal.

Pour le manchon étanche du corps principal, plusieurs possibilités sont essayées<sup>1</sup>, allant du ballon de caoutchouc extensible à une construction de vinyle soudé. Les meilleurs résultats (étanchéité, répartition de la pression et poids minimum) sont cependant obtenus avec un long tube de polyéthylène mince fermé aux deux bouts par une attache de nylon. Ce manchon en forme de saucisse permet une distribution adéquate de la pression sur le corps principal tout en assurant une excellente étanchéité. Le manchon étanche est illustré à la figure 3.5.

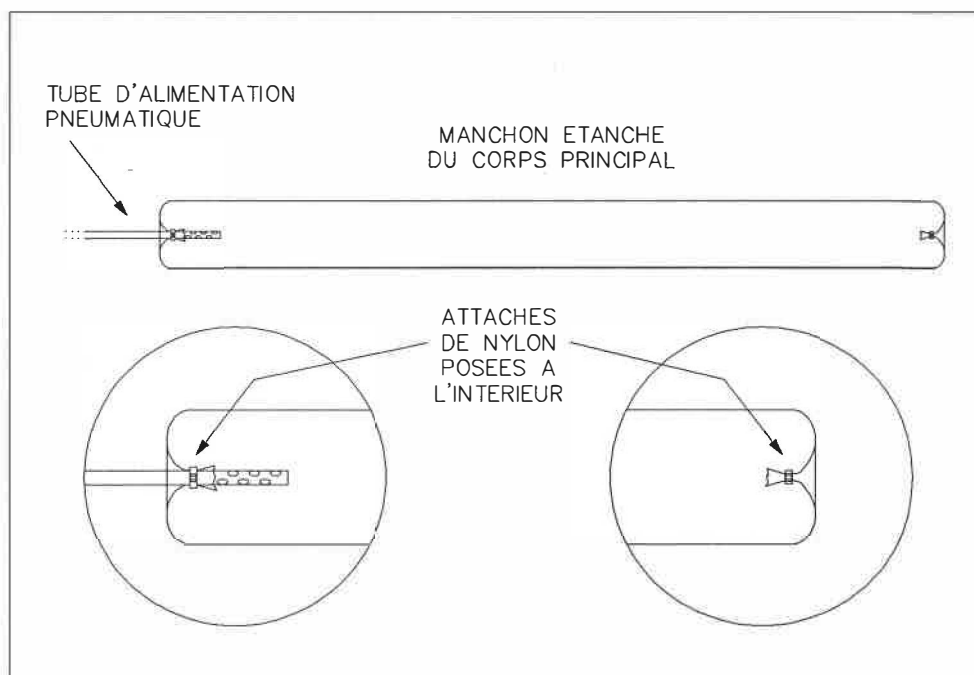


Figure 3.5. Manchon étanche du corps principal.

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 10.



Les extrémités rigides du corps principal sont conçues en aluminium pour faciliter leur amarrage et minimiser leur poids. Leur périphérie comporte une rainure large qui offre une prise sûre pour attacher le corps principal. Le disque utilisé pour la base est percé en son centre pour laisser passer le tube d'alimentation du manchon étanche, et peut aussi comporter des rainures près de la périphérie pour laisser passer les tubes d'alimentation des muscles dans le cas où les tubes sont gardés à l'intérieur du corps principal (plus élégant mais moins performant). Un dessin des extrémités rigides est présenté à la figure 3.6.

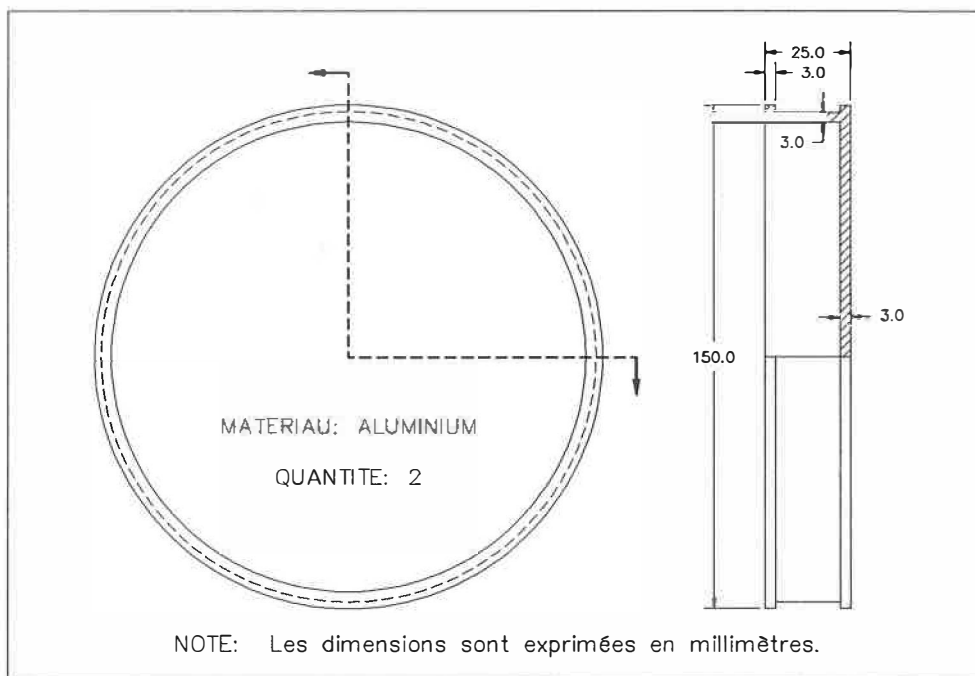


Figure 3.6. Extrémités rigides en aluminium.

Le socle cubique du prototype final, contrairement à celui du prototype de départ, permet l'utilisation du manipulateur en porte-à-faux ou érigé, tel qu'illustré à la figure 3.7. Il renferme deux étages où sont fixés toutes les composantes des circuits pneumatique et électronique, et la base rigide du manipulateur y est fixée par quatre vis. Il comporte aussi des trous pour l'aération et le passage des tubes d'alimentation des muscles et du corps principal. Le socle est illustré en perspective à la figure 3.8.

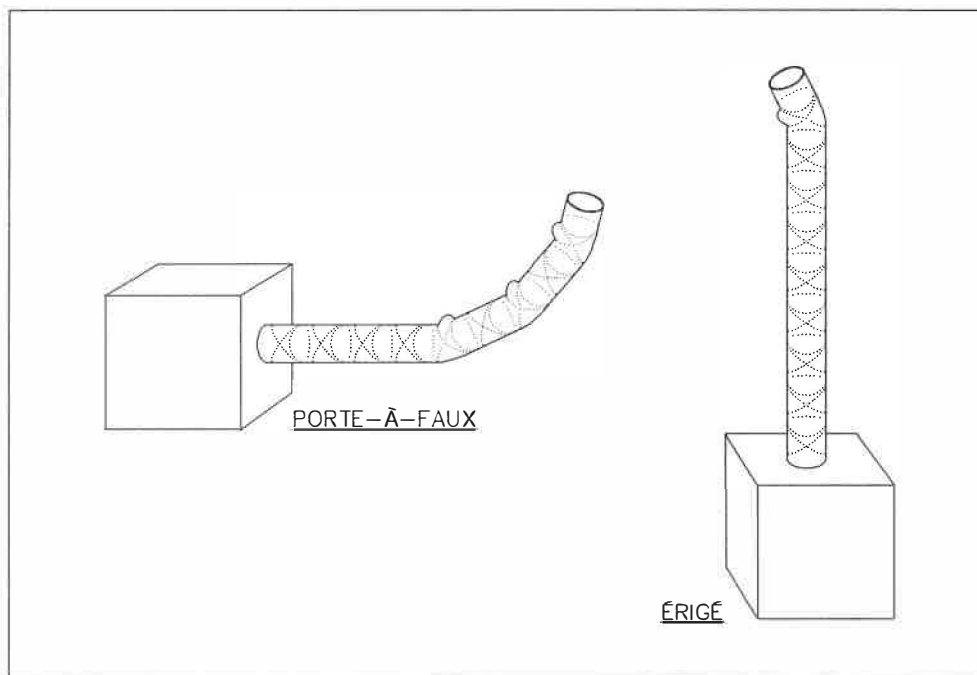


Figure 3.7. Possibilités d'utilisation du nouveau socle cubique.

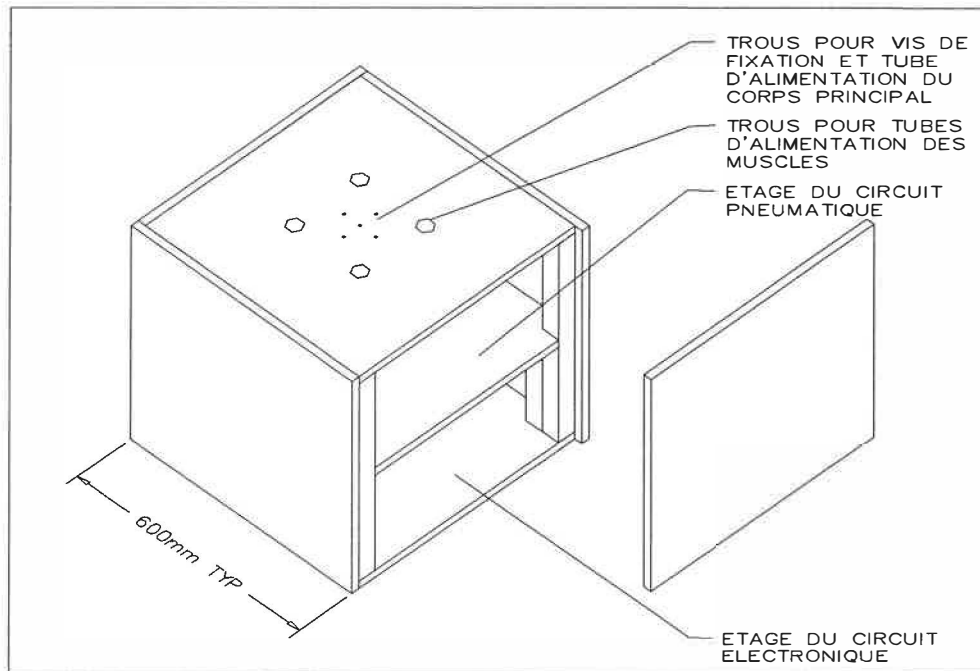


Figure 3.8. Socle du prototype final

Finalement, le circuit pneumatique du prototype final est réalisé selon le circuit recommandé de la figure 2.12. Toutefois, pour des raisons d'économie et de matériel disponible, chaque distributeur à 3 voies et 3 positions du circuit recommandé a été remplacé par deux distributeurs à 3 voies et 2 positions. Le résultat final est montré à la figure 3.9.

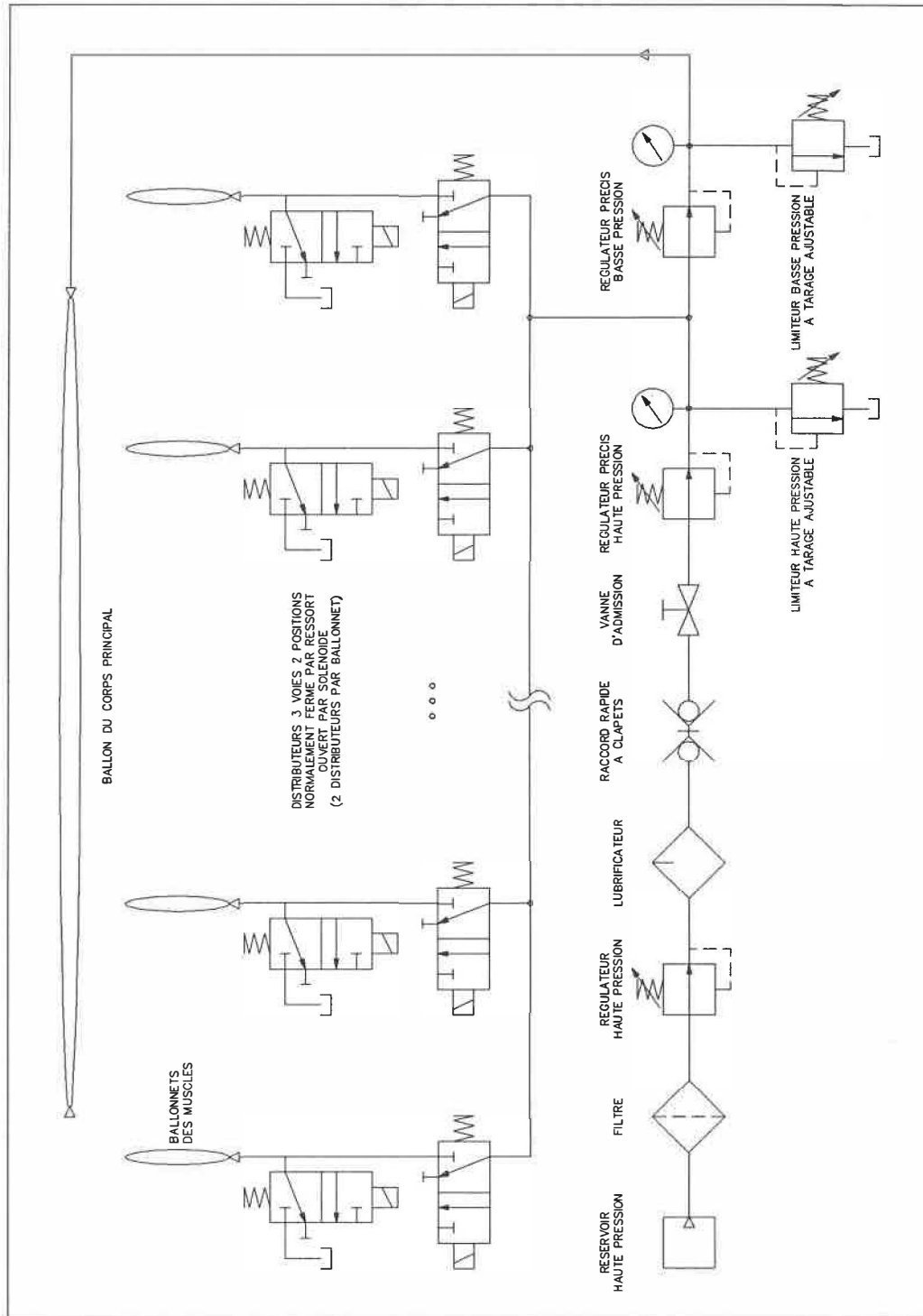


Figure 3.9. Circuit pneumatique complet du prototype final.

## CHAPITRE QUATRIÈME

### **Le contrôle par ordinateur**

Le circuit électrique utilisé pour contrôler les distributeurs à solénoïdes est doté des caractéristiques suivantes:

- Signaux d'entrée binaires 0 - 5V courant continu (approprié pour les portes parallèles des micro-ordinateurs du genre IBM-PC®).
- Signaux de sortie binaires 0 - 110V courant alternatif (pour alimenter les solénoïdes des distributeurs).
- Canaux isolés par opto-coupleurs.

