

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE**

**PAR
MESSAN AFANDÉ**

**ÉTUDE ET DÉVELOPPEMENT D'UNE PINCE
ROBOTIQUE À TROIS DOIGTS, À RETOUR DE FORCE, AVEC
OPTIMISATION DE LA FORCE DE SAISIE**

AOÛT 1992

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	vii
RÉSUMÉ	viii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LISTE DES FIGURES	x
LISTE DES SYMBOLES	xiv
INTRODUCTION	1
CHAPITRES	
I. APERÇU SUR LA CLASSIFICATION DES EFFECTEURS EN	
ROBOTIQUE	4
Notion de degré de liberté d'un objet dans un repère	4
Notion de friction entre deux objets faisant contact	5
Notions générales sur les modules effecteurs	7
Notions générales sur les organes de préhension	8
Notions générales sur les modes de préhension	9
Les systèmes à action unilatérale	9
Les systèmes à action bilatérale	9
Les systèmes à action multilatérale	9
II. ANALYSE DU CONTRÔLE DE FORCE D'UNE PINCE À TROIS	
DOIGTS	11
La notion de force interne	12
La notion de force de saisie	13
Autre définition de la force de saisie	19

Définition des paramètres de saisie α, β, γ	19
Le paramètre α	19
Le paramètre β	20
Le paramètre γ	21
Conditions d'existence d'une force de saisie	22
Évaluation de la force de saisie	23
La notion de force de manipulation	24
Conditions d'existence d'une force de manipulation	24
Évaluation de la force de manipulation	26
Algorithme de décomposition de la force aux bouts des doigts	27
III. ANALYSE ET PROPOSITION D'UNE STRUCTURE	
MÉCANIQUE	30
Analyse de la structure mécanique	30
Optimisation de la force de saisie	31
Configuration optimale de saisie	31
Annulation de la force de manipulation dans le plan de saisie Q	32
Optimisation du temps d'opération	37
Proposition de la structure mécanique	38
Étude de la déformation au niveau des doigts lors du pincement	39
Détails techniques pour le choix du câble de traction et du moteur de pincement	42
IV. DÉTERMINATION DE PARAMÈTRES ET MODÉLISATION	60

Détermination de paramètres	60
Calcul du moment d'inertie J_L rapporté à l'axe des vis sans fin	60
Détermination expérimentale du coefficient de frottement visqueux D_L	63
Calcul des paramètres du corps d'épreuve pour le pincement	66
Modélisation du mouvement de prépositionnement et de l'action de pincement	69
Modélisation du prépositionnement	69
Modélisation du pincement	73
Circuit de conditionnement du signal des jauges	74
Élaboration de la consigne de force	77
Détails techniques sur le circuit de conditionnement	78
V. CONCEPTION DE LA CARTE ÉLECTRONIQUE DE COMMANDE .	80
Organisation générale de la carte	80
Choix du microcontrôleur	80
L'unité de contrôle	82
Les interfaces	82
Détails techniques	82
Programmation de l'interface de gestion d'interruptions	82
Description sommaire du circuit GAL16V8A .	82
Pourquoi utiliser le circuit GAL16V8A? . . .	83

Description des variables d'entrée et de sortie	84
Description des équations de fonctionnement.	85
Décodage d'adresses et connecteurs de communication	86
VI. ÉTUDE DES BOUCLES DE COMMANDE	89
Boucle de prépositionnement	89
Détermination des fonctions de transfert	90
Bloc servomoteur	90
Bloc amplificateur	92
Bloc détecteur	95
Bloc compensateur	96
Étude de la stabilité dans la domaine continu	96
Étude de la stabilité dans le domaine échantillonné	103
Loi de commande et profil de vitesse	107
Boucle de pincement	109
Détermination des fonctions de transfert	109
Bloc moteur-réducteur	109
Bloc amplificateur	110
Bloc détecteur	110
Étude de la stabilité dans la domaine continu	111
Étude de la stabilité dans le domaine échantillonné	114
Loi de commande et modèle de référence	116
VII. ÉLABORATION DU LOGICIEL DE COMMANDE	117
Structure générale du logiciel de commande	117
Organigrammes des différents programmes	119
Organigramme du programme principal	119

Organigramme des programmes du deuxième	
niveau de décision	121
Routine de commande de positionnement.	121
Routine de commande de pincement	123
Module de communication	123
Organigramme des programmes du troisième	
niveau de décision	126
Sous-routine d'élaboration du positionnement	
actuel désiré	126
Sous-routine d'élaboration de la consigne de	
position	128
Module de comptage des impulsions du disque	
codeur	129
Module de profil de vitesse	129
Module d'élaboration de la table de délais	
variables en accélération	129
Module d'élaboration de la table de délais	
variables en décélération	130
Module de lecture du convertisseur A/N	130
Module de commande	135
CONCLUSION	138
BIBLIOGRAPHIE	140
ANNEXES	
A. SCHÉMAS ÉLECTRIQUES PERTINENTS ET DESSIN DU	
CIRCUIT IMPRIMÉ	143
B. PROGRAMMES DE SIMULATION	150

C	FICHIER SOURCE DU LOGICIEL DE COMMANDE . . .	170
D.	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX	197

AVANT-PROPOS

Nous vivons actuellement dans un monde, où l'humain accepte et s'adapte de plus en plus, à un environnement robotisé qui se développe de façon vertigineuse. On peut citer, entre autres, les systèmes robotiques ultra performants utilisés dans les domaines médical et spatial, et les superbes mécanismes que constituent les nouvelles versions de l'arsenal de combat aérien. Ce fut donc avec un enthousiasme et un intérêt tout particulier, que j'ai abordé le présent sujet, afin de goûter à certaines des difficultés multidisciplinaires qui existent derrière tout équipement automatisé. Les principaux buts visés étant, le développement d'aptitudes à mener une analyse cohérente, ainsi que la recherche de solutions adéquates.

J'aimerais donc, adresser mes remerciements à Dr Aloïs KADIMA et à Dr Démagna KOFFI, respectivement directeur et co-directeur du projet, pour leur implication. Mes remerciements vont également à Mr Pierre GIRARD, coordinateur du projet et responsable du laboratoire de robotique à l'IREQ, pour sa disponibilité et son implication. Je n'oublie pas, responsables et encadreurs du Programme de Bourse de la Francophonie, pour m'avoir donné l'opportunité de poursuivre les études de second cycle. Mes pensées se tournent aussi, vers tous ceux qui me sont chers ou qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce projet.

RÉSUMÉ

Ce mémoire présente l'étude et le développement d'une pince de robot à trois doigts, à retour de force, avec optimisation de la force de saisie. Sa structure mécanique s'adapte au saisie d'objets à symétrie circulaire, dont les isolateurs en porcelaine sur les lignes de distribution d'électricité. Sa force maximale de saisie est de 100 N. La pince sera intégrée à un télémanipulateur, afin de rendre les opérations de maintenance sur les lignes, sécuritaires, automatiques ou semi- automatiques. Après l'introduction, nous présenterons un bref aperçu sur la classification des effecteurs en robotique, afin de situer le lecteur dans le domaine. Nous exposerons ensuite, une analyse sur le contrôle de force d'une pince à trois doigts, suivie de l'analyse et proposition de la structure mécanique. La détermination des paramètres et la modélisation des systèmes, ainsi que la conception de la carte électronique de commande seront aussi présentées. Nous poursuivrons le développement en étudiant les différentes boucles de commande, suivi de l'élaboration du logiciel de commande. Nous finirons par une conclusion dans laquelle nous exposerons les principaux résultats obtenus ainsi que les développements futurs.