Le schéma du circuit électrique pour un canal est montré à la figure 4.1. Pour le montage du prototype final, ce circuit est répété 72 fois afin de relier chaque solénoïde à une porte parallèle de l'ordinateur.

L'ordinateur utilisé pour le contrôle du prototype est un IBM-PC®, muni d'une carte d'expansion d'entrées/sorties LABMASTER®. Le logiciel de contrôle, écrit en langage BASIC, offre deux modes de fonctionnement:

- MODE MANUEL: Contrôle du manipulateur en boucle ouverte en temps réel, avec possibilité d'enregistrer les mouvements dans une routine conservée sur disquette:

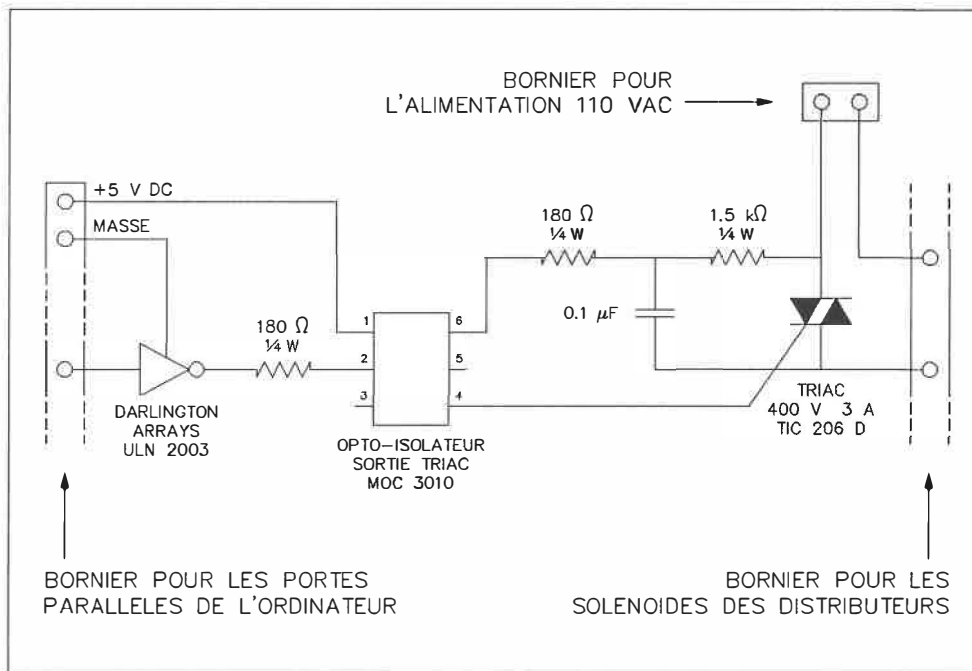


Figure 4.1. Circuit électrique pour un canal de contrôle.

- Mouvement simultané de un ou plusieurs muscles dans une même ou différentes directions.
  - Remise à zéro de un ou plusieurs muscles.
- **MODE AUTOMATIQUE:** Actionnement du manipulateur selon une routine préalablement enregistrée avec intervention possible de l'utilisateur.

Un ordinogramme du logiciel est soumis à l'annexe 5, une liste des instructions BASIC est incluse à l'annexe 6, et les fichiers source et compilé sont fournis sur disquette à l'annexe 4.

## **CHAPITRE CINQUIÈME**

### **L'évaluation des performances**

Il est maintenant possible, par l'évaluation des performances du prototype final, de vérifier que les objectifs et critères définis au début du chapitre deuxième sont satisfaits. Ainsi:

- Le nouveau design ne comporte aucune pièce structurale rigide autre que les extrémités.
- Les muscles sont stables: leur design leur confère une stabilité intrinsèque.
- Les muscles fonctionnent sans aucune lubrification: leur design ne montre aucun point de friction.
- L'utilisation du manipulateur est sécuritaire: tous les tests de performances ont été réalisés en gonflant les muscles à moins de 50% de leur pression d'éclatement de 350kPa, mesurée au chapitre troisième.

De plus, la grande simplicité de construction du nouveau design et son poids minime satisfont pleinement deux des trois critères de design. En effet, l'expérimentation décrite à l'annexe 11 démontre que le nouveau prototype non gonflé ne pèse que 1300g (2100g avec les tubes), ce qui représente une réduction de poids de 77% par rapport au prototype de départ non gonflé qui

pèse 5600g (6400g avec les tubes)<sup>1</sup>. Le dernier critère à considérer concerne la flexibilité du manipulateur. Afin d'évaluer les performances du prototype en général et sur cet aspect en particulier, une série de mesures expérimentales sont prises<sup>2</sup>. Les résultats de ces tests sont rapportés pour une et deux rangées de neuf muscles au tableau 5.1, où  $P_C$  et  $P_M$  représentent respectivement la pression du corps principal et la pression des muscles.

$P_C$ (kPa)	$P_M$ (kPa)	ANGLE DE FLEXION MAXIMAL 9 muscles (°)	TEMPS DE RÉPONSE MAXIMAL 9 muscles (sec)	ANGLE DE FLEXION MAXIMAL 2x9 muscles (°)	TEMPS DE RÉPONSE MAXIMAL 2x9 muscles (sec)	CHARGE CRITIQUE 9 muscles (kg)
10	138	118				
14	138	107	28	168	45	0,23
17	69	64		119		
17	103	81		142		
17	138	96		159		
17	172	104		170		
21	138	90	23	151	37	0,95
24	138	82		138		1,30
28	138	75	18	126	30	
31	138	70		115		
34	138	64	14	105	25	2,25

Tableau 5.1. Résultats des tests sur les performances.

Ces résultats montrent donc que le critère de flexibilité qui vise à obtenir au moins 100° de repli est atteint et même dépassé pour toutes les pressions d'opération étudiées. Tous les objectifs et critères de design fixés au début du chapitre deuxième sont donc remplis.

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 7.

<sup>2</sup> Consulter l'annexe 11.



Avec les résultats du tableau 5.1, il est aussi possible de définir plus précisément les performances du manipulateur. Ainsi, l'effet de la pression des muscles sur la flexibilité du manipulateur peut être illustrée en traçant un graphique dont les points représentent l'angle de flexion maximal pour une et deux rangées de neuf muscles en fonction de la pression des muscles  $P_M$ , en maintenant la pression du corps principal  $P_C$  constante. Le graphique obtenu est montré à la figure 5.1 et démontre de quelle façon la flexibilité du manipulateur croît avec l'augmentation de  $P_M$ .

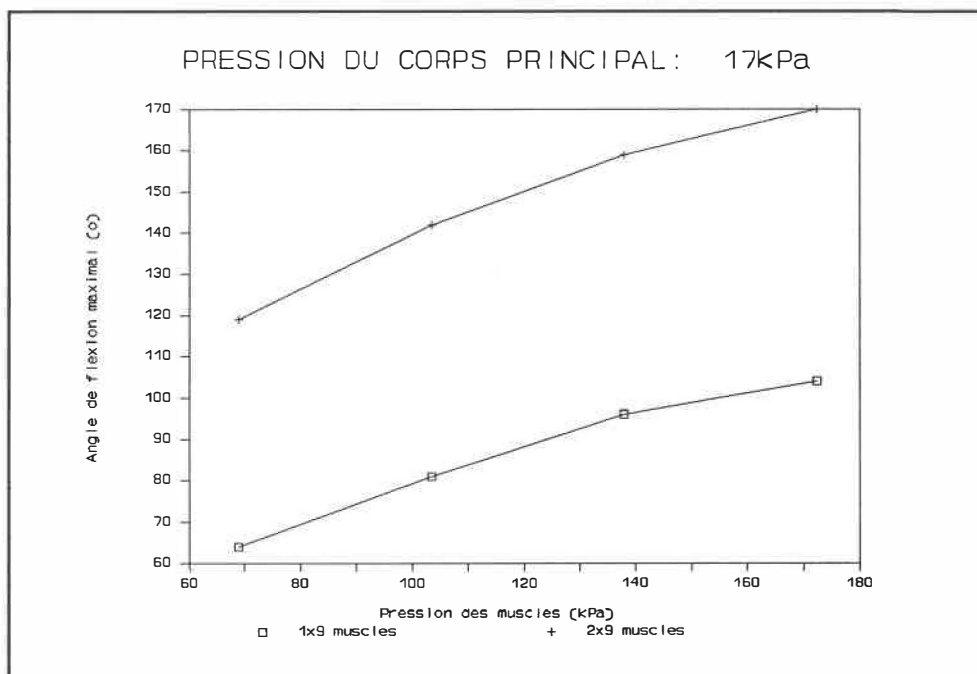


Figure 5.1. Angle de flexion maximal versus pression des muscles.

De la même façon, l'effet de la pression du corps principal sur la flexibilité du manipulateur peut être illustrée en traçant un graphique dont les points représentent l'angle de flexion maximal pour une et deux rangées de neuf muscles en fonction de la pression du corps principal  $P_c$ , en maintenant la pression des muscles  $P_m$  constante. Le graphique obtenu, montré à la figure 5.2, démontre de quelle façon la flexibilité du manipulateur décroît avec l'augmentation de  $P_c$ .

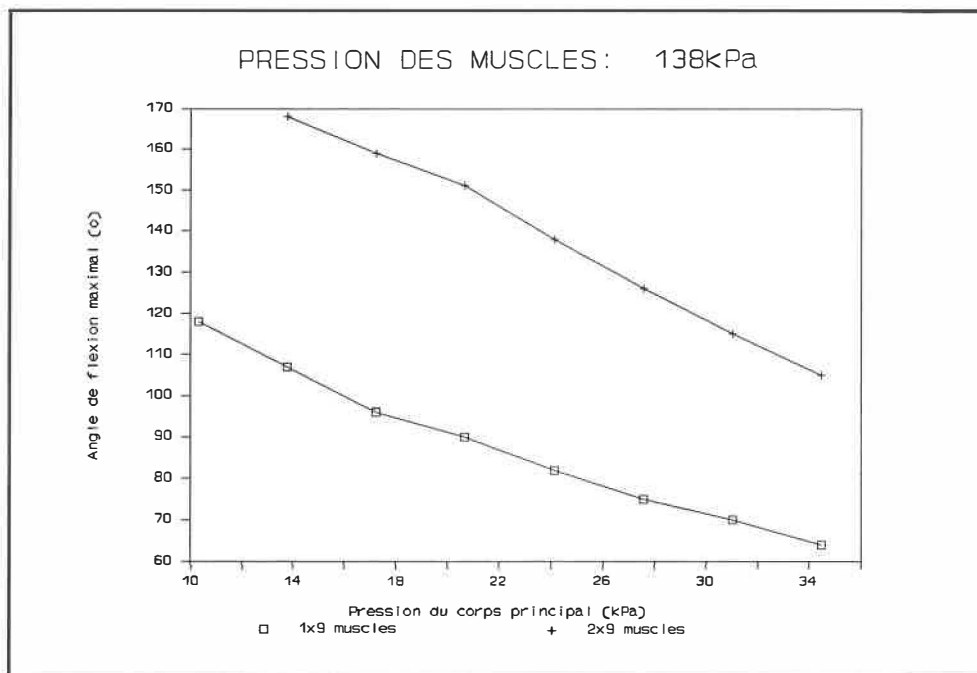


Figure 5.2. Angle de flexion maximal versus pression du corps principal.

Le comportement du temps de réponse maximal, défini par le temps que prend le manipulateur pour atteindre l'angle de flexion maximal, peut également être illustré par un graphique similaire. Puisque la variation de la pression des muscles  $P_M$  n'a pas de contribution significative, un seul graphique illustrant le temps de réponse maximal pour une et deux rangées de neuf muscles en fonction de la pression du corps principal  $P_c$  est nécessaire. Le résultat est illustré à la figure 5.3 et démontre de quelle façon le temps de réponse maximal décroît avec l'augmentation de  $P_c$ .

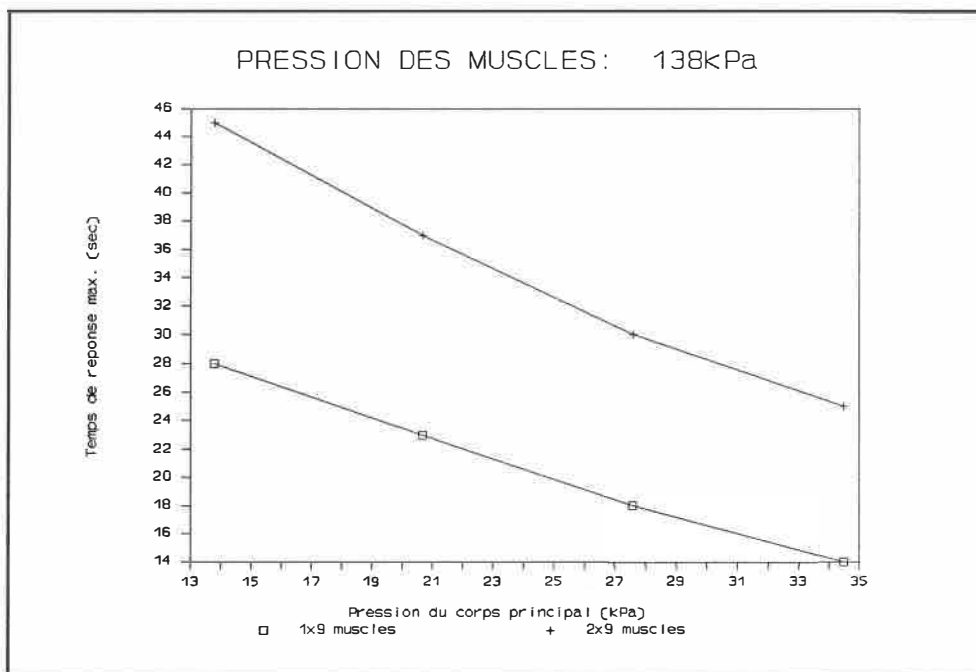


Figure 5.3. Temps de réponse maximal versus pression du corps principal.

Ce phénomène s'explique par le fait que lors d'un mouvement impliquant le gonflage de muscles, une partie de l'air contenu dans le corps principal doit s'échapper afin de maintenir la pression constante malgré la réduction de volume du corps principal. Ainsi, plus la différence entre  $P_M$  et la pression ambiante est grande, plus l'échappement se fait rapidement. Il est à noter que l'un des principaux facteurs limitatifs pour le temps de réponse maximal est le diamètre du tube d'alimentation du corps principal. Il serait donc possible d'obtenir des mouvements beaucoup plus rapides en utilisant un tube d'alimentation d'un diamètre intérieur supérieur à 4mm, dimension utilisée pour le prototype final. Aussi, les essais<sup>1</sup> démontrent que la plupart des mouvements du manipulateur se réalisent dans moins de 35% du temps de réponse maximal qui correspond au pire cas possible.