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux

1.	Résultats de simulation pour les valeurs des vecteurs \mathbf{H} , \mathbf{F}_s , \mathbf{F}_m	35
2.	Résultats de pesage	62
3.	Valeurs de consigne N_{imp} en fonction du paramètre de dimension r_n	72
4.	Décodage d'adresses	86
5.	Détails sur les connecteurs de l'interface de communication	88
6.	Adressage de la table des coordonnées radiales . .	127

LISTE DES FIGURES

Figures

1.	Illustration de la notion de degré de liberté	5
2.	Illustration de la notion de frottement sec	6
3.	Systèmes à action bilatérale	10
4.	Systèmes à action multilatérale.	10
5.	Schéma pour la notion de force interne	12
6.	Décomposition de la force interne dans le plan de saisie Q	13
7.	Configuration de vecteurs au point de saisie	18
8.	Illustration de la signification du paramètre α	19
9.	Illustration de la signification du paramètre β	20
10.	Illustration de la signification du paramètre γ	21
11.	Exemple d'illustration de la condition 2	23
12.	Vecteurs dans le plan de saisie Q	25
13.	Répartition symétrique des trois doigts	30
14.	Influence de l'angle de saisie	31
15.	Vecteurs force dans le plan de saisie Q	32
16.	Schéma de l'étude de déformation sur les doigts	40
17.	Sollicitation en flexion du doigt mobile	41
18.	Récapitulatif sur l'étude des doigts sollicités en flexion	43
19.	Contrainte nominale sur fibres extrêmes	44

20.	Vue d'ensemble simplifiée: base et unité de saisie .	46
21.	Détails sur le système de pincement	47
22.	Plateau supérieur	48
23.	Vues de coupes du plateau supérieur	49
24.	Plateau inférieur	50
25.	Vues de coupes du plateau inférieur	51
26.	Support d'engrenages	52
27.	Doigt mobile	53
28.	Doigt semi-mobile	54
29.	Support du moteur de prépositionnement	55
30.	Corps d'épreuve pour la mesure de la force de pincement	56
31.	Poulie et pièce de guidage du câble gainé	57
32.	Poulie de traction du câble de pincement	58
33.	Support du moteur de pincement	59
34.	Schéma équivalent du point de vue inertie	61
35.	Schéma équivalent du point de vue frottement visqueux	65
36.	Schéma d'étude du corps d'épreuve pour la mesure de force	67
37.	Récapitulatif sur l'étude du corps d'épreuve	68
38.	Modélisation du mouvement de prépositionnement .	71
39.	Circuit de conditionnement du signal des jauges . .	74
40.	Montage à trois fils	79
41.	Carte électronique de commande	81

42.	Entrées-sorties de l'interface de gestion d'interruptions	83
43.	Connection série entre une périphérie et la carte . .	87
44.	Diagramme structurel du prépositionnement . . .	89
45.	Courbes pour la simplification de modèle	91
46.	Mode PWM du microcontrôleur	92
47.	Formes d'ondes du mode PWM du microcontrôleur .	93
48.	Module de commande de l'interface de puissance .	94
49.	Diagramme structurel détaillé pour le prépositionnement	96
50.	Boucle ouverte sans compensateur (prépositionnement)	98
51.	Boucle fermée sans compensateur (prépositionnement)	99
52.	Boucle ouverte avec gain $K_{pid}=30$ (prépositionnement)	100
53.	Boucle ouverte avec compensateur (prépositionnement)	101
54.	Boucle fermée avec compensateur (prépositionnement)	102
55.	Diagramme structurel dans le domaine échantillonné (prépositionnement)	103
56.	Pôles du système échantillonné (prépositionnement)	106
57.	Profil de vitesse trapézoïdal symétrique	108
58.	Diagramme structurel de la commande de pincement	109
59.	Diagramme structurel détaillé pour le pincement . .	111

60.	Boucle ouverte sans compensateur (pincement) . .	112
61.	Boucle fermée sans compensateur (pincement) . . .	113
62.	Diagramme structurel dans le domaine échantillonné (pincement)	114
63.	Pôles du système échantillonné (pincement)	115
64.	Structure générale du logiciel de commande	118
65.	Programme principal	120
66.	L'approche de commande du prépositionnement . .	121
67.	Routine de commande du prépositionnement . . .	122
68.	Routine de commande de pincement	124
69.	Module de communication	125
70.	Sous-routine: positionnement désiré	127
71.	Sous-routine: élaboration de la consigne de position	128
72.	Module de comptage d'impulsions	131
73.	Module de profil de vitesse	132
74.	Module de délais variables: profil de vitesse en accélération	133
75.	Module de délais variables: profil de vitesse en décélération	134
76.	Module de lecture du convertisseur A/N	135
77.	Module de commande	136

LISTE DES SYMBOLES *

R_a :	résistance de l'induit (moteur à courant continu).
L_a :	inductance de l'induit (moteur à courant continu).
K_e :	constante de f.c.e.m. (moteur à courant continu).
K_t :	constante de couple (moteur à courant continu).
D_m :	coefficient de frottement visqueux (moteur à courant continu).
J_m :	moment d'inertie (moteur à courant continu).
T_g :	couple électromagnétique (moteur à courant continu).
D_L :	coefficient de frottement visqueux (charge).
J_L :	moment d'inertie (charge).
N :	rapport de réduction (moteur-réducteur).
η :	rendement (moteur-réducteur).
E :	module d'élasticité.
S_y :	limite d'élasticité.
G_F :	sensibilité nominale des jauges de contrainte.
G_{FD} :	sensibilité dégradée des jauges de contrainte.
F_I :	force d'action exercée par la câble de traction.
F_O :	force de réaction exercée par l'objet saisie.
f_i :	vecteur force au point de contact C_i .
μ_i :	coefficient de frottement statique au point de contact C_i .
F :	vecteur force totale aux bouts des doigts.
F_m :	force de manipulation.
F_s :	force de saisie.

- B_m : matrice de manipulation.
 B_s : matrice de saisie.
 r_i : vecteur de position du point de contact C_i .
 e_{ij} : vecteur unitaire caractérisant le plan de saisie Q .
 \hat{e}_{ij} : vecteur unitaire lié à la force de manipulation.
 \hat{e}_{ij} : vecteur unitaire lié à la force de saisie.
 u_c^* : variable de commande discrète.
 r_n : paramètre de dimension pour le prépositionnement.
 N_{imp} : consigne de position pour le prépositionnement.
 F_{con} : consigne de la force de pincement.
 CMDSTS: code de commande pour l'identification de services,
 au niveau du logiciel de commande.

* Les variables du logiciel de commande sont définies au chapitre concerné.

INTRODUCTION

Le remplacement des isolateurs en porcelaine endommagés, sur les lignes de distribution d'électricité pose des problèmes de sécurité au niveau des opérateurs humains. Une telle opération, s'effectue sous tension et comporte les séquences suivantes:

- dégagement du conducteur monté sur l'isolateur,
- dévissage de l'isolateur endommagé,
- vissage du nouvel isolateur,
- fixation à nouveau du conducteur sur l'isolateur.

Ces différentes séquences démontrent la délicatesse de la manœuvre face à l'opérateur; par conséquent les travaux deviennent lents , et donc coûteux.