La dernière mesure rapportée au tableau 5.1 est la charge critique<sup>2</sup>, mesurée pour une rangée de neuf muscles, et définie par le poids de la charge minimale appliquée à l'extrémité du manipulateur qui provoque le plissement de la paroi du corps principal qui entre en compression. Avec l'hypothèse que le manipulateur se meut à faible vitesse seulement, cette charge critique estime la charge maximale que le manipulateur peut déplacer sans que les positions du manipulateur ne deviennent difficilement prévisibles. La figure 5.4 montre un graphique qui reflète le comportement de la charge critique en fonction de la

---

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 11.

<sup>2</sup> Consulter l'annexe 11.

pression du corps principal  $P_c$  avec  $P_M$  maintenue constante. Ainsi, la charge critique croît avec l'augmentation de  $P_c$ .

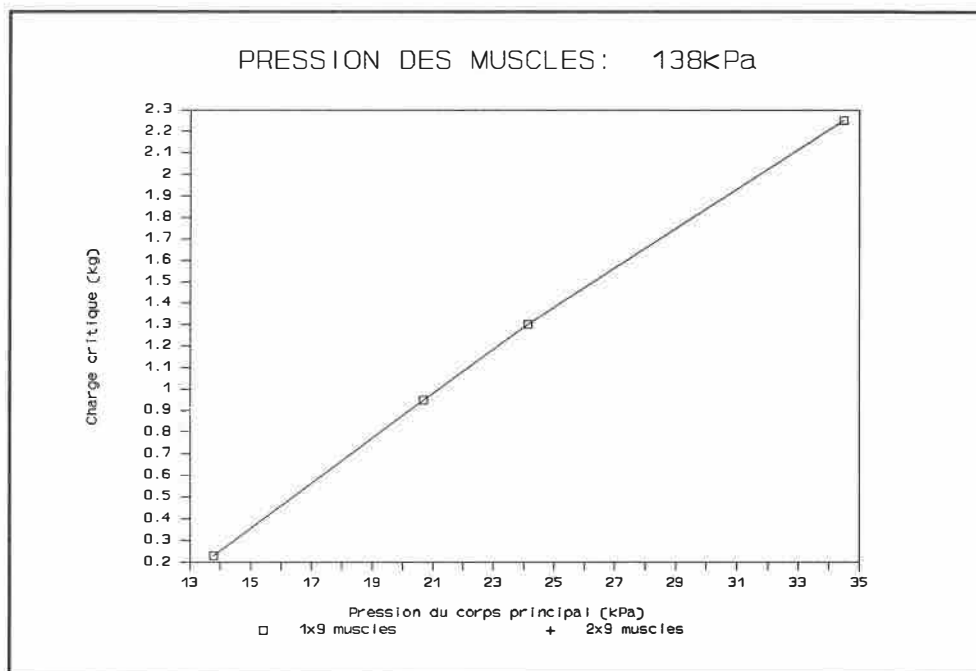


Figure 5.4. Charge critique versus pression du corps principal.

La variation de la charge critique en fonction de  $P_M$  n'est pas étudiée, puisque la compression n'a évidemment jamais lieu sur le muscle, mais bien dans les zones entre les muscles, zones sollicitées seulement par  $P_c$  qui est significativement plus petite que  $P_M$ .

D'autres tests permettent également d'établir quelques caractéristiques intéressantes. De fait, il est étonnant de constater que malgré sa fabrication artisanale, le manipulateur montre une erreur de répétition inférieure à  $\pm 7\text{mm}$ , et

que l'angle de flexion du corps principal engendré par chaque muscle est identique à  $\pm 1^\circ$  près<sup>1</sup>. L'évaluation de l'erreur de répétition maximale, définie par la distance maximale entre deux points atteints par l'extrémité du manipulateur commandé pour atteindre une même position, est extrêmement importante puisque le manipulateur gonflable ne possède actuellement aucun moyen de rétroaction, et que sa programmation est basée sur sa capacité de répéter les mouvements appris.

Une autre caractéristique importante du nouveau manipulateur est que le gonflage des muscles n'entraîne pas la formation de plis sur le corps principal, comme c'était le cas pour le prototype de départ. Les mouvements du nouveau manipulateur sont donc mieux prévisibles puisque les points de flexion sont toujours localisés aux mêmes endroits et ne dépendent pas de la position des plis. De plus, les nouveaux muscles sont beaucoup plus compacts que ceux utilisés pour le prototype de départ puisqu'ils sont dépourvus de tendons.

Finalement, une dernière caractéristique des plus importantes est la géométrie de l'enveloppe de travail du manipulateur. En forme de parapluie à quatre pointes, elle est illustrée en perspective à la figure 5.5 et ses dimensions approximatives sont montrées à la figure 5.6, en fonction du paramètre  $L$  qui représente la longueur du manipulateur. Il est évident que la forme exacte de l'enveloppe de travail dépend des pressions d'utilisation choisies pour  $P_c$  et  $P_m$ .

---

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 11.

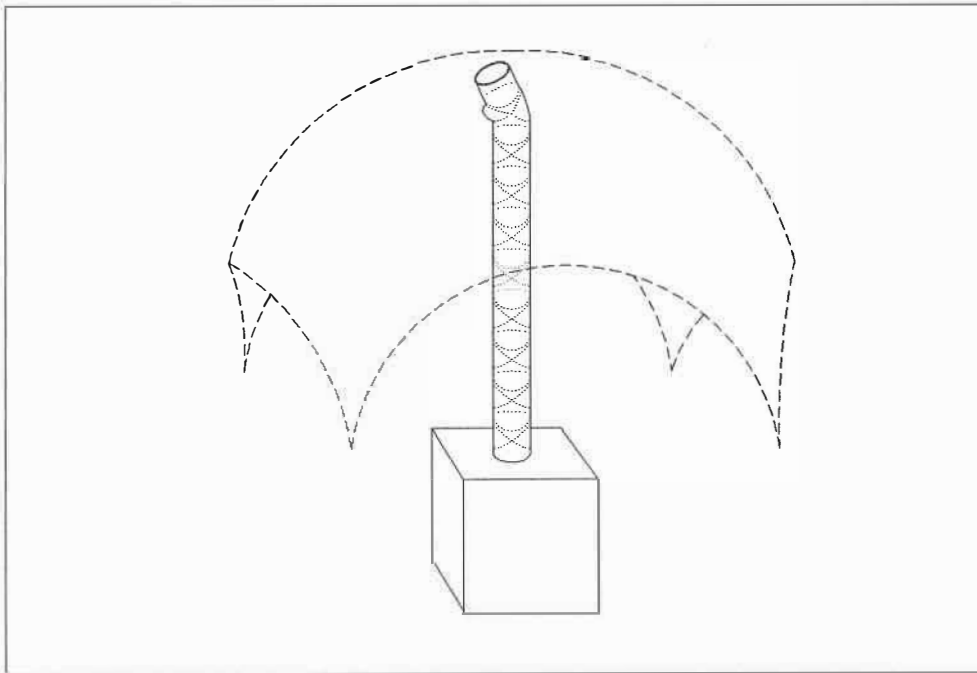


Figure 5.5. Enveloppe de travail du nouveau manipulateur.

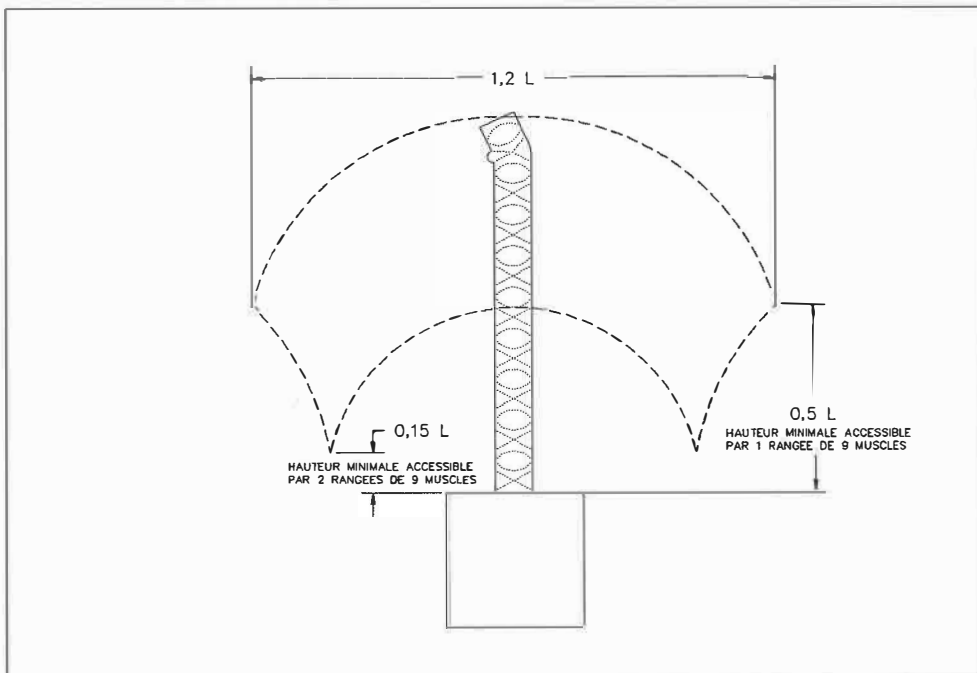


Figure 5.6. Dimensions typiques de l'enveloppe de travail du manipulateur.

En étudiant la géométrie de l'enveloppe de travail réelle, il est intéressant de constater qu'un modèle théorique simple peut refléter et prédire les mouvements du manipulateur. Ainsi, le manipulateur peut être réduit à une série de tiges reliées par des pivots à un degré de liberté, dont les angles correspondent aux angles de flexion du corps principal par les muscles. Si les pivots sont localisés au centre du corps principal et vis-à-vis le centre des muscles, le modèle, illustré à la figure 5.7, semble être réaliste. Il serait donc intéressant, dans une étude ultérieure, de pousser plus à fond cette modélisation. En effet, un tel développement permettrait de calculer les commandes requises par le manipulateur pour atteindre une position déterminée. Cette étape est essentielle pour pouvoir commander le manipulateur dans un mode autre que celui par apprentissage.

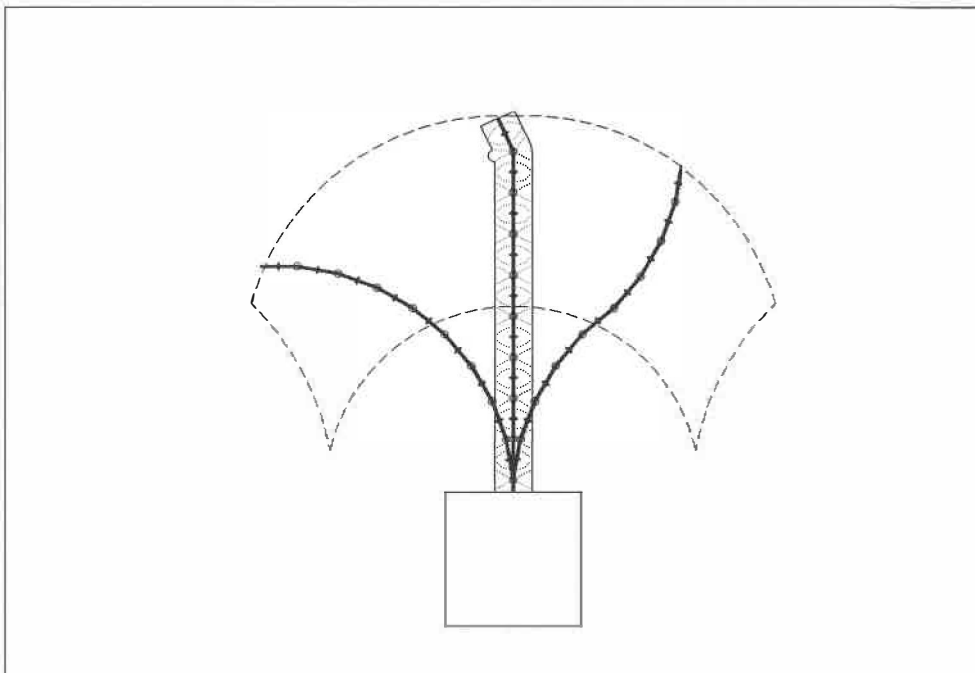


Figure 5.7. Modélisation géométrique du nouveau manipulateur.



## **CONCLUSION**

Le nouveau design d'un manipulateur consiste en un cylindre droit à pression uniforme, dont la paroi double est cousue pour former les muscles. Ces muscles, de forme particulière, renferment un ballonnet étanche alimenté en air par un tube de polyéthylène rigide. Puisque chaque tube d'alimentation est contrôlé par distributeurs commandés par ordinateur, il est possible de mouvoir le manipulateur en gonflant un ensemble de muscles pour obtenir une configuration désirée. Ce design, qui utilise l'effet secondaire du gonflage, est essentiellement stable et élimine les problèmes de friction et de plissement du prototype de départ.

Le prototype final, qui comporte neuf étages de deux paires de muscles antagonistes, est conçu en nylon, et mesure 1m65 de longueur sur 150mm de diamètre. Il renferme un manchon étanche en polyéthylène souple qui est alimenté par un tube de polyéthylène rigide. L'évaluation de ses performances révèle que tous les objectifs et critères établis au début du processus de design ont été réalisés.

Ainsi, le nouveau design élimine les problèmes de friction et de plissement et confère au manipulateur une stabilité intrinsèque, une flexibilité remarquable, une bonne précision de mouvement, une utilisation sécuritaire et prévisible, une construction simple, des muscles compacts et un rapport charge utile sur poids du robot remarquablement élevé par rapport aux robots conventionnels. N'étant actuellement muni d'aucun moyen de rétroaction, le robot

doit être programmé par apprentissage, ce qui s'avère réaliste vu la faible erreur de répétition mesurée pour le prototype final.

Finalement, l'étude de l'enveloppe de travail du manipulateur permet de constater qu'il semble possible de modéliser les mouvements du manipulateur. Il serait intéressant, dans une recherche ultérieure, d'approfondir cette modélisation géométrique afin d'en faire la définition complète et d'étudier ses limitations.

## **BIBLIOGRAPHIE**

1. BALDUR, Roman et BLACH, Wolfgang. "Inflatable Manipulator", dans ROBOTS 9: Conference Proceedings, Robotics International of SME, Detroit MI, 2-6 juin 1985, p. 12:24-12:36.
2. BLACH, Wolfgang. Thèse de doctorat intitulée Le manipulateur gonflable: Un concept nouveau, École Polytechnique, Montréal QC, Novembre 1989.

# ANNEXES

## ANNEXE 1: Équation du profil développé des muscles.

Le but du présent développement est d'établir l'équation qui décrit la géométrie du profil des muscles sur le corps principal développé. Ce profil est défini par l'intersection du corps principal cylindrique avec deux plans symétriques par rapport à un plan perpendiculaire à l'axe du corps principal tel qu'illustré à la figure 2.8.