Une des solutions à ce problème est la mise au point d'un télémanipulateur muni d'un préhenseur adapté à la saisie de l'isolateur, afin de rendre les opérations de maintenance, sécuritaires, automatiques ou semi-automatiques. Ainsi, le but du travail présenté dans ce rapport est l'étude et le développement de la pince du robot sous forme d'un système intelligent et autonome, facilement adaptable au robot, avec une force maximale de préhension au bout des doigts de 100 N environ. Pour un tel préhenseur, on recherchera essentiellement , une optimisation de la force de saisie aux bouts des doigts et une saisie symétrique et rigide d'objets à symétrie circulaire. Une étude bibliographique nous a amenés à constater l'évolution des organes de préhension avec l'intégration de plus en plus de capteurs

tactiles. Des structures complexes [1] [2] [3] [5] [6] ont été développées sur le modèle de la main humaine. Elles comportent au moins trois doigts et intègrent en général un nombre considérable de capteurs tactiles. Elles ont un degré de liberté au moins égal à neuf. Ces structures ont toutes l'avantage de posséder une bonne dextérité, mais elles effectuent des saisies asymétriques et peu rigides de par leur structure mécanique. Ces modèles sont généralement conçus pour les opérations de manipulation et d'exploration de surface. Des versions moins complexes [7] ont été aussi développées (degré de liberté, inférieur à neuf, doigt fixe servant de référence). Mais leurs mouvements de saisie demeurent toujours asymétriques. Le modèle pentographique à trois doigts [4], intégrant des capteurs de force à fibre optique, est intéressant dans ce sens qu'il réalise un mouvement d'approche et de saisie parallèle; mais sa structure mécanique ne garantit pas une bonne rigidité lors du pincement et des opérations de vissage. Ce modèle pourra être utilisé dans les applications nécessitant de faibles forces de saisie.

La solution que nous proposons est un modèle à trois doigts, à deux actions. Sa structure mécanique est basée sur un système à vis sans fin. Le retour de force est réalisé par un système de câble agissant sur une lame d'acier, en flexion, comportant deux jauges de contrainte. Le mode d'opération à deux actions se caractérise par les séquences suivantes:

- un premier mouvement d'approche qui permet de positionner les trois doigts de façon parallèle à la dimension de l'objet à saisir;
- un second mouvement de pincement ou de relâchement.

Les trois points de saisie sont situés symétriquement sur un cercle centré sur le milieu de la pince.

Nous présenterons d'abord, un bref aperçu sur la classification des effecteurs en robotique afin de situer le lecteur dans le domaine. Ensuite nous exposerons une étude mathématique sur le contrôle de force d'une pince à trois doigts, suivie de l'analyse et proposition de notre solution. La modélisation des systèmes, la conception de l'électronique de commande, l'étude des boucles d'asservissement, l'élaboration du logiciel de commande seront présentés ainsi que les principaux résultats.

CHAPITRE 1

APERÇU SUR LA CLASSIFICATION DES EFFECTEURS EN ROBOTIQUE

Ce chapitre aura un caractère purement descriptif dans ce sens qu'on y exposera un bref aperçu quant à la classification des effecteurs en robotique ainsi que les problèmes qui se posent dans le domaine. Ensuite nous nous intéresserons plus particulièrement aux organes de préhension. De plus nous y présenterons, brièvement, certaines notions générales en mécanique qui devraient aider à la bonne compréhension de ce rapport.

Notion de degré de liberté d'un objet dans un repère [9]: Considérons, le repère $R(0, x, y, z)$ dans l'espace, et un objet "OBJ1" complètement libre dans cet espace (Figure 1.a). On remarque alors que l'objet "OBJ1", peut réaliser six mouvements indépendants dans l'espace conformément au repère R , à savoir:

- trois mouvements de translation dont: T_x , T_y et T_z suivant les axes respectifs x , y , et z ;
- trois mouvements de rotation dont: R_x , R_y et R_z autour des axes respectifs x , y , et z .

Par définition, le degré de liberté (ddl) d'un objet dans un repère donné est le nombre de mouvements indépendants que ce dernier peut effectuer dans ce repère. Ainsi le ddl de l'objet "OBJ1" dans le repère R est égal à six.

Considérons maintenant que l'objet "OBJ1" fait contact avec un autre

objet "OBJ2" auquel est lié le repère R (Figure 1.b). On remarque alors,

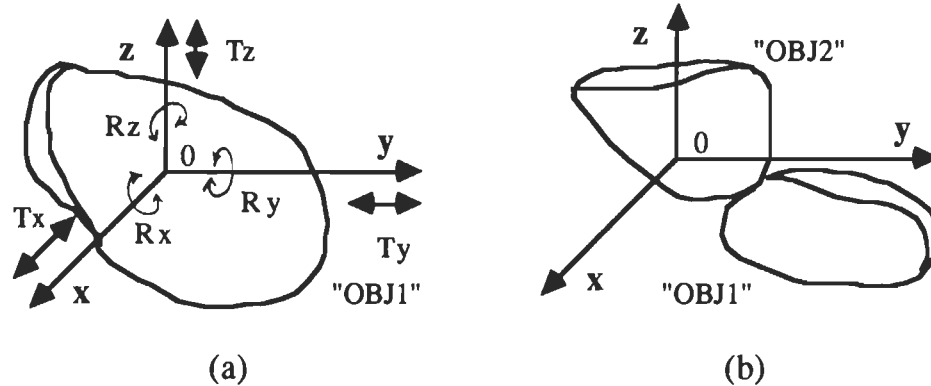


Figure 1. Illustration de la notion de degré de liberté.

que le ddl de l'objet "OBJ1" relativement au repère R (contact non rompu), est toujours inférieur à six.

En considérant plus particulièrement la notion de contact entre deux objets, on remarque que celui-ci peut être soit ponctuel, linéaire ou planaire. Sont considérés comme stables, les contacts ponctuels suivants: point sur plan et ligne sur ligne non colinéaire. Aussi les contacts linéaires, ligne sur plan sont dits stables, de même que les contacts planaires. Par contre les contacts ponctuels, ligne sur point, point sur point, sont considérés comme instables, étant donné qu'ils peuvent se rompre assez facilement pendant les mouvements relatifs entre les deux objets. Cette analyse nous amène à introduire la notion de force de friction.

Notion de friction entre deux objets faisant contact [9]: Le phénomène de friction ou frottement sec empêche plus ou moins le glissement

relatif entre deux objets faisant contact. Considérons qu'on applique une force F à un objet "OBJ1" de poids P reposant sur une surface "S" (Figure 2), et supposons que l'intensité de la force F augmente graduellement. On remarque alors que la force de friction F_c empêche le glissement jusqu'à une certaine valeur maximale de F . On définit alors la limite maximale de la force de friction F_{cm} par la loi de Coulomb comme suit:

$$(1,1) \quad F_{cm} = \mu_s N$$

Avec N et μ_s respectivement force normale et coefficient de frottement statique à la surface de contact.

Cette limite maximale F_{cm} caractérise l'imminence du glissement. Comme on le remarque dans la formule (1,1), la force de friction dépend de la réaction normale à la surface de contact. Sa direction est toujours tangentielle à la surface au point de contact. À F_{cm} on associe l'angle de frottement statique Φ_s définit comme suit:

$$(1,2) \quad \tan(\Phi_s) = \mu_s$$

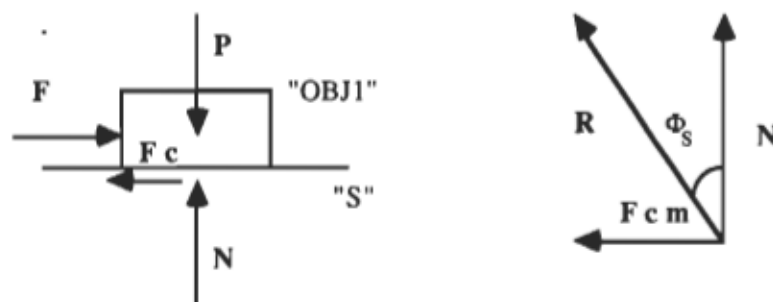


Figure 2. Illustration de la notion de frottement sec.

La condition de non glissement suppose donc que l'angle entre la résultante \mathbf{R} et la normale à la surface de contact soit inférieur à l'angle limite de frottement Φ_s .

En conclusion à ces deux notions générales nous allons remarquer que le frottement sec réduit le nombre de mouvement relatif d'un objet par rapport à un autre. Ainsi le ddl d'un objet relativement à un autre qui lui fait contact en un ou plusieurs points, dépend des caractéristiques suivantes:

- formes des surfaces en contact,
- positions relatives des différents contacts,
- effet de la friction à chaque surface de contact.

Notions générales sur les modules effecteurs [10]: On désigne par le terme effecteurs, l'ensemble des organes terminaux d'un robot. Ils sont en interaction directe avec l'environnement de travail et se présentent sous diverses formes suivant les tâches spécifiques à accomplir.

Ainsi distingue-t-on entre autres:

- les organes de préhension (pinces, ventouses);
- les organes de projection (buses);
- les organes de soudure à l'arc (torches).

La diversité des opérations réalisables suscite encore des questions face à la notion d'effecteur universel. Un effecteur est un système en soi, intégrant capteurs et actionneurs appropriés. Souvent, son intégration comme élément d'un robot pose certains problèmes dont:

- les problèmes de connexions mécaniques, liés à la structure

mécanique;

- les problèmes de connexions énergétiques, touchant la transmission de l'énergie nécessaire pour rendre le module opérationnel;
- les problèmes de connexions informationnelles qui visent la communication entre le module et le robot;
- les problèmes de connexions logicielles qui tiennent compte de l'interface logiciel entre le module et le robot;
- les problèmes d'isolation dans le cas des hautes tensions.

Notions générales sur les organes de préhension: Les organes de préhension sont essentiellement les pinces et les ventouses. Le choix d'un organe de préhension nécessite la considération de certains critères [10] dont:

- les caractéristiques du robot porteur (masse maximale transportable);
- les données concernant l'objet à manipuler dont:
 - . la masse;
 - . la consistance (rigidité, déformabilité);
 - . la matière (fragilité, magnétisme, rugosité);
 - . la géométrie (objets, à 1, 2, 3 dimensions, pleins ou creux);
 - . les surfaces en contact;
 - . les forces en présence (inertie, pesanteur, pression);
 - . l'environnement (température, humidité, accessibilité...)
- la technologie de préhension, mode de saisie (serrage ou adhérence);

- la flexibilité (remplacement, réglage, adaptabilité);
- les coûts et délais de conception, de réalisation et d'essai, de fonctionnement et d'entretien.

Notions générales sur les modes de préhension[10]: Les modes de préhension permettent de classer les préhenseurs en trois grandes catégories dont:

- les systèmes à action unilatérale,
- les systèmes à action bilatérale,
- les systèmes à action multilatérale.

Les systèmes à action unilatérale: Ce sont des systèmes qui agissent essentiellement par des forces d'attraction. Ils sont surtout de type ventouse et fonctionnent par adhérence.

On distingue principalement:

- les ventouses à vide,
- les ventouses à turbine,
- les ventouses magnétiques.

Les systèmes à action bilatérale: Ces systèmes comportent au moins deux doigts et fonctionnent par serrage (Figure 3). Chaque doigt n'a qu'un ddl. Les contacts sont ponctuels, linéaires ou surfaciques.

Les systèmes à action multilatérale: Ce sont des dispositifs à deux doigts et plus, chacun ayant au moins deux ddl (Figure 4). Ils possèdent une bonne dextérité, mais leur saisie est souvent asymétrique, de par leur structure. Les contacts peuvent être ponctuels, linéaires ou surfaciques. En général ils ont une structure proche de celle de la main humaine.

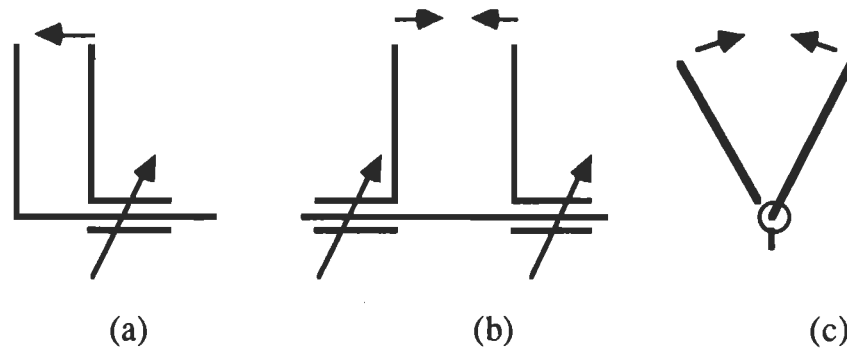


Figure 3. Systèmes à action bilatérale: (a) prise asymétrique par translation, (b) prise symétrique par translation, (c) prise symétrique par rotation (adapté de [10]).

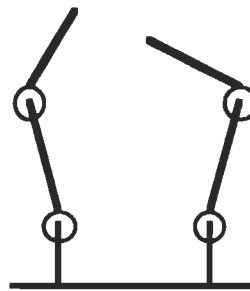


Figure 4. Systèmes à action multilatérale.

Il existe aussi d'autres types d'effecteurs plus spécialisés dont les effecteurs d'assemblage. Leur caractéristique essentielle est la compliance.

CHAPITRE 2

ANALYSE DU CONTRÔLE DE FORCE D'UNE PINCE À TROIS DOIGTS

Le problème de contrôle de force aux bouts des doigts d'une pince de robot est très important. Lorsque la commande se fait par retour de force, on est intéressé à connaître la valeur de la force de saisie et celle de manipulation. Il devient donc nécessaire de pouvoir décomposer la force agissant au bout des doigts en ces deux composantes (saisie et manipulation). Ce problème a été abordé par plusieurs auteurs [8], [9]. Dans le cas de notre travail, nous avons adopté l'approche récente de Yoshikawa et de Nagai [8], qui a une signification tant théorique que pratique. Dans leur approche, les auteurs introduisent trois notions que nous exposerons dans ce chapitre; il s'agit:

- de la notion de force interne;
- de la notion de force de saisie;
- de la notion de force de manipulation.

Nous présenterons, en guise de conclusion à ce chapitre l'algorithme de décomposition préconisé par les auteurs [8]. Dans l'analyse qui va suivre on tient compte des hypothèses suivantes [8]:

- on suppose l'existence d'un frottement au sens de Coulomb à tous les points de contact;
- les points de saisie des trois doigts ne sont pas alignés;
- les forces aux bouts des doigts peuvent agir dans n'importe quelle direction.

La notion de force interne: Considérons un objet "OBJ", lié au repère $R(0, x, y, z)$ et saisi aux trois points de contact C_1, C_2, C_3 (Figure 5.a).

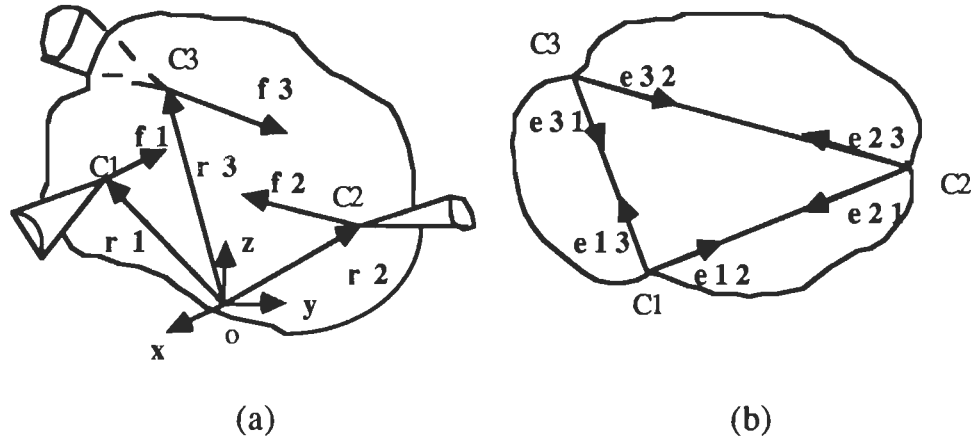


Figure 5. Schéma pour la notion de force interne (adapté de [8]).