Les variables de l'équation du profil des muscles sont l'abscisse X et l'ordonnée Y qui serviront au traçage des patrons sur la surface développée du corps principal. Afin d'obtenir une équation générique, l'amplitude maximale du muscle A, le diamètre du corps principal D et le nombre de muscles par circonférence N sont conservés comme paramètres arbitraires. Finalement, quatre variables temporaires sont introduites afin de simplifier le développement: les angles  $\alpha$  et  $\phi$ , la distance d et la hauteur h. Tous ces paramètres, variables et variables temporaires sont identifiées à la figure A.1.

Si on considère un seul côté du profil du muscle en projection à la figure A.1, on constate que puisque tous les points du demi-profil appartiennent à un même plan vu en bout, il se retrouvent tous sur une même droite d'équation

$$Y = \frac{A h}{2 d} . \quad (14)$$

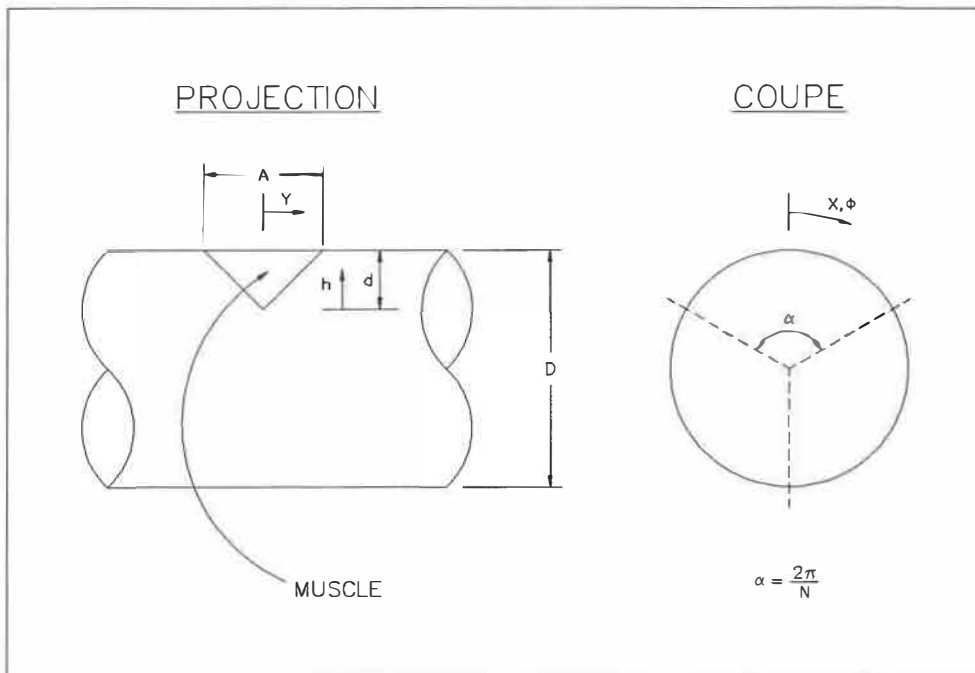


Figure A.1. Définition des variables et paramètres du développement.

L'expression de la distance  $d$  peut, quant à elle, être déduite de la vue en coupe du muscle à la figure A.1. Ainsi,

$$d = \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \cos \frac{\alpha}{2} , \quad (15)$$

et puisque  $\alpha$  est défini par

$$\alpha = \frac{2\pi}{N} , \quad (16)$$

on peut simplifier (15) en

$$d = \frac{D}{2} \left( 1 - \cos \frac{\pi}{N} \right) . \quad (17)$$

Maintenant que l'expression paramétrique de  $d$  est connue, la dernière variable temporaire à substituer dans (14) est  $h$ . Cette expression fait le lien entre la projection et la coupe de la figure A.1. Ainsi, on peut identifier que pour chaque point du demi-profil du muscle,

$$\frac{D}{2} \cos \phi - h = \frac{D}{2} - d \quad (18)$$

ou

$$h = \frac{D}{2} (\cos \phi - 1) + d \quad (19)$$

où

$$\phi = \frac{2X}{D} . \quad (20)$$

En substituant (20) et (17) dans (19) on obtient, après simplification,

$$h = \frac{D}{2} (\cos \frac{2X}{D} - \cos \frac{\pi}{N}) \quad (21)$$

qui, substituée à son tour avec (17) dans (14) se simplifie en

$$Y = \frac{A (\cos \frac{2X}{D} - \cos \frac{\pi}{N})}{2 (1 - \cos \frac{\pi}{N})} \quad (13)$$

pour

$$-\frac{\pi D}{2 N} \leq X \leq \frac{\pi D}{2 N}$$

et

$$N \geq 2$$

qui exprime la géométrie développée du demi-profil d'un muscle en fonction des paramètres arbitraires A, D et N seulement. La figure A.2 montre un tracé typique de cette équation pour des valeurs de A, D et N arbitraires.

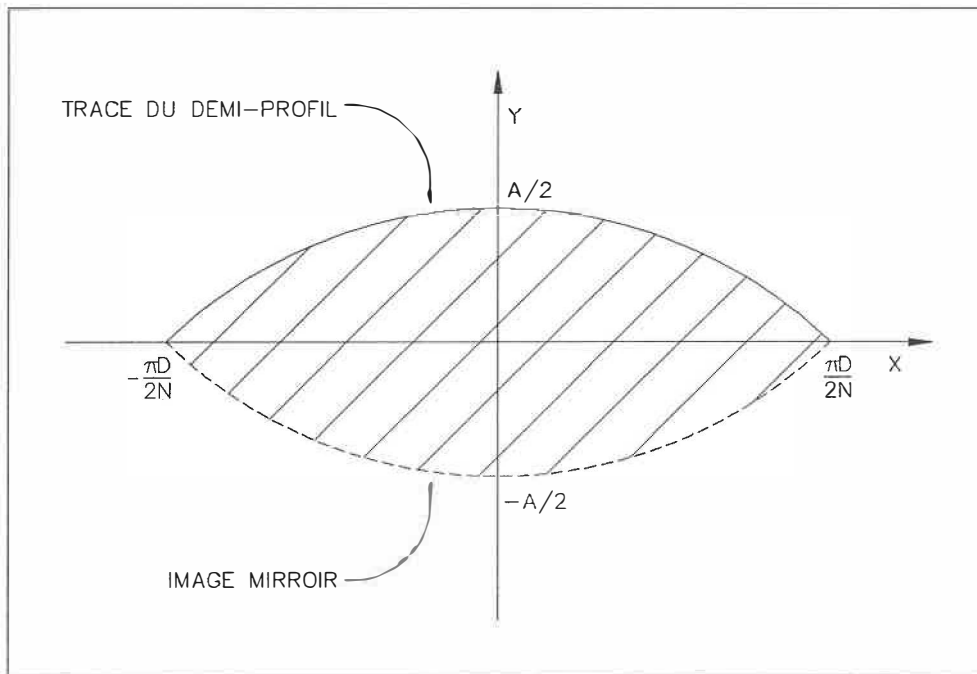


Figure A.2. Tracé typique du profil d'un muscle.

## ANNEXE 2: Ordinogramme du logiciel de traçage précis des muscles.

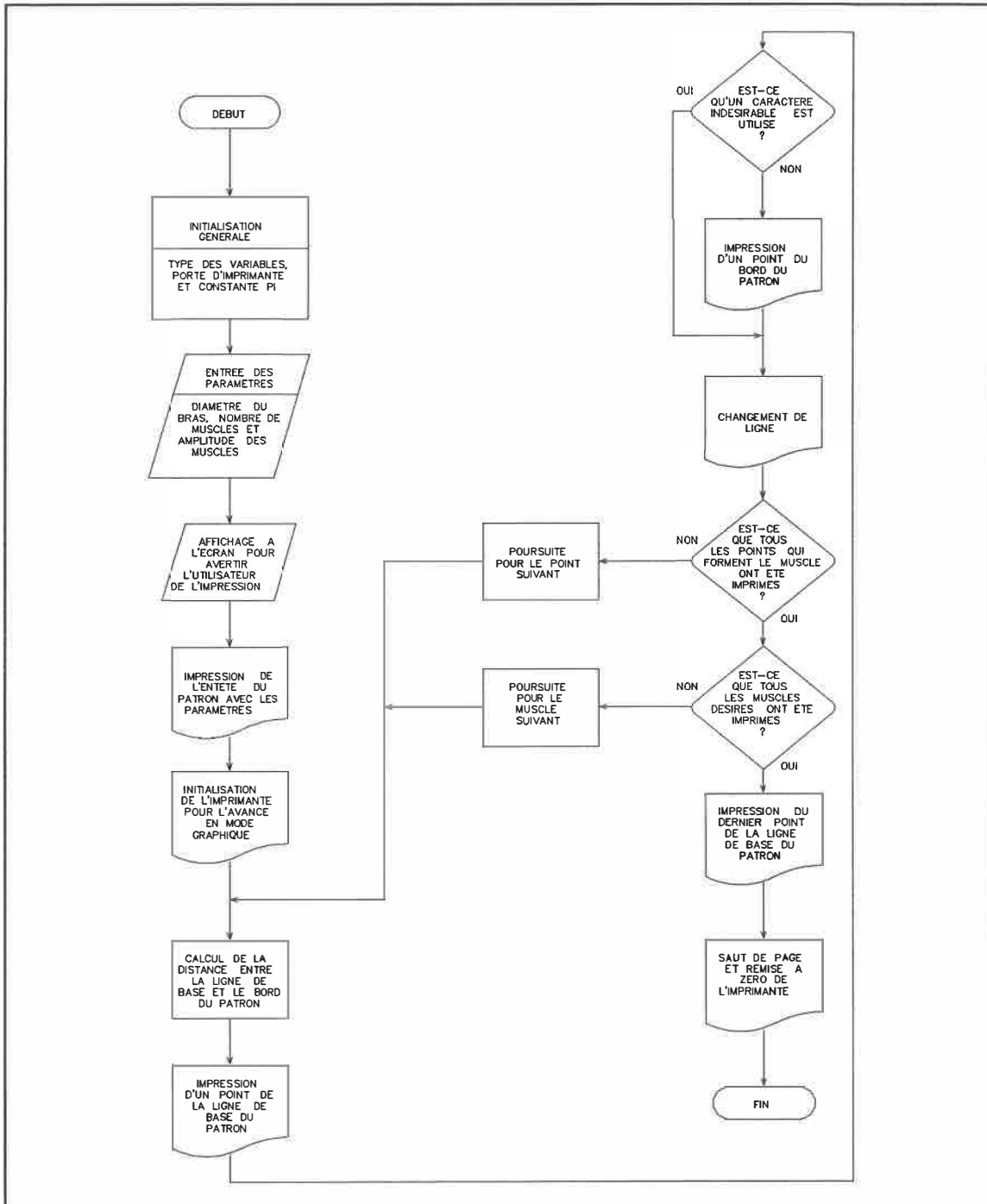


Figure A.3. Ordinogramme du logiciel de traçage précis des muscles.



### ANNEXE 3: Logiciel de traçage des muscles.

```
'*****  
'*****  
'***** LOGICIEL DE TRAÇAGE DES MUSCLES *****  
'*****  
'***** Programmation: Bruno-Marie Béchard *****  
'***** Révision: 10 octobre 1987 *****  
'*****  
'*****
```

' Ce logiciel permet le traçage de précision des patrons pour  
' réaliser les muscles du manipulateur gonflable.

' Le diamètre du bras, le nombre de muscles par circonférence et  
' l'amplitude des muscles sont les paramètres arbitraires.

' L'imprimante utilisée doit être compatible au modèle FX-80 ou  
' FX-85, marques déposées de Seiko Epson Corporation.

```
'*****  
'***** DESCRIPTION DES VARIABLES *****  
'*****
```

```
' PI 3.141592654  
' D Diamètre du bras du manipulateur (mm)  
' »» N Nombre de muscles par circonférence  
' A Amplitude des muscles (mm)  
' »» K Compteur de muscles  
' »» I Abscisse du patron (sens de la longueur) (points)  
' »» J Ordonnée du patron (sens de la largeur) (points)  
' X Abscisse du patron (sens de la longueur) (mm)  
' Y Ordonnée du patron (sens de la largeur) (mm)  
' »» J1 Reste de la division entière de J par 256  
' »» J2 Résultat de la division entière de J par 256
```

' NOTE: Le symbole »» indique les variables entières.

```
'*****  
'***** INITIALISATION *****  
'*****
```

```
DEFINT I,J,K,N  
WIDTH "LPT1:",255  
PI=3.141592654
```

```

*****
*****  ENTRÉE DES PARAMÈTRES  *****
*****

```

```

CLS:COLOR 14,0
PRINT:PRINT:PRINT:PRINT:PRINT
PRINT:INPUT "DIAMÈTRE DU BRAS      (mm) = ";D
PRINT:INPUT "NOMBRE DE MUSCLES     = ";N
PRINT:INPUT "AMPLITUDE DES MUSCLES (mm) = ";A
PRINT:PRINT:COLOR 12,0

```

```

*****
*****  IMPRESSION DU PATRON  *****
*****

```

```

PRINT:PRINT "TRAÇAGE DU PATRON À L'IMPRIMANTE"
PRINT:PRINT "VEUILLEZ PATIENTER S'IL VOUS PLAÎT..."

```

```

LPRINT:LPRINT
LPRINT:LPRINT "DIAMÈTRE DU BRAS      (mm) = ";D
LPRINT:LPRINT "NOMBRE DE MUSCLES     = ";N
LPRINT:LPRINT "AMPLITUDE DES MUSCLES (mm) = ";A
LPRINT:LPRINT
LPRINT CHR$(27)+"A"+CHR$(1)
FOR K=1 TO N
  FOR I=-1*(PI*D/N)*1.4175 TO ((PI*D/N)*1.4175)-1
    X=I/2.835
    Y=A/2*(COS(2*X/D)-COS(PI/N))/(1-COS(PI/N))
    J=Y*2.835
    LPRINT SPACE$(20);CHR$(27)+"*"+CHR$(5)+CHR$(1)+CHR$(0)+CHR$(16);
    IF J>0 THEN
      J1=J MOD 256
      J2=J\256

      'On doit éviter l'envoi du caractère CHR$(13)
      'qui pose des problèmes à l'impression...

      IF J1<>13 AND J2<>13 THEN LPRINT CHR$(27)+"*"+CHR$(5)+_
        CHR$(J1)+CHR$(J2)+STRING$(J-1,0)+CHR$(16);
    END IF
  LPRINT
NEXT I
NEXT K
LPRINT SPACE$(20);CHR$(27)+"*"+CHR$(5)+CHR$(1)+CHR$(0)+CHR$(16)
LPRINT CHR$(12)+CHR$(27)+"@"

COLOR 15,0:CLS
END

```

**ANNEXE 4: Disquette contenant les différents logiciels.**

Voir à l'intérieur de la couverture de dos.