Soient, $\mathbf{r}_i = [r_{ix}, r_{iy}, r_{iz}]^T$ élément de R^3 , les vecteurs de position respectifs des points de contact C_i ($i = 1, 2, 3$) dans le repère R .

Soient, $\mathbf{f}_i = [f_{ix}, f_{iy}, f_{iz}]^T$ élément de R^3 , les vecteurs force s'appliquant respectivement aux points de contact C_i .

Soit, $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1^T, \mathbf{f}_2^T, \mathbf{f}_3^T]^T$ élément de R^9 , le vecteur force totale.

Soient \mathbf{e}_{ij} les vecteurs unitaires dirigés de C_i vers C_j (Figure 5.b), avec $i, j = 1, 2, 3$, ($i \neq j$). Les vecteurs \mathbf{e}_{ij} caractérisent le plan de saisie Q .

$$(2,1) \quad \mathbf{e}_{ij} = (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) / \|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i\|$$

$$\mathbf{e}_{ij} = -\mathbf{e}_{ji}$$

$\|\mathbf{r}\|$ étant la norme euclidienne du vecteur \mathbf{r} .

Proposition 1: le vecteur force totale \mathbf{F} est une force interne ssi il existe un vecteur $\mathbf{Z} = [Z_{23}, Z_{31}, Z_{12}]^T$ élément de R^3 tel que:

$$(2,2) \quad \mathbf{F} = \mathbf{G} \mathbf{Z}$$

Avec:
$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{e}_{13} & \mathbf{e}_{12} \\ \mathbf{e}_{23} & 0 & \mathbf{e}_{21} \\ \mathbf{e}_{32} & \mathbf{e}_{31} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{élément de } \mathbb{R}^{9 \times 3}$$

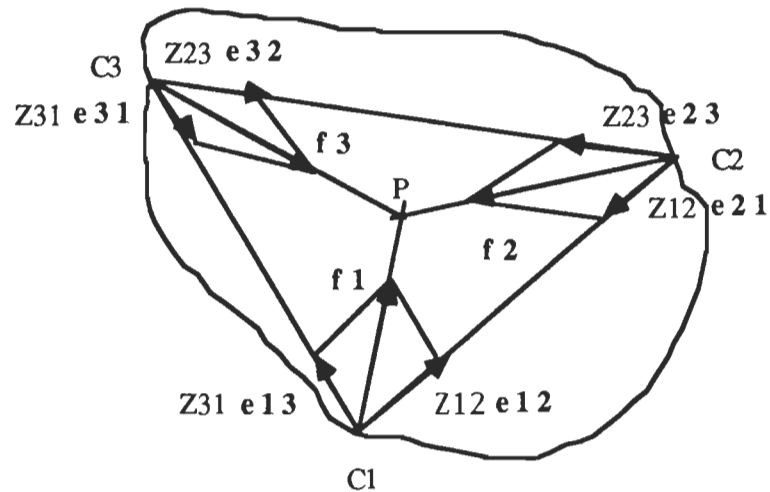


Figure 6. Décomposition de la force interne dans le plan de saisie Q. (adapté de[8]).

Cette proposition signifie que toutes les forces f_i devraient être décomposables suivant les vecteurs unitaires \mathbf{e}_{ij} définis dans le plan de saisie Q. Dans les conditions d'équilibre (force et moment), on note que les directions des trois forces se croisent en un point P dans le plan de saisie Q (Figure 6), et que le triangle des forces est fermé. Le point P sera désigné sous le nom de point focal de la force interne [8].

La notion de force de saisie

Définition 1: Le vecteur force totale \mathbf{F} est appelé force de saisie si les deux conditions suivantes sont satisfaites.

Condition 1: Le vecteur force totale \mathbf{F} est une force interne.

$$(2,3) \quad \mathbf{A} \mathbf{F} = 0$$

Avec:

$$(2,4) \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{E}_3 & \mathbf{E}_3 & \mathbf{E}_3 \\ \mathbf{R}_1 & \mathbf{R}_2 & \mathbf{R}_3 \end{bmatrix} \quad \text{élément de } \mathbb{R}^{6 \times 3}.$$

$$(2,5) \quad \mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} 0 & -r_{iz} & r_{iy} \\ r_{iz} & 0 & -r_{ix} \\ -r_{iy} & r_{ix} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{élément de } \mathbb{R}^{3 \times 3}.$$

$$(2,6) \quad \mathbf{E}_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \begin{array}{l} \text{élément de } \mathbb{R}^{3 \times 3}, \\ \text{(matrice unité).} \end{array}$$

Condition 2: L'angle de frottement statique n'est atteint à aucun des trois points de contact.

$$(2,7) \quad ((\mathbf{f}_i^T \cdot \mathbf{a}_i) / \|\mathbf{f}_i\|) > 1 / \sqrt{1 + \mu_i^2} \quad i = 1, 2, 3.$$

\mathbf{a}_i : vecteur unitaire normal à la surface de contact et orienté vers l'intérieur de la courbure.

μ_i : coefficient de frottement statique au point de contact C_i .

Démontrons la condition 1.

Écrivons les conditions d'équilibre statique classiques:

$$(2,8) \quad \sum f_i = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{équilibre des forces}).$$

$$(2,9) \quad \sum (r_i \times f_i) = 0 \quad i = 1, 2, 3 \quad (\text{équilibre des moments}).$$

(2,8) donne le système suivant:

$$f_{1x} + f_{2x} + f_{3x} = 0$$

$$f_{1y} + f_{2y} + f_{3y} = 0$$

$$f_{1z} + f_{2z} + f_{3z} = 0$$

Le système d'équations ci-dessus conduit à:

$$1.f_{1x} + 0.f_{1y} + 0.f_{1z} + 1.f_{2x} + 0.f_{2y} + 0.f_{2z} + 1.f_{3x} + 0.f_{3y} + 0.f_{3z} = 0$$

$$0.f_{1x} + 1.f_{1y} + 0.f_{1z} + 0.f_{2x} + 1.f_{2y} + 0.f_{2z} + 0.f_{3x} + 1.f_{3y} + 0.f_{3z} = 0$$

$$0.f_{1x} + 0.f_{1y} + 1.f_{1z} + 0.f_{2x} + 0.f_{2y} + 1.f_{2z} + 0.f_{3x} + 0.f_{3y} + 1.f_{3z} = 0$$

Posons $\mathbf{F} = [f_{1x}, f_{1y}, f_{1z}, f_{2x}, f_{2y}, f_{2z}, f_{3x}, f_{3y}, f_{3z}]^T$; alors on a:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [\mathbf{F}] = 0$$

ou encore:

$$(2,10) \quad [E_3 \quad E_3 \quad E_3] [F] = 0 \quad (\text{résultat partiel})$$

$$\text{Aussi (2,9) donne: } (r_1 \times f_1) + (r_2 \times f_2) + (r_3 \times f_3) = 0$$

Nous calculerons seulement le premier terme et nous déduirons les deux autres termes par analogie, en se basant sur les résultats de produits vectoriels suivants: $x \times x = y \times y = z \times z = 0$; $x \times y = z$;

$$y \times z = x; z \times x = y; y \times x = -z; z \times y = -x; x \times z = -y.$$