**ANNEXE 5: Ordinogramme du logiciel de contrôle du manipulateur.**

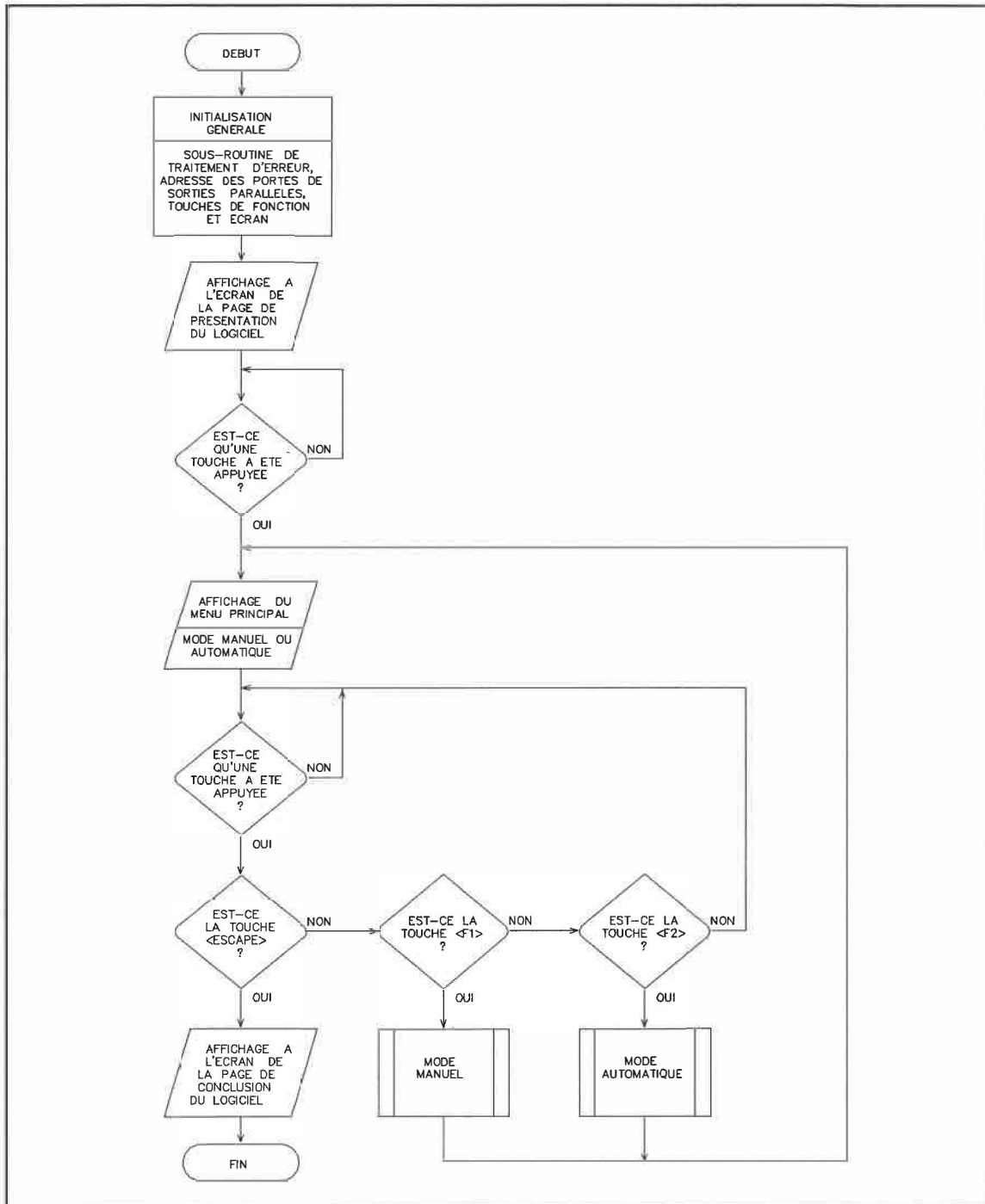


Figure A.4. Ordinogramme du logiciel de contrôle du manipulateur.

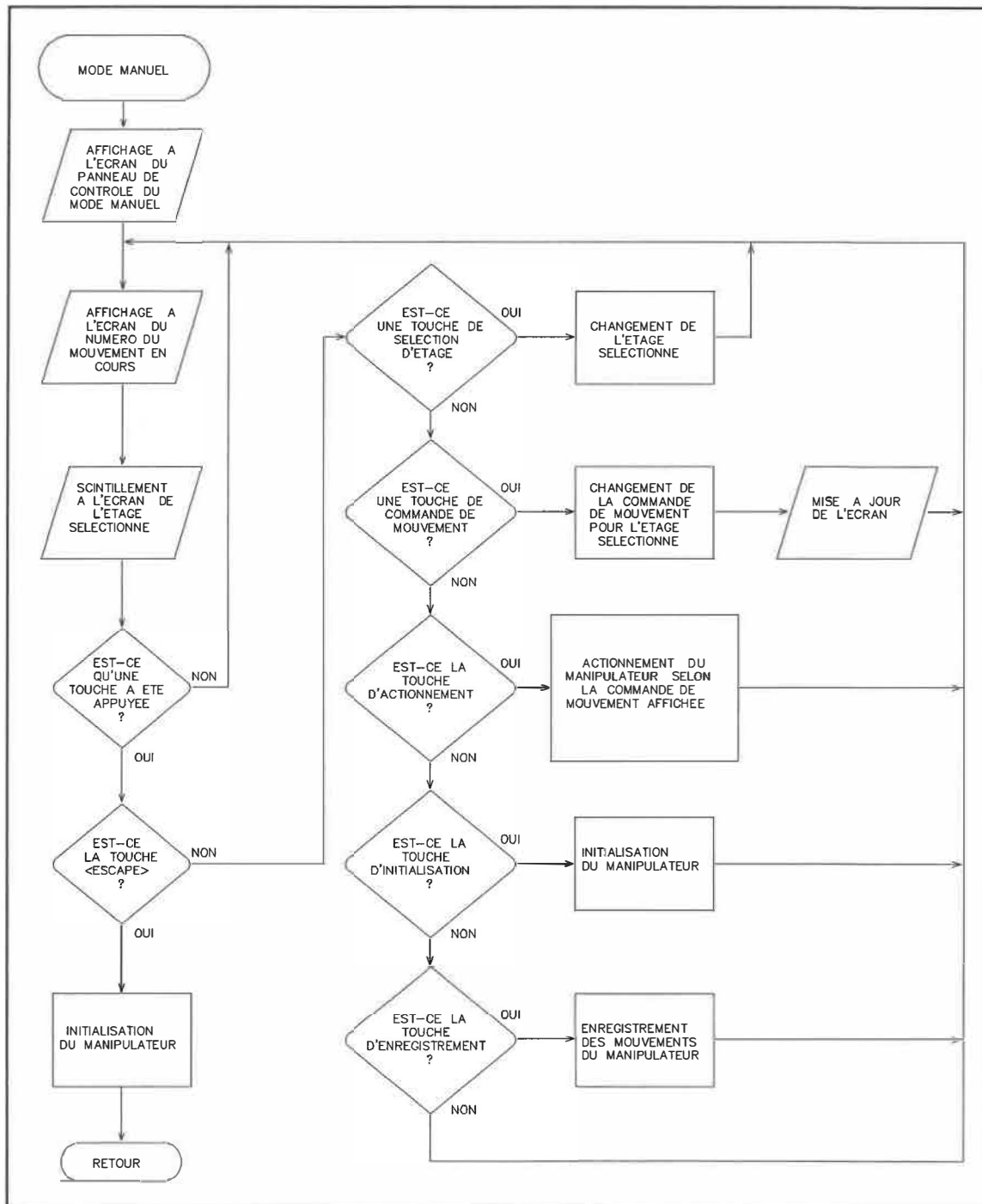


Figure A.4. (suite)

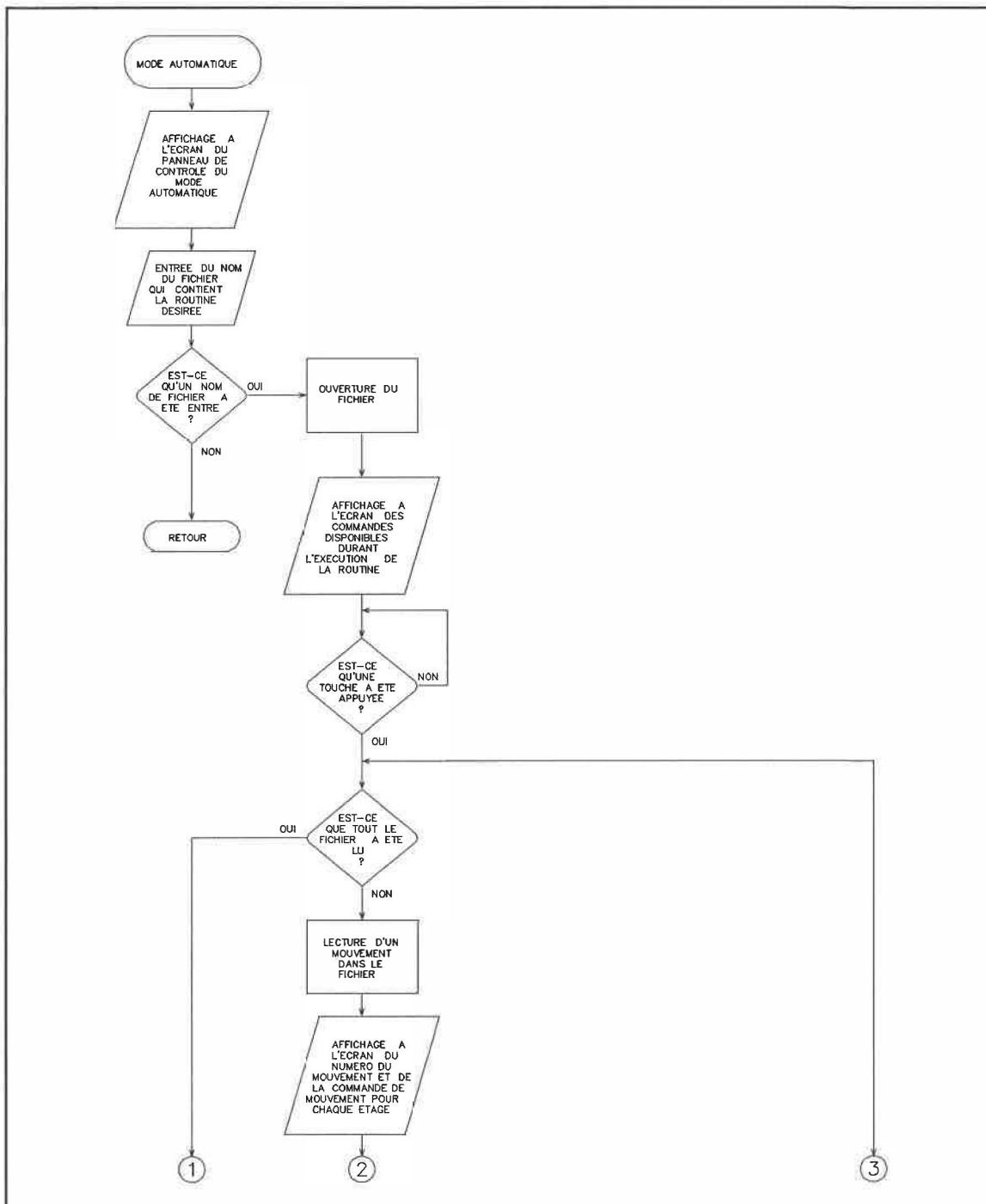


Figure A.4. (suite)

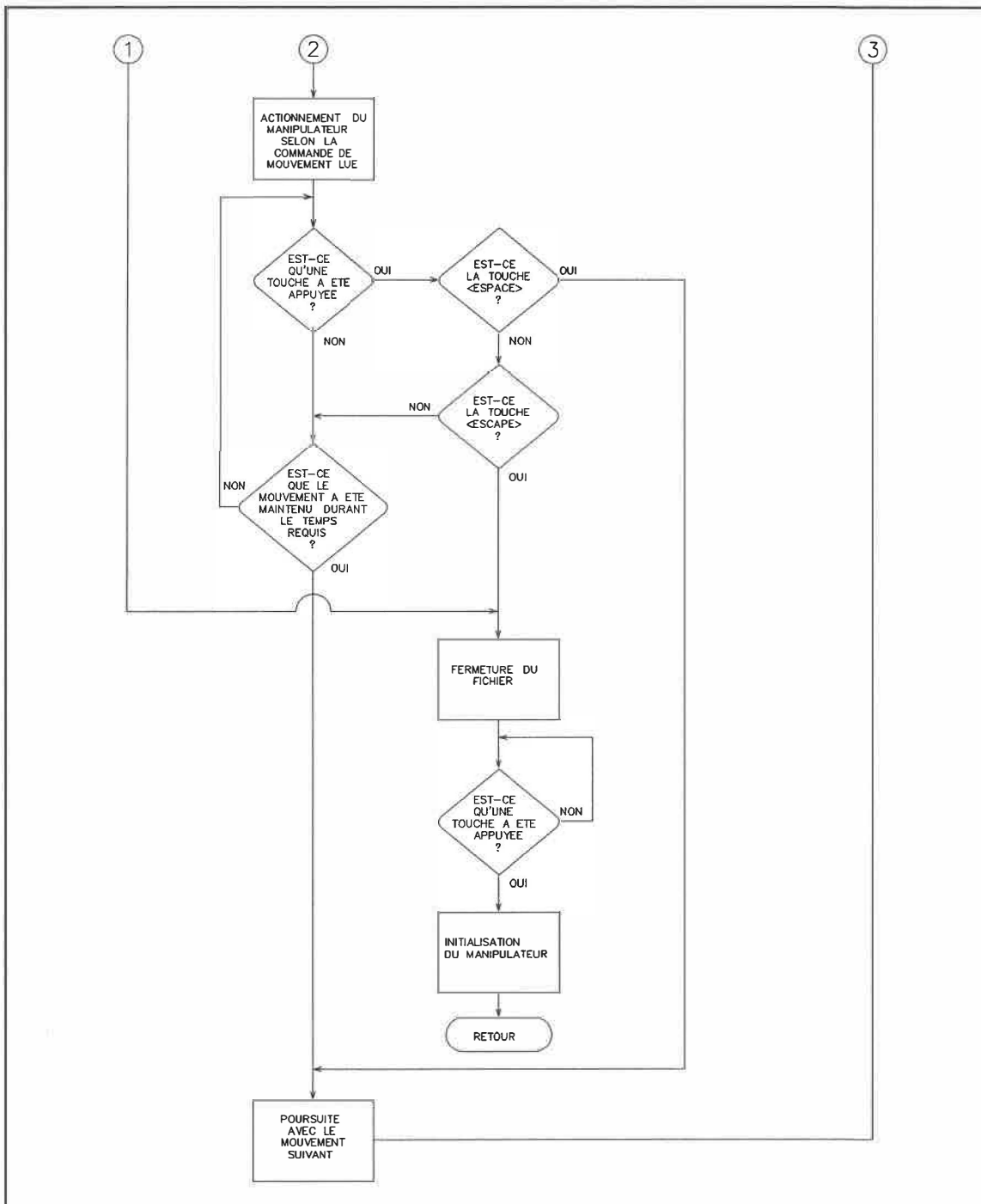


Figure A.4. (suite)