On a alors:

$$\begin{aligned} r_1 \times f_1 &= (r_{1x}x + r_{1y}y + r_{1z}z) \times (f_{1x}x + f_{1y}y + f_{1z}z) = \\ &= (r_{1x}.f_{1x}).(x \times x) + (r_{1x}.f_{1y}).(x \times y) + (r_{1x}.f_{1z}).(x \times z) + \\ &\quad + (r_{1y}.f_{1x}).(y \times x) + (r_{1y}.f_{1y}).(y \times y) + (r_{1y}.f_{1z}).(y \times z) + \\ &\quad + (r_{1z}.f_{1x}).(z \times x) + (r_{1z}.f_{1y}).(z \times y) + (r_{1z}.f_{1z}).(z \times z) \end{aligned}$$

Après rangement on a:

$$r_1 \times f_1 = (r_{1y}.f_{1z} - r_{1z}.f_{1y}) . x + (r_{1z}.f_{1x} - r_{1x}.f_{1z}) . y + (r_{1x}.f_{1y} - r_{1y}.f_{1x}) . z$$

D'où, par analogie:

$$r_2 \times f_2 = (r_{2y}.f_{2z} - r_{2z}.f_{2y}) . x + (r_{2z}.f_{2x} - r_{2x}.f_{2z}) . y + (r_{2x}.f_{2y} - r_{2y}.f_{2x}) . z$$

$$r_3 \times f_3 = (r_{3y}.f_{3z} - r_{3z}.f_{3y}) . x + (r_{3z}.f_{3x} - r_{3x}.f_{3z}) . y + (r_{3x}.f_{3y} - r_{3y}.f_{3x}) . z$$

Ainsi, l'expression $(r_1 \times f_1) + (r_2 \times f_2) + (r_3 \times f_3) = 0$ donne:

$$(r_{1y}.f_{1z} - r_{1z}.f_{1y}) + (r_{2y}.f_{2z} - r_{2z}.f_{2y}) + (r_{3y}.f_{3z} - r_{3z}.f_{3y}) = 0$$

$$(r_{1z}.f_{1x} - r_{1x}.f_{1z}) + (r_{2z}.f_{2x} - r_{2x}.f_{2z}) + (r_{3z}.f_{3x} - r_{3x}.f_{3z}) = 0$$

$$(r_{1x}.f_{1y} - r_{1y}.f_{1x}) + (r_{2x}.f_{2y} - r_{2y}.f_{2x}) + (r_{3x}.f_{3y} - r_{3y}.f_{3x}) = 0$$

Après rangement le système d'équation ci-contre s'écrit sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} 0.f_{1x} - r_{1z}.f_{1y} + r_{1y}.f_{1z} + 0.f_{2x} - r_{2z}.f_{2y} + r_{2y}.f_{2z} + 0.f_{3x} - r_{3z}.f_{3y} + r_{3y}.f_{3z} &= 0 \\ r_{1z}.f_{1x} + 0.f_{1y} - r_{1x}.f_{1z} + r_{2z}.f_{2x} + 0.f_{2y} - r_{2x}.f_{2z} + r_{3z}.f_{3x} + 0.f_{3y} - r_{3x}.f_{3z} &= 0 \\ -r_{1y}.f_{1x} + r_{1x}.f_{1y} + 0.f_{1z} - r_{2y}.f_{2x} + r_{2x}.f_{2y} + 0.f_{2z} - r_{3y}.f_{3x} + r_{3x}.f_{3y} + 0.f_{3z} &= 0 \end{aligned}$$

En resortant le vecteur force totale \mathbf{F} , on obtient le résultat suivant:

$$\begin{bmatrix} 0 & -r_{1z} & r_{1y} & 0 & -r_{2z} & r_{2y} & 0 & -r_{3z} & r_{3y} \\ r_{1z} & 0 & -r_{1x} & r_{2z} & 0 & -r_{2x} & r_{3z} & 0 & -r_{3x} \\ -r_{1y} & r_{1x} & 0 & -r_{2y} & r_{2x} & 0 & -r_{3y} & r_{3x} & 0 \end{bmatrix} [\mathbf{F}] = 0$$

On identifie facilement les matrices R_i ce qui nous permet d'écrire :

$$(2,11) \quad [R_1 \quad R_2 \quad R_3] [\mathbf{F}] = 0$$

en regroupant (2,10) et (2,11) on obtient:

$$\begin{bmatrix} E_3 & E_3 & E_3 \\ R_1 & R_2 & R_3 \end{bmatrix} [\mathbf{F}] = 0 \quad (\text{C.F.Q.D})$$

Démontrons la condition 2:

Soient \mathbf{f}_i le vecteur force au point de contact C_i , et \mathbf{a}_i le vecteur unitaire, entrant, normal à la surface de l'objet "OBJ" au point de

contact C_i (Figure 7). Soit Θ_i l'angle entre les deux vecteurs \mathbf{f}_i et \mathbf{a}_i ; évaluons le produit scalaire de ces deux vecteurs; on a:

$$\mathbf{f}_i^T \cdot \mathbf{a}_i = \|\mathbf{f}_i\| \cdot \|\mathbf{a}_i\| \cdot \cos(\Theta_i)$$

Comme \mathbf{a}_i est un vecteur unitaire, alors $\|\mathbf{a}_i\| = 1$; par conséquent on a:

$$\cos(\Theta_i) = (\mathbf{f}_i^T \cdot \mathbf{a}_i) / \|\mathbf{f}_i\|$$

Or nous avons vu au chapitre 1 que, d'après la loi de Coulomb, l'angle de frottement statique peut s'exprimer par la relation suivante:

$$\tan(\Theta_{si}) = \mu_i$$

Aussi, par les transformations trigonométriques, on peut écrire que:

$$\cos(\Theta_{si}) = 1 / \sqrt{1 + \tan^2(\Theta_{si})}$$

$$\text{D'où: } \cos(\Theta_{si}) = 1 / \sqrt{1 + \mu_i^2}$$

Or la condition de non glissement est satisfaite lorsque: $\Theta_i < \Theta_{si}$, ce qui implique que $\cos(\Theta_i) > \cos(\Theta_{si})$; en remplaçant les deux expressions par leurs valeurs, on obtient la relation suivante:

$$(\mathbf{f}_i^T \cdot \mathbf{a}_i) / \|\mathbf{f}_i\| > 1 / \sqrt{1 + \mu_i^2} \quad (\text{C.Q.F.D}).$$

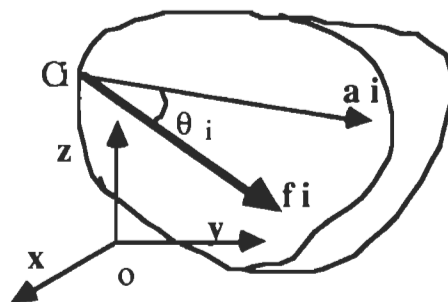


Figure 7. Configuration de vecteurs au point de saisie.

Autre définition de la notion de force de saisie: Dans cette nouvelle définition, les auteurs [8], adoptent une approche très généralisée qui intègre la forme de l'objet à manipuler, la position du point focal P et les sens des forces dans le plan de saisie Q.

Définition des paramètres de saisie α, β, γ : Dans leur développement, les auteurs[8] ont introduit trois paramètres qui caractérisent, de manière systématique, la force de saisie et de manipulation.

Le paramètre α : Il caractérise le sens des forces qui s'exercent entre deux points de contact C_i, C_{i+1} dans le plan de saisie Q. Autrement dit, il permet de savoir si ces forces ont un effet de compression ou de tension (Figure 8); les auteurs l'associe à la notion de mode de saisie. Il se définit comme suit:

$$(2,12) \quad \alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3] \quad \text{avec } \alpha_i = \text{signe}(Z_{(i+1) (i+2)})$$

Rappelons que les paramètres $Z_{(i+1) (i+2)}$, ($i=1, 2, 3$), caractérisent l'existence de la force interne.