## ANNEXE 6: Logiciel de contrôle du manipulateur.

```
'*****
'*****
'*****          LOGICIEL DE CONTRÔLE          *****
'*****          DU MANIPULATEUR PNEUMATIQUE  *****
'*****
'***** Programmation: Bruno-Marie Béchard *****
'***** Révision:      24 novembre 1987      *****
'*****
'*****
```

```
'*****
'***** DESCRIPTION DES VARIABLES UTILISÉES *****
'*****
```

```
' ACT      Indicateur de nouveau mouvement (0 ou 1).
' ADRBASE  Adresse de base de la carte PC-MATE BASE BOARD.
' ADRLABM  Adresse relative de la carte LABMASTER.
' ADDRREL() Adresse relative du canal que l'on désire commander.
' COMM(,)  Tableau des commandes pour faire les mouvements.
' I, I$, J Variables temporaires.
' MODE     Mode d'utilisation du logiciel (0 ou 1).
' MOUV     Numéro du mouvement dans la routine actuelle.
' PORT     Numéro du port pour l'envoi de la commande (0 à 8).
' RAN      Numéro de rangée pour l'affichage à l'écran.
```

```
' NOTE: Toutes les variables sont entières.
```

```
'*****
'***** INITIALISATION GÉNÉRALE *****
'*****
```

```
ON ERROR GOTO TraitementErreur
OPTION BASE 0
DEFINT A-Z
DIM COMM(100,9)
DIM ADDRREL(8)
ADRBASE=&H210
ADRLABM=&H500
OUT ADRBASE+12,&H80
OUT ADRBASE+4,&H80
OUT ADRBASE+ADRLABM+15,&H80
DATA 15,14,13,7,6,5,12,13,14
FOR PORT=0 TO 8
    READ ADDRREL(PORT)
NEXT PORT
FOR PORT=6 TO 8
    ADDRREL(PORT)=ADDRREL(PORT)+ADRLABM
```



```

NEXT PORT
KEY OFF
FOR I=1 TO 10
  KEY I,""
NEXT I
SCREEN 0,0,0,0
WIDTH 80

```

```

'*****
'***** PRÉSENTATION DU LOGICIEL *****
'*****

```

```

COLOR 14,0
GOSUB Entete
LOCATE 5,17:PRINT "┌"+STRING$(45,"-")+┐"
FOR I=1 TO 17
  PRINT SPC(16);"│";SPC(45);"│"
NEXT I
LOCATE 23,17:PRINT "└"+STRING$(45,"-")+┘";
LOCATE 7,23:PRINT "Ce logiciel permet de contrôler le";
LOCATE 8,23:PRINT "manipulateur pneumatique à 36";
LOCATE 9,23:PRINT "degrés de liberté.";
LOCATE 11,23:PRINT "On peut contrôler le manipulateur";
LOCATE 12,23:PRINT "en mode manuel et enregistrer les";
LOCATE 13,23:PRINT "mouvements, ou bien utiliser une";
LOCATE 14,23:PRINT "routine déjà enregistrée.";
COLOR 12,0
LOCATE 16,23:PRINT "      *** IMPORTANT ***";
LOCATE 18,23:PRINT "Avant de poursuivre, veuillez vous";
LOCATE 19,23:PRINT "assurer que tous les branchements";
LOCATE 20,23:PRINT "illustrés sur le schéma du montage";
LOCATE 21,23:PRINT "ont été réalisés.";
COLOR 14,0
LOCATE 24,22:PRINT "Appuyez sur une touche pour continuer.";
Attentel:
I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO Attentel

```

```

'*****
'***** MENU PRINCIPAL *****
'*****

```

```

Menu:
GOSUB Entete
LOCATE 5,17:PRINT "┌"+STRING$(45,"-")+┐"
FOR I=1 TO 17
  PRINT SPC(16);"│";SPC(45);"│"
NEXT I
PRINT SPC(16);"└"+STRING$(45,"-")+┘";

```

```

LOCATE 10,22:PRINT "Pour choisir le mode d'utilisation du";
LOCATE 11,22:PRINT "logiciel, appuyez sur une des touches";
LOCATE 12,22:PRINT "situées à gauche du clavier:";
LOCATE 14,22:PRINT "<F1> pour passer en mode MANUEL";
LOCATE 15,22:PRINT "      (avec enregistrement facultatif)";
LOCATE 17,22:PRINT "<F2> pour passer en mode AUTOMATIQUE";
LOCATE 18,22:PRINT "      (utiliser une routine existante)";
LOCATE 24,20:PRINT "Appuyez sur la touche <ESC> pour terminer.";

```

Attente2:

```

I$=INKEY$:IF I$="" THEN Attente2
IF ASC(I$)=27 THEN GOTO Conclusion
IF I$=CHR$(0)+";" THEN MODE=0:GOSUB ModeManuel:GOTO Menu
IF I$=CHR$(0)+"<" THEN MODE=1:GOSUB ModeAutomatique:GOTO Menu
BEEP:GOTO Attente2

```

```

'*****
'***** CONCLUSION DU LOGICIEL *****
'*****

```

Conclusion:

```

CLS
PRINT :PRINT "Au revoir...":PRINT
END

```

```

'*****
'*****
'***** CONTRÔLE EN MODE MANUEL *****
'*****
'*****

```

ModeManuel:

```

GOSUB Entete
LOCATE 5,1:PRINT "┌"+STRING$(15,"-")+┐"+STRING$(53,"-")+_
"└"+STRING$(8,"-")+┘";
FOR I=1 TO 17
  PRINT "│";SPC(15);"│";SPC(53);"│";SPC(8);"│";
NEXT I
PRINT "└"+STRING$(15,"-")+┘"+STRING$(53,"-")+┘"+STRING$(8,"-")+┘";
LOCATE 15,1:PRINT "┌";STRING$(15,"-");"┘";
LOCATE 16,2:COLOR 15,0:PRINT "MOUVEMENT #";
LOCATE 6,2:PRINT "CLAVIER NUMÉR.";
COLOR 15,1
FOR I=0 TO 8
  LOCATE 6+2*I,73:PRINT I;
NEXT I
LOCATE 8,2:PRINT "┌ ";:LOCATE 8,6:PRINT " "+CHR$(24)+" ";
LOCATE 8,10:PRINT "┘ ";:LOCATE 8,14:PRINT " 0 ";
LOCATE 10,2:PRINT " "+CHR$(27)+" ";:LOCATE 10,6:PRINT " ";

```

```

LOCATE 10,10:PRINT " "+CHR$(26)+" ";LOCATE 10,14:PRINT " ^ ";
LOCATE 12,2:PRINT " L ";LOCATE 12,6:PRINT " "+CHR$(25)+" ";
LOCATE 12,10:PRINT " J ";LOCATE 12,14:PRINT " ";
LOCATE 13,14:PRINT " v ";
LOCATE 14,2:PRINT " z ";LOCATE 14,10:PRINT "zzz";
LOCATE 14,14:PRINT " ";
LOCATE 18,3:PRINT " F 7 ";LOCATE 18,10:PRINT " F 8 ";
LOCATE 19,3:PRINT "<INI>";LOCATE 19,10:PRINT "<ENR>";
LOCATE 21,3:PRINT " F 9 ";LOCATE 21,10:PRINT " F10 ";
LOCATE 22,3:PRINT "<ACT>";LOCATE 22,10:PRINT "<ARR>";
COLOR 14,0
GOSUB Neutralisation
LOCATE 6,19:COLOR 12,0
PRINT "IMPORTANT: Le témoin NumLock doit être allumé.":COLOR 14,0
LOCATE 8,19:PRINT "Vous voici aux commandes du manipulateur. L'étage";
LOCATE 9,19:PRINT "de muscles sélectionné scintille à droite.";
LOCATE 11,19:COLOR 9,0:PRINT "POUR SÉLECTIONNER";
COLOR 14,0:PRINT " d'autres étages, utilisez les" ;
LOCATE 12,19:PRINT "touches *, - et + situées à droite du clavier.";
LOCATE 14,19:COLOR 9,0:PRINT "POUR COMMANDER";
COLOR 14,0:PRINT " le manipulateur, utilisez le clavier";
LOCATE 15,19:PRINT "numérique pour l'orientation des mouvements, ainsi";
LOCATE 16,19:PRINT "que les touches de fonction suivantes:";
LOCATE 17,19:PRINT " <INI> INITIALISE une nouvelle routine";
LOCATE 18,19:PRINT " <ENR> ENREGISTRE la routine actuelle";
LOCATE 19,19:PRINT " <ACT> ACTIONNE le bras selon les commandes";
LOCATE 20,19:PRINT " <ARR> ARRÊTE le mouvement du bras";
LOCATE 22,19:PRINT "NOTE: <ALT> étend les commandes aux neuf étages.";

'*****
'***** BOUCLE DE COMMANDE *****
'*****

BoucleCommande:
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,20:PRINT "Appuyez sur la touche <ESC> pour terminer.";
LOCATE 16,13:COLOR 15,0:PRINT USING "###";MOUV+1;
IF PORT<0 THEN PORT=PORT+9
IF PORT>8 THEN PORT=PORT-9
RAN=6+2*PORT
LOCATE RAN,78:COLOR 0,2:PRINT CHR$(SCREEN(RAN,78))+CHR$(29);
COLOR 15,0:PRINT CHR$(SCREEN(RAN,78))+CHR$(29);:COLOR 14,0

'*****
'***** INTERPRÉTATION DES COMMANDES *****
'*****

I$=INKEY$

```

```

IF I$="" THEN GOTO BoucleCommande
IF ASC(I$)=27 THEN GOSUB Initialisation:RETURN
IF I$="*" THEN
  PORT=0
ELSEIF I$="-" THEN
  PORT=PORT-1
ELSEIF I$="+" THEN
  PORT=PORT+1
ELSEIF I$="1" THEN
  COLOR 15,0:PRINT "┘"+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=90
ELSEIF I$="2" THEN
  COLOR 15,0:PRINT CHR$(25)+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=89
ELSEIF I$="3" THEN
  COLOR 15,0:PRINT "┘"+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=153
ELSEIF I$="4" THEN
  COLOR 15,0:PRINT CHR$(27)+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=86
ELSEIF I$="5" THEN
  COLOR 15,0:PRINT " " +CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=0
ELSEIF I$="6" THEN
  COLOR 15,0:PRINT CHR$(26)+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=149
ELSEIF I$="7" THEN
  COLOR 15,0:PRINT "┘"+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=102
ELSEIF I$="8" THEN
  COLOR 15,0:PRINT CHR$(24)+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=101
ELSEIF I$="9" THEN
  COLOR 15,0:PRINT "┘"+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=165
ELSEIF I$="0" THEN
  COLOR 15,0:PRINT "z"+CHR$(29);:COLOR 14,0:COMM(MOUV,PORT)=85
ELSEIF I$="." THEN
  GOSUB RemiseZero
ELSEIF I$=CHR$(1) THEN
  GOSUB MouvementALT1
ELSEIF I$=CHR$(2) THEN
  GOSUB MouvementALT2
ELSEIF I$=CHR$(3) THEN
  GOSUB MouvementALT3
ELSEIF I$=CHR$(4) THEN
  GOSUB MouvementALT4
ELSEIF I$=CHR$(5) THEN
  GOSUB Neutralisation
ELSEIF I$=CHR$(6) THEN
  GOSUB MouvementALT6
ELSEIF I$=CHR$(7) THEN
  GOSUB MouvementALT7
ELSEIF I$=CHR$(8) THEN
  GOSUB MouvementALT8
ELSEIF I$=CHR$(9) THEN
  GOSUB MouvementALT9

```

```

ELSEIF LEN(I$)<>2 THEN
  BEEP
ELSEIF I$=CHR$(0)+"C" THEN
  GOSUB Actionnement
ELSEIF I$=CHR$(0)+"A" THEN
  GOSUB Initialisation
ELSEIF I$=CHR$(0)+"B" THEN
  GOSUB Enregistrement
ELSE
  BEEP
END IF
GOTO BoucleCommande

```

```

'*****
'*****
'*****  CONTRÔLE EN MODE AUTOMATIQUE  *****
'*****
'*****

```

ModeAutomatique:

```

GOSUB Entete
LOCATE 5,1:PRINT "┌"+STRING$(69,"-")+└"+STRING$(8,"-")+┘";
FOR I=1 TO 17
  PRINT "│";SPC(69);"│";SPC(8);"│";
NEXT I
PRINT "└"+STRING$(69,"-")+┘"+┌"+STRING$(8,"-")+┐";
LOCATE 5,55:PRINT "┌";
LOCATE 6,55:PRINT "└";:COLOR 15,0:PRINT "MOUVEMENT #";:COLOR 14,0
LOCATE 7,55:PRINT "└";STRING$(15,"-");"┘";
COLOR 15,1
FOR I=0 TO 8
  LOCATE 6+2*I,73:PRINT I;
NEXT I
COLOR 14,0
GOSUB Neutralisation
LOCATE 9,6:PRINT "Pour faire exécuter une routine déjà enregistrée,";
LOCATE 10,6
PRINT "insérez la disquette appropriée et donnez le nom exact";
LOCATE 11,6
PRINT "du fichier dans lequel la routine se trouve.";
FichierLecture:
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,1:INPUT;"---> ",FICHIERS$
IF FICHIERS$="" THEN GOTO Menu
100 OPEN FICHIERS$ FOR INPUT AS #1
LOCATE 13,6
PRINT "Le logiciel est maintenant prêt à exécuter la routine.";
LOCATE 14,6:PRINT "Toutes les commandes envoyées aux muscles pourront";

```

```

LOCATE 15,6:PRINT "être visualisées à mesure dans le tableau de droite.";
LOCATE 17,6:PRINT "Pendant l'exécution, vous pouvez appuyer sur:";
LOCATE 18,6:PRINT " <ESPACE> pour passer au mouvement suivant.";
LOCATE 19,6:PRINT " <ESC> pour terminer l'exécution de la routine.";
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,21:PRINT "Appuyez sur une touche pour débiter.";
Attente3:
I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO Attente3
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,24:PRINT "Exécution de la routine en cours.";
Lecture:
IF EOF(1) THEN GOTO FinRoutine
INPUT #1,COMM(MOUV,0),COMM(MOUV,1),COMM(MOUV,2),COMM(MOUV,3),_
      COMM(MOUV,4),COMM(MOUV,5),COMM(MOUV,6),COMM(MOUV,7),COMM(MOUV,8),_
      COMM(MOUV,9)

'*****
'***** VISUALISATION DES COMMANDES *****
'*****

COLOR 15,0
LOCATE 6,68:PRINT USING "###";MOUV+1;
FOR PORT=0 TO 8
  RAN=6+2*PORT
  LOCATE RAN,78
  IF COMM(MOUV,PORT)=90 THEN PRINT "L"+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=89 THEN PRINT CHR$(25)+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=153 THEN PRINT "J"+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=86 THEN PRINT CHR$(27)+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=0 THEN PRINT " "+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=149 THEN PRINT CHR$(26)+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=102 THEN PRINT "r"+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=101 THEN PRINT CHR$(24)+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=165 THEN PRINT "j"+CHR$(29);
  IF COMM(MOUV,PORT)=85 THEN PRINT "z"+CHR$(29);
NEXT PORT
COLOR 14,0

'*****
'***** ACTIONNEMENT DU MANIPULATEUR *****
'*****

FOR PORT=0 TO 8
  OUT ADRBASE+ADRREL(PORT),COMM(MOUV,PORT)
NEXT PORT
FOR I=0 TO COMM(MOUV,9)
  I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO ContinuerAction
  IF I$=" " THEN GOTO ProchainMouvement