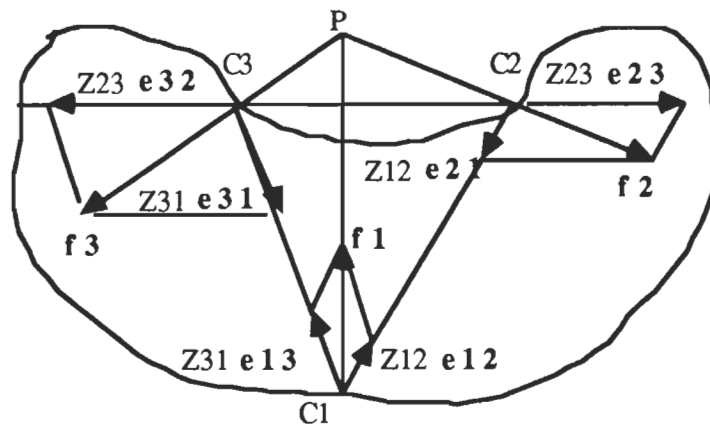


Figure 8. Illustration de la signification du paramètre α ; dans le cas de figure on a $\alpha = [-, +, +]$ (adapté de [8]).

Le paramètre β : Ce paramètre réalise un lien entre la position du point focal P et la forme de l'objet à manipuler. Considérons le vecteur e_{pi} , orienté à partir du point de contact C_i vers le point focal P (Figure 9); on a:

$$e_{pi} = (r_p - r_i) / \|r_p - r_i\| \quad \text{avec } i = 1, 2, 3.$$

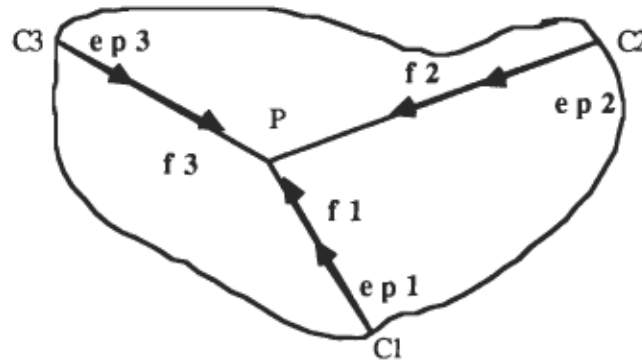


Figure 9. Illustration de la signification du paramètre β ; dans le cas de figure on a $\beta = [+, +, +]$.

En introduisant le paramètre β_i , on peut exprimer la force f_i sous la forme suivante:

$$(2,13) \quad f_i = \beta_i \cdot \|f_i\| \cdot e_{pi} \quad \text{avec} \quad \beta_i = \text{signe}(e_{pi}^T \cdot a_i).$$

Ou encore, $\beta_i = \text{signe}(\|e_{pi}^T\| \cdot \|a_i\| \cdot \cos(\theta_{pai})) = \text{signe}(\cos(\theta_{pai}))$, car les vecteurs e_{pi}^T et a_i sont des vecteurs unitaires; θ_{pai} est l'angle entre les vecteurs unitaires e_{pi} et a_i au point de contact C_i . Comme on le constate, e_{pi} caractérise la position du point focal P et a_i la courbure à la surface de l'objet à manipuler; d'où la signification du paramètre

β définit par:

$$(2,14) \quad \beta = [\beta_1, \beta_2, \beta_3]$$

Le paramètre γ : Dans leur analyse, les auteurs [8] ont partagé le plan de saisie Q en sept zones exclusives par l'intermédiaire des droites passant par les vecteurs e_{ij} . Ainsi le paramètre γ spécifie le code de la région où se situe le point focal P dans le plan de saisie Q (Figure 10).

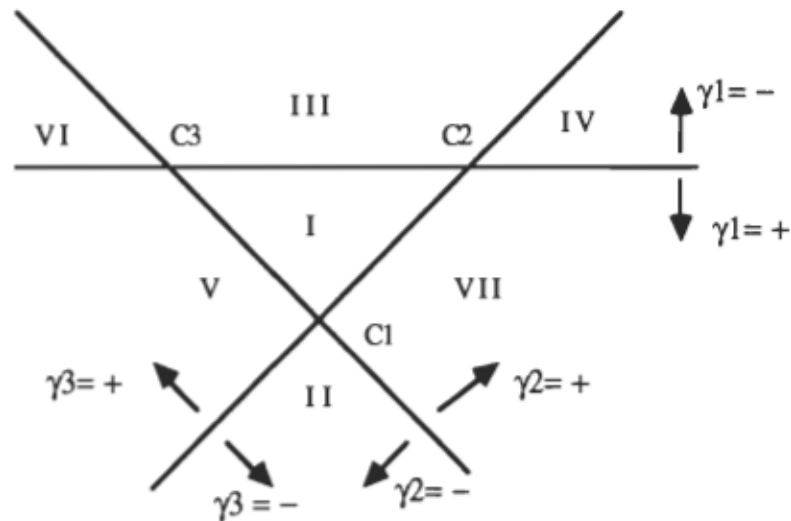


Figure 10. Signification du paramètre γ (adapté de [8]).

Suite à cette étude, les auteurs [8], ont élaboré un tableau qui lie les trois paramètres. La simplification de ce tableau a donné lieu aux deux relations fondamentales suivantes [8].

$$(2,15) \quad \beta = \gamma \quad \text{ou} \quad -\gamma$$

$$(2,16) \quad \alpha = (\gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3) \cdot \beta$$

Conditions d'existence d'une force de saisie: Reprenons l'expression de la formule (2,13); on a:

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_i &= \text{signe}(\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i) \cdot \|\mathbf{f}_{il}\| \cdot \mathbf{e}_{pi}, \text{ ou, en prenant la transposée,} \\ (2,17) \quad \mathbf{f}_i^T &= \text{signe}(\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i) \cdot \|\mathbf{f}_{il}\| \cdot \mathbf{e}_{pi}^T. \end{aligned}$$

Réécrivons la condition de non glissement en portant (2,17) dans (2,7); on a:

$$((\text{signe}(\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i) \cdot \|\mathbf{f}_{il}\| \cdot \mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i) / \|\mathbf{f}_{il}\|) > 1 / \sqrt{(1 + \mu_i^2)},$$

ou encore en simplifiant par $\|\mathbf{f}_{il}\|$:

$$(2,18) \quad (\text{signe}(\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i) \cdot (\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i)) > 1 / \sqrt{(1 + \mu_i^2)}$$

En remarquant que: $(\text{signe}(\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i) \cdot (\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i)) = |\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i|$, (2,18) devient:

$$|\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i| > 1 / \sqrt{(1 + \mu_i^2)}$$

En d'autres termes:

$$|\cos(\theta_{pai})| > 1 / \sqrt{(1 + \mu_i^2)}$$

θ_{pai} étant l'angle entre les vecteurs \mathbf{e}_{pi} et \mathbf{a}_i au point de contact C_i .

Cette analyse débouche sur la proposition 2.

Proposition 2: Pour un point focal P donné, d'une force interne F, l'existence d'une force de saisie n'est possible que si les deux conditions suivantes sont vérifiées.