```

```

    IF ASC(I$)=27 THEN GOTO FinRoutine
    BEEP
    ContinuerAction:
NEXT I
ProchainMouvement:
MOUV=MOUV+1
GOTO Lecture
FinRoutine:
CLOSE #1
GOSUB Neutralisation
FOR PORT=0 TO 8
    OUT ADRBASE+ADRREL(PORT),COMM(MOUV,PORT)
NEXT PORT
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,20:PRINT "Appuyez sur une touche pour terminer.";
Attente4:
I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO Attente4
GOSUB CommandeInitialisation
RETURN

'*****
'*****
'***** SOUS-ROUTINES *****
'*****
'*****

'*****
'***** S/R D'AFFICHAGE DE L'ENTÊTE DU LOGICIEL *****
'*****

Entete:
COLOR 14,0:CLS
COLOR 14,1
LOCATE 1,24:PRINT SPC(33);
LOCATE 2,24:PRINT"      LOGICIEL DE CONTRÔLE      ";
LOCATE 3,24:PRINT"      DU MANIPULATEUR PNEUMATIQUE      ";
LOCATE 4,24:PRINT SPC(33);
COLOR 14,0
RETURN

'*****
'***** S/R DE COMMANDES GÉNÉRALES DE MOUVEMENTS *****
'*****

MouvementALT1:
FOR PORT=0 TO 8
    LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT "L"+CHR$(29);:COLOR 14,0
    COMM(MOUV,PORT)=90

```

```
NEXT PORT
RETURN
```

```
MouvementALT2:
FOR PORT=0 TO 8
  LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT CHR$(25)+CHR$(29);:COLOR 14,0
  COMM(MOUV,PORT)=89
NEXT PORT
RETURN
```

```
MouvementALT3:
FOR PORT=0 TO 8
  LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT "J"+CHR$(29);:COLOR 14,0
  COMM(MOUV,PORT)=153
NEXT PORT
RETURN
```

```
MouvementALT4:
FOR PORT=0 TO 8
  LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT CHR$(27)+CHR$(29);:COLOR 14,0
  COMM(MOUV,PORT)=86
NEXT PORT
RETURN
```

```
MouvementALT6:
FOR PORT=0 TO 8
  LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT CHR$(26)+CHR$(29);:COLOR 14,0
  COMM(MOUV,PORT)=149
NEXT PORT
RETURN
```

```
MouvementALT7:
FOR PORT=0 TO 8
  LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT "I"+CHR$(29);:COLOR 14,0
  COMM(MOUV,PORT)=102
NEXT PORT
RETURN
```

```
MouvementALT8:
FOR PORT=0 TO 8
  LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT CHR$(24)+CHR$(29);:COLOR 14,0
  COMM(MOUV,PORT)=101
NEXT PORT
RETURN
```

```
MouvementALT9:
FOR PORT=0 TO 8
  LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT "Y"+CHR$(29);:COLOR 14,0
```



```

    COMM(MOUV,PORT)=165
NEXT PORT
RETURN

```

```

'*****
'*****  S/R DE COMMANDE GÉNÉRALE DE NEUTRALISATION  *****
'*****

```

```

Neutralisation:
FOR PORT=0 TO 8
    LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT " "+CHR$(29);:COLOR 14,0
    COMM(MOUV,PORT)=0
NEXT PORT
RETURN

```

```

'*****
'*****  S/R DE COMMANDE GÉNÉRALE DE REMISE À ZÉRO  *****
'*****

```

```

RemiseZero:
FOR PORT=0 TO 8
    LOCATE 6+2*PORT,78:COLOR 15,0:PRINT "z"+CHR$(29);:COLOR 14,0
    COMM(MOUV,PORT)=85
NEXT PORT
RETURN

```

```

'*****
'*****  S/R D'INITIALISATION DU MANIPULATEUR  *****
'*****

```

```

Initialisation:
IF MOUV=0 THEN GOTO AucunMouvement
IF ACT=0 THEN GOTO CommandeInitialisation
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,1
PRINT "---> Voulez-vous enregistrer la dernière routine (O ou N)?";
Attente5:
I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO Attente5
IF I$="O" OR I$="o" THEN GOSUB Enregistrement:GOTO CommandeInitialisation
IF I$="N" OR I$="n" THEN GOTO CommandeInitialisation
BEEP:GOTO Attente5
CommandeInitialisation:
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,10
PRINT "Un instant s.v.p... Initialisation du manipulateur en cours.";
GOSUB RemiseZero
FOR PORT=0 TO 8
    OUT ADRBASE+ADRREL(PORT),COMM(MOUV,PORT)

```

```

NEXT PORT
FOR I=1 TO 1000
  FOR J=1 TO 1000:NEXT J
NEXT I
GOSUB Neutralisation
FOR PORT=0 TO 8
  OUT ADRBASE+ADRREL(PORT),COMM(MOUV,PORT)
NEXT PORT
MOUV=0
ACT=0
AucunMouvement:
RETURN

```

```

'*****
'***** S/R D'ACTIONNEMENT DU MANIPULATEUR *****
'*****

```

```

Actionnement:
ACT=1
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
LOCATE 24,6
PRINT "Le bras est actionné... Appuyez sur <ARR> pour arrêter le
mouvement.";
FOR PORT=0 TO 8
  OUT ADRBASE+ADRREL(PORT),COMM(MOUV,PORT)
NEXT PORT
FOR I=0 TO 32766
  I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO PasArret
  IF I$=CHR$(0)+"D" THEN GOTO Arret
  BEEP
PasArret:
NEXT I
Arret:
FOR PORT=0 TO 8
  OUT ADRBASE+ADRREL(PORT),0
NEXT PORT
COMM(MOUV,9)=I-1
MOUV=MOUV+1
FOR PORT=0 TO 8
  COMM(MOUV,PORT)=COMM(MOUV-1,PORT)
NEXT PORT
RETURN

```

```

'*****
'***** S/R D'ENREGISTREMENT DE ROUTINES *****
'*****

```

```

Enregistrement:

```

```

IF MOUV<=0 THEN
  BEEP:BEEP
  LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
  LOCATE 24,1:COLOR 12,0
  PRINT "Il n'y a aucun mouvement à enregistrer. Appuyez sur une touche
pour continuer.";
  COLOR 14,0
  Attente6:
  I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO Attente6
ELSE
  FichierEnregistrement:
  LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
  LOCATE 24,1
  INPUT;"---> Dans quel fichier voulez-vous enregistrer cette
routine";FICHIERS$
  IF FICHIERS$<>" THEN
200 OPEN FICHIERS$ FOR OUTPUT AS #1
  LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);
  LOCATE 24,20:PRINT "Enregistrement de la routine en cours...";
  FOR I=0 TO MOUV-1
    WRITE #1,COMM(I,0);COMM(I,1);COMM(I,2);COMM(I,3);COMM(I,4);_
    COMM(I,5);COMM(I,6);COMM(I,7);COMM(I,8);COMM(I,9)
  NEXT I
  CLOSE #1
  ACT=0
  END IF
END IF
RETURN

```

```

'*****
'***** S/R DE TRAITEMENT D'ERREUR *****
'*****

```

```

TraitementErreur:
BEEP:BEEP
COLOR 12,0
LOCATE 24,1:PRINT SPC(79);:LOCATE 24,1
IF ERL=100 THEN
  IF ERR=52 THEN PRINT "Mauvais nom pour le fichier. Appuyez sur une
touche pour recommencer.";
  IF ERR=53 THEN PRINT "Fichier absent sur la disquette. Appuyez sur
une touche pour recommencer.";
  IF ERR=55 THEN CLOSE #1:PRINT "Erreur interne. Appuyez sur une touche
pour recommencer.";
  IF ERR=71 THEN PRINT "Lecteur de disquettes mal refermé. Appuyez sur
une touche pour recommencer.";
  Attente7:
  I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO Attente7

```

```
COLOR 14,0
RESUME FichierLecture
END IF
IF ERL=200 THEN
  IF ERR=52 OR ERR=53 THEN PRINT "Mauvais nom pour le fichier. Appuyez
sur une touche pour recommencer.";
  IF ERR=55 THEN CLOSE #1:PRINT "Erreur interne. Appuyez sur une touche
pour recommencer.";
  IF ERR=61 THEN PRINT "Disquette pleine: Changez-la. Appuyez sur une
touche pour recommencer.";
  IF ERR=70 THEN PRINT "Disquette protégée: Ôtez le collant. Appuyez
sur une touche pour recommencer.";
  IF ERR=71 THEN PRINT "Lecteur de disquettes mal refermé. Appuyez sur
une touche pour recommencer.";
  Attente8:
  I$=INKEY$:IF I$="" THEN GOTO Attente8
  COLOR 14,0
  RESUME FichierEnregistrement
END IF
GOSUB CommandeInitialisation
CLS
LOCATE 10,5:PRINT "ATTENTION: UNE ERREUR S'EST PRODUITE LORS DE
L'EXÉCUTION DU LOGICIEL."
LOCATE 11,5:PRINT "VÉRIFIEZ-EN LA CAUSE AVANT D'ESSAYER UNE NOUVELLE
EXÉCUTION."
LOCATE 13,5:PRINT "NOTE: Le manipulateur a été ré-initialisé pour plus
de sécurité."
LOCATE 17,1:PRINT "CODE DE L'ERREUR RELEVÉE: ";ERR:PRINT "LIGNE DU
LOGICIEL: ";ERL:PRINT "MESSAGE D'ERREUR:";
COLOR 14,0
ON ERROR GOTO 0
```

## **ANNEXE 7: Expérimentation sur le prototype de départ.**

### **CORPS PRINCIPAL:**

Longueur: 1m80  
Diamètre: 300mm (base)  
200mm (extrémité)  
Matériau: Vinyle renforcé de fibres.  
Poids: 639g/m<sup>2</sup>

Membranes étanches internes:

Trois manchons de vinyle clair.

### **MUSCLES:**

Amplitude: 250mm  
Arrangement: Sept étages de trois muscles.  
Ballonnets: En caoutchouc.  
Insérés dans des pochettes de vinyle renforcé.  
Tendons: En néoprène.

Tubes d'alimentation:

En vinyle clair.  
Diamètre: externe: 6mm  
interne: 3mm  
Poids: 26,0g/m

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MUSCLES:

Utilisent l'effet primaire (élongation) du gonflage des ballonnets. Les tendons, attachés au corps principal, transforment ce mouvement d'élongation en mouvement de contraction.

### POIDS DU MANIPULATEUR COMPLET:

Dégonflé, sans les tubes d'alimentation:	5600g
Tubes d'alimentation (21 muscles):	800g
Total:	6400g

### SOCLE:

Le socle permet l'utilisation du manipulateur en porte-à-faux seulement.

### PRESSION D'ÉCLATEMENT DES MUSCLES:

Les pochettes éclatent lorsque leur pression interne atteint 200kPa.

### PRESSIONS D'UTILISATION POUR LES TESTS:

Corps principal: 10kPa

Muscles: 175kPa

Le corps principal est maintenu à la plus faible pression nécessaire pour le garder à l'horizontale (sans plissement à la base). Les muscles sont maintenus juste sous leur pression d'éclatement afin de plier le corps principal le plus possible.

RAPPORT DE CONTRACTION MAXIMALE RÉEL DES MUSCLES:

$$RCM_R = A_F / A_i = 0,73$$

où  $A_F$  et  $A_i$  représentent les amplitudes finale et initiale des muscles du manipulateur de départ, tel qu'illustré à la figure 1.3.

Cette valeur est atteinte seulement lorsque les muscles sont abondamment lubrifiés de poudre de talc et utilisés juste sous leur pression d'éclatement.

FLEXIBILITÉ:

Les mesures sont prises avec le corps principal en porte-à-faux, en gonflant deux rangées juxtaposées de sept muscles pour provoquer un mouvement vers le haut à 30° par rapport à l'horizontale. L'angle de flexion maximal représente alors l'angle que fait le bout du manipulateur par rapport à sa position étendue.

Angle de flexion maximal:	100°	(avec lubrification abondante des muscles)
	30°	(sans lubrification)

## **ANNEXE 8: Expérimentation sur les matériaux et les fils.**

### **MUSCLES TYPIQUES:**

Amplitude: 100mm

Profil: Tel que défini à la figure A.2 pour:

$$D = 150\text{mm}$$

$$N = 2$$

$$A = 100\text{mm}$$

Tracé par le logiciel de l'annexe 3.

Support: Carré à double épaisseur de 300mm de côté en:

Vinyle renforcé

Néoprène

Dacron

Nylon (épais et mince)

Laminage nylon et polyuréthane

Couture: En point droit serré (points de 1,5mm) avec des fils de:

Nylon (gros et fin)

Coton (gros et fin)

72% Polyester/28% coton

Les muscles typiques sont testés à plat et libres de toute charge. Ils sont gonflés jusqu'à éclatement et leur comportement est étudié (déformation, raison d'éclatement, pression d'explosion). Pour tester les fils, le matériau utilisé comme support pour les muscles est le néoprène. Pour tester les matériaux, le fil de



polyester/coton est utilisé pour les coutures. Les tableaux 3.1 et 3.2 présentent les résultats.

MATÉRIAU	TEXTURE	POIDS (par m <sup>2</sup> )	FORME À 100kPa	PRESSION ET RAISON D'ÉCLATEMENT	
Vinyle renforcé	Bâche épaisse	639g	O.K.	350kPa	Couture
Néoprène	Bâche épaisse	817g	O.K.	350kPa	Couture
Dacron	Papier, voile	174g	Plissé	350kPa	Couture et tissus
Nylon épais	Drapeau épais	111g	O.K.	350kPa	Couture et tissus
Laminage nylon et polyuréthane	Recto: drapeau Verso: caoutchouc	171g	O.K.	275kPa	Tissus déchire
Nylon mince	Drapeau mince	63g	Déformé	150kPa	Mailles étirent

Tableau 3.1. Résultats des tests sur les matériaux.

FIL	DIAMÈTRE	PRESSION D'ÉCLATEMENT DU MUSCLE DE TEST ET NOTE	
Nylon fin	0,25mm	300kPa	S'étire beaucoup avant rupture
Nylon gros	0,35mm	-	Bloque la machine à coudre
Coton fin	0,40mm	200kPa	Casse souvent
Coton gros	0,65mm	275kPa	
Polyester/coton gros	0,80mm	350kPa	Résistant et facile à coudre

Tableau 3.2. Résultats des tests sur les fils.

## **ANNEXE 9: Expérimentation sur le prototype de test.**

### **CORPS PRINCIPAL:**

Longueur: 1m25  
Diamètre: 150mm  
Matériau: Nylon.  
Poids: 111g/m<sup>2</sup>

Membrane étanche interne:

Un manchon de caoutchouc.

### **MUSCLES:**

Amplitudes: 50mm, 100mm et 150mm  
Arrangements: Un étage de quatre muscles, un étage de trois muscles et un étage de deux paires de muscles antagonistes (voir figure 3.1).  
Ballonnets: En caoutchouc, insérés à même la paroi double du corps principal.

Tubes d'alimentation:

En polyéthylène rigide.

Diamètre: externe: 6mm

interne: 4mm

Poids: 15,4g/m

### **PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MUSCLES:**

Utilisent directement l'effet secondaire (contraction) du gonflage des ballonnets.

**POIDS DU MANIPULATEUR COMPLET:**

Dégonflé, sans les tubes d'alimentation:	900g
Tubes d'alimentation (11 muscles):	200g
Total:	1100g

**SOCLE:**

Le socle permet l'utilisation du manipulateur en porte-à-faux seulement.

**PRESSION D'ÉCLATEMENT DES MUSCLES:**

Les muscles éclatent lorsque leur pression interne atteint 350kPa.

**PRESSIONS D'UTILISATION POUR LES TESTS:**

Corps principal:	25kPa
Muscles:	175kPa

Ces pressions sont choisies pour respecter le facteur de sécurité de 2,0 introduit lors de la conception du système pneumatique dans la troisième partie du chapitre deuxième. Ainsi, les muscles sont utilisés à 50% de leur pression d'éclatement<sup>1</sup>. La pression du corps principal est établie en conséquence afin d'obtenir des performances intéressantes.

---

<sup>1</sup> Consulter l'annexe 8.

### COMPARAISON DES DIFFÉRENTS ARRANGEMENTS DE MUSCLES:

Pour ce test, les muscles comparés ont tous la même amplitude (100mm) et déplacent tous le corps principal dans la même direction (vers le haut). Les angles  $\Theta_{MAX}$  (voir figure 2.7) obtenus sont mesurés pour les différents arrangements et rapportés au tableau A.1.

ARRANGEMENT DE MUSCLES	ANGLE DE FLEXION $\Theta_{MAX}$ (°)
4 muscles par circonférence	5
3 muscles par circonférence	7
2 paires de muscles antagonistes	10

Tableau A.1. Résultats des tests sur les arrangements de muscles.

### COMPARAISON DES MUSCLES D'AMPLITUDES DIFFÉRENTES:

Pour ce test, les muscles comparés couvrent tous un demi-périmètre et déplacent tous le corps principal dans la même direction (vers le haut). Les angles  $\Theta_{MAX}$  (voir figure 2.7) obtenus sont mesurés pour les différentes amplitudes et rapportés au tableau A.2.

AMPLITUDE DES MUSCLES (mm)	ANGLE DE FLEXION $\Theta_{MAX}$ (°)	COMMENTAIRES
50	5	
100	10	
150	15	Striction du tiers du corps principal.

Tableau A.2. Résultats des tests sur les amplitudes des muscles.

Il est à noter que pour le muscle d'amplitude 150mm, la striction et la déformation importantes du corps principal entraînent une perte de rigidité considérable: une simple pression de la main fait fléchir le corps principal à la hauteur du muscle gonflé. L'amplitude des muscles ne devrait donc pas dépasser environ 70% du diamètre du corps principal.

## **ANNEXE 10: Expérimentations supplémentaires.**

### **TUBES D'ALIMENTATION:**

Deux tubes d'alimentation sont testés:

#### **TUBE DE VINYLE:**

Diamètre:            Externe: 6mm

                          Interne: 3mm

Poids:                26,0g/m

#### **TUBE DE POLYÉTHYLÈNE RIGIDE:**

Diamètre:            Externe: 6mm

                          Interne: 4mm

Poids:                15,4g/m

Le tube de polyéthylène rigide, en plus d'être 41% plus légers que le tube de vinyle, permet plus de débit grâce au diamètre interne plus grand. Aussi, sa plus grande rigidité lui assure de conserver sa forme en l'empêchant de s'écraser sous la pression.

### **ATTACHES POUR TUBES D'ALIMENTATION:**

Trois types d'attache sont testés pour supporter 350kPa:

### EMBOUS COLLÉS À L'EXTÉRIEUR:

Principe: Consiste à utiliser un embout collé à l'extérieur du ballon, tel qu'illustré dans la partie gauche de la figure A.5.

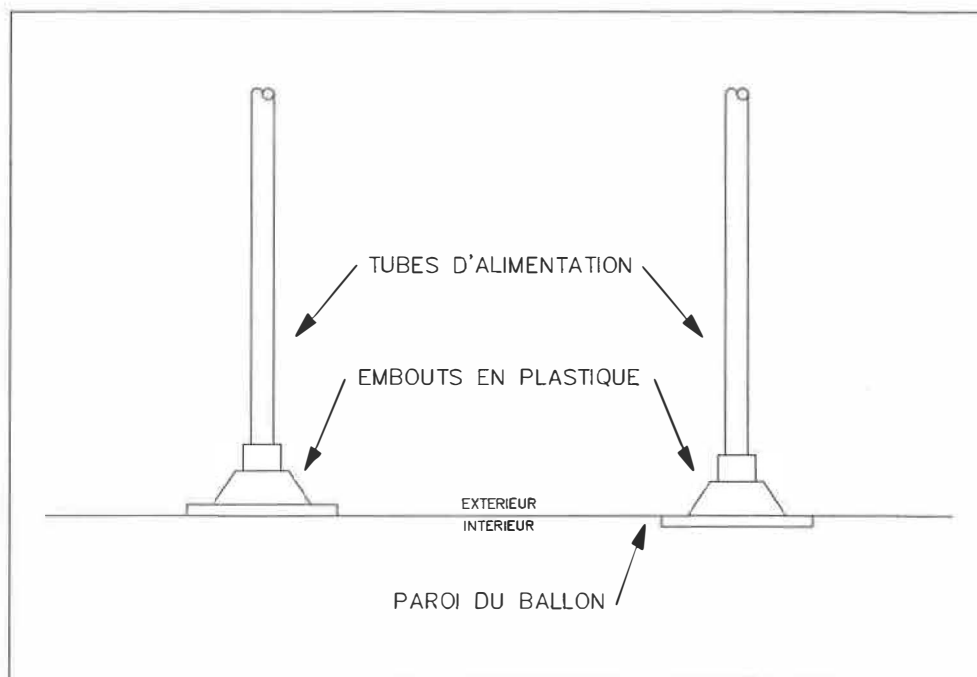


Figure A.5. Méthode de fixation avec embouts collés.

Résultats: Fuites à basse pression.  
Encombrant.

### EMBOUS COLLÉS À L'INTÉRIEUR:

Principe: Consiste à utiliser un embout collé à l'intérieur du ballon, tel qu'illustré dans la partie droite de la figure A.5.

Résultats: Fuites à environ 170kPa.  
Encombrant.  
Se bloque souvent lors du dégonflage par le ballon lui-même.

#### ATTACHES DE NYLON:

Principe: Consiste à fixer hermétiquement le ballonnet au tube par une attache de nylon. Ce système est montré à la figure 3.3.

Résultats: Étanche à 350kPa.  
Compact.  
Facile à réaliser.

#### MANCHONS ÉTANCHES:

Quatre types de construction sont testés pour supporter 50kPa:

#### BALLON DE CAOUTCHOUC EXTENSIBLE:

Construction: Ballon de caoutchouc extensible sphérique.

Diamètre gonflé: 2m

Résultats: Distribution inadéquate de la pression sur le corps principal.  
Difficulté à rejoindre les bouts du corps principal lors du gonflage.

Formation de plis et de noeuds.

Explose à basse pression.



**MANCHON EN VINYLE SOUDÉ:**

Construction: Une feuille de vinyle clair et souple est utilisée pour construire un ballon allongé.

Les joints sont soudés.

Résultats: Fuites à environ 20kPa.

Manchon très lourd.

Le vinyle a tendance à coller sur lui-même.

**MANCHON EN CAOUTCHOUC COLLÉ:**

Construction: Une feuille de caoutchouc pure gomme de 1mm d'épaisseur est utilisée pour construire un ballon allongé.

Les joints sont collés.

Résultats: Fuites à basse pression.

Difficile à coller convenablement.

Manchon extrêmement lourd.

**TUBE DE POLYÉTHYLÈNE MINCE:**

Construction: Un tube de polyéthylène mince (inextensible) est extrudé à un diamètre légèrement supérieur au diamètre du corps principal.

Les bouts du manchon en forme de saucisse sont refermés par des attaches de nylon.

Résultats: Étanche à 50kPa.

Facile à construire.

Très léger (32,4g/m pour un diamètre de 160mm).

## **ANNEXE 11: Expérimentation sur le prototype final.**

### **CORPS PRINCIPAL:**

Longueur: 1m65

Diamètre: 150mm

Matériau: Nylon.

Poids: 111g/m<sup>2</sup>

Membrane étanche interne:

Un manchon de polyéthylène souple.

Poids: 32,4g/m pour un diamètre de 160mm.

### **MUSCLES:**

Amplitude: 100mm

Arrangement: Neuf étages de deux paires de muscles antagonistes.

Ballonnets: En caoutchouc, insérés à même la paroi double du corps principal.

Tubes d'alimentation:

En polyéthylène rigide.

Diamètre: externe: 6mm

interne: 4mm

Poids: 15,4g/m

### **PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES MUSCLES:**

Utilisent directement l'effet secondaire (contraction) du gonflage des ballonnets.

POIDS DU MANIPULATEUR COMPLET:

Dégonflé, sans les tubes d'alimentation:	1300g
Tubes d'alimentation (36 muscles):	800g
Total:	2100g

SOCLE:

Le socle permet l'utilisation du manipulateur en porte-à-faux, suspendu ou érigé.

PRESSION D'ÉCLATEMENT DES MUSCLES:

Les muscles éclatent lorsque leur pression interne atteint 350kPa.

RAPPORT DE CONTRACTION MAXIMALE RÉEL DES MUSCLES:

$$RCM_R = A_F / A_i = 0,65$$

où  $A_F$  et  $A_i$  représentent les amplitudes finale et initiale des muscles du prototype final.

Pressions utilisées:	25kPa	(corps principal)
	175kPa	(muscles)

Ces pressions sont choisies pour respecter le facteur de sécurité de 2,0 introduit lors de la conception du système pneumatique dans la troisième partie du chapitre deuxième. Ainsi, les muscles sont utilisés à 50% de leur pression

d'éclatement et le corps principal est gonflé à 50% de la pression utilisée pour tester son étanchéité<sup>1</sup>.

#### FLEXIBILITÉ:

Les mesures POUR UNE RANGÉE DE NEUF MUSCLES sont prises avec le corps principal en porte-à-faux, en gonflant une rangée de neuf muscles pour provoquer un mouvement horizontal (afin d'éliminer l'effet de la gravité). L'angle de flexion maximal représente alors l'angle que fait le bout du manipulateur par rapport à sa position étendue.

Les mesures POUR DEUX RANGÉES DE NEUF MUSCLES sont prises avec le corps principal en porte-à-faux, en gonflant deux rangées juxtaposées de neuf muscles pour provoquer un mouvement vers le haut à 45° par rapport à l'horizontale. L'angle de flexion maximal représente alors l'angle que fait le bout du manipulateur par rapport à sa position étendue.

Les résultats sont rapportés au tableau A.3.

---

<sup>1</sup> Consulter les annexes 8 et 10.

P <sub>c</sub> (kPa)	P <sub>m</sub> (kPa)	ANGLE DE FLEXION MAXIMAL 1 rangée de 9 muscles (°)	ANGLE DE FLEXION MAXIMAL 2 rangées de 9 muscles (°)
10	138	118	
14	138	107	168
17	69	64	119
17	103	81	142
17	138	96	159
17	172	104	170
21	138	90	151
24	138	82	138
28	138	75	126
31	138	70	115
34	138	64	105

Tableau A.3. Résultats des tests sur la flexibilité.

#### TEMPS DE RÉPONSE MAXIMAL:

Le temps de réponse maximal est défini par le temps que prend le manipulateur pour atteindre l'angle de flexion maximal. Pour les tests, le manipulateur est en position érigée. Au départ, tous les muscles sont dégonflés. Le chronomètre démarre en même temps que l'ordinateur envoie la commande de gonflage pour une ou deux rangées de neuf muscles, et s'arrête lorsque le manipulateur s'est stabilisé pour une seconde à sa position finale (angle de flexion maximal). Une mesure semblable est ensuite prise pour le mouvement inverse causé par le dégonflage. Ces tests sont réalisés pour différentes combinaisons de P<sub>c</sub> et de P<sub>m</sub>. Puisque la variation de la pression des muscles P<sub>m</sub> s'avère ne pas contribuer de façon significative au temps de réponse maximal, seuls les résultats en fonction de la pression du corps principal P<sub>c</sub> sont rapportées au tableau A.4. De même, le temps de réponse maximal pour le gonflage étant toujours supérieur au temps de réponse maximal pour le dégonflage, seul le premier test est considéré. L'interprétation des résultats est faite au chapitre cinquième.

P <sub>c</sub> (kPa)	P <sub>m</sub> (kPa)	TEMPS DE RÉPONSE MAXIMAL	
		1 rangée de 9 muscles (sec)	2 rangées de 9 muscles (sec)
14	138	28	45
21	138	23	37
28	138	18	30
34	138	14	25

Tableau A.4. Résultats des tests sur le temps de réponse maximal.

Lors des essais, il a de plus été constaté que la plupart des mouvements du manipulateur se réalisent dans moins de 15 secondes puisqu'ordinairement la configuration de départ comporte déjà certains muscles gonflés.

#### CHARGE CRITIQUE:

La charge critique est définie par le poids de la charge minimale appliquée à l'extrémité du manipulateur qui provoque le plissement de la paroi du corps principal qui entre en compression. Pour les tests, le manipulateur est en position érigée et gonflé pour atteindre l'angle de flexion maximal. Pour différentes combinaisons de P<sub>c</sub> et de P<sub>m</sub>, des charges sont appliquées graduellement à l'extrémité du manipulateur. Lorsque la paroi du corps principal entre en compression (apparition de plis), la charge totale appliquée est mesurée et rapportée au tableau A.5. Puisque la variation de la pression des muscles P<sub>m</sub> s'avère ne pas contribuer de façon significative aux résultats, elle n'est pas considérée pour ce test.



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00290818 2

CA  
UI  
19  
B