Condition 1: Condition de non glissement.

$$(2,19) \quad |\mathbf{e}_{pi}^T \cdot \mathbf{a}_i| > 1 / \sqrt{(1 + \mu_i^2)}$$

Condition 2: Relation entre la position du point focal et la forme de l'objet à manipuler.

$$\beta = \gamma \quad \text{ou} \quad -\gamma$$

Afin d'illustrer la condition 2, nous allons supposer un élément à symétrie circulaire saisi aux trois points C_1, C_2, C_3 (Figure 11).

Dans un premier temps on remarque donc que le point focal P est situé dans la région I où $\gamma = [+, +, +]$. Ensuite on remarque, dans notre cas de figure, que les angles θ_{pai} sont tels que: $0 \leq \theta_{pai} < 90^\circ$. Donc on a:

$\beta = [\text{signe}(\cos(\theta_{pa1})), \text{signe}(\cos(\theta_{pa2})), \text{signe}(\cos(\theta_{pa3}))] = [+, +, +]$. On conclue donc que la condition 2 est vérifiée étant donné que $\beta = \gamma$. Quant à la condition 1, elle dépend du coefficient de frottement μ_i .

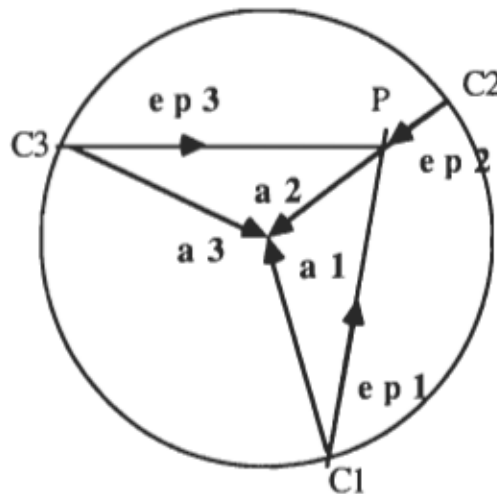


Figure 11. Exemple d'illustration de la condition 2

Évaluation de la force de saisie [8]: Soit la force totale de saisie

$\mathbf{F}_s = [f_{s1}^T, f_{s2}^T, f_{s3}^T]^T$ élément de \mathbb{R}^9 ; elle se calcule par:

$$(2,20) \quad \mathbf{F}_s = \mathbf{B}_s \mathbf{h}_s$$

Avec:

$$(2,21) \quad \mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} 0 & \hat{\mathbf{e}}_{13} & \hat{\mathbf{e}}_{12} \\ \hat{\mathbf{e}}_{23} & 0 & \hat{\mathbf{e}}_{21} \\ \hat{\mathbf{e}}_{32} & \hat{\mathbf{e}}_{31} & 0 \end{bmatrix} \quad \text{élément de } \mathbb{R}^{9 \times 3}.$$

$$\hat{\mathbf{e}}_{i(i+1)} = \alpha_{i+2} \cdot \mathbf{e}_{i(i+1)} \quad i = 1, 2, 3.$$

$$\hat{\mathbf{e}}_{i(i+2)} = -\mathbf{e}_{(i+2)i} \quad i = 1, 2, 3.$$

On rappelle que:

$$\alpha_i = \text{signe}(Z_{(i+1)(i+2)}) \quad i = 1, 2, 3.$$

Le vecteur inconnu $\mathbf{h}_s = [h_{s1}, h_{s2}, h_{s3}]^T$ élément de \mathbb{R}^3 est tel que:

$$\mathbf{h}_s = \mathbf{B}_s^{-1} \mathbf{F}_s \quad \text{avec } h_{si} \geq 0$$

La notion de force de manipulation: La force de manipulation assure le mouvement de l'objet entre les doigts suivant une certaine trajectoire.

Conditions d'existence d'une force de manipulation: La configuration des vecteurs unitaires est montrée sur la figure 12.

On rappelle que:

$$\mathbf{e}_{ij} = (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) / \|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i\|, \text{ vecteurs unitaires dirigés de } C_i \text{ vers } C_j$$

Les vecteurs unitaires liés à la force de manipulation sont donnés par:

$$(2,22) \quad \hat{e}_{i0} = (\hat{e}_{i(i+1)} \times \hat{e}_{i(i+2)}) / \|\hat{e}_{i(i+1)} \times \hat{e}_{i(i+2)}\|$$

$$(2,23) \quad \hat{e}_{i(i+1)} = \hat{e}_{i(i+2)} \times \hat{e}_{i0}$$

$$(2,24) \quad \hat{e}_{i(i+2)} = \hat{e}_{i0} \times \hat{e}_{i(i+1)}$$

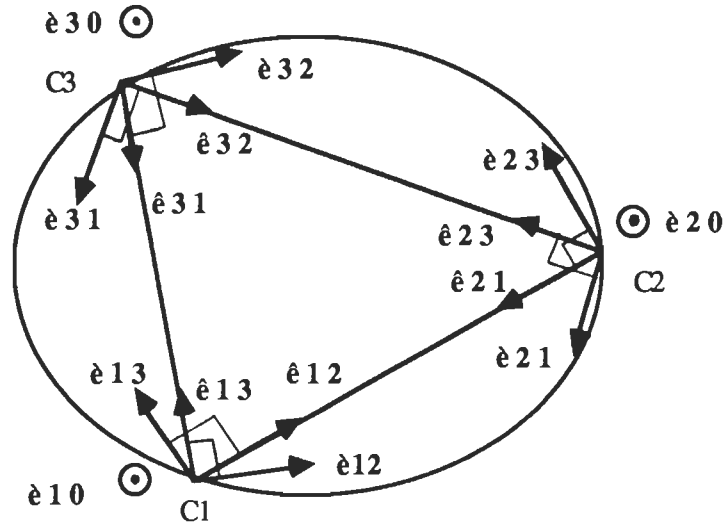


Figure 12. Vecteurs dans le plan de saisie Q (adapté de [8]).

Définition 2: Soit $F = [f_1^T, f_2^T, f_3^T]^T$ élément de R^9 , le vecteur force totale qui s'exerce aux bouts des doigts. Soit T le vecteur force résultant désiré aux bouts des doigts ($T = 0$ dans le cas d'étude de la force de saisie). Alors le vecteur force totale a une signification de force de manipulation pour un mode spécifique α si les trois conditions suivantes sont vérifiées:

Condition 1: La somme des forces et des moments n'est pas nulle.

$$T = A F$$

Condition 2: La force de manipulation ne devrait s'opposer en

aucun cas à la force de saisie ; d'où la relation suivante:

$$(2,25) \quad \mathbf{f}_i^T \cdot \hat{\mathbf{e}}_{ij} \geq 0 \quad i = 1, 2, 3, \quad j=(i+1),(i+2)$$

En effet à chaque point de saisie C_i , on retrouve facilement à partir des formules (2,20) et (2,21) que la force de saisie \mathbf{f}_{si} est une combinaison linéaire des deux vecteurs unitaires $\hat{\mathbf{e}}_{i(i+1)}$ et $\hat{\mathbf{e}}_{i(i+2)}$. Et donc, la projection de la force de manipulation à chaque point C_i sur chacun des deux vecteurs unitaires $\hat{\mathbf{e}}_{i(i+1)}$ et $\hat{\mathbf{e}}_{i(i+2)}$ ne devrait être jamais négative; ce qui se résume par la relation (2,25) sous forme de produit scalaire. Rappelons qu'en réalité le produit scalaire de deux vecteurs représente la projection d'un des deux vecteurs sur l'autre.

Condition 3: La force de manipulation ne devrait, en aucun cas, produire des composantes de compression ni de tension suivant les directions C_1C_2 , C_1C_3 , C_2C_3 , afin que soit conservé le caractère exclusif des deux notions de force de saisie et de manipulation. Autrement dit les composantes de la force de manipulation doivent être orthogonales aux composantes de la force de saisie d'où la condition 3:

$$(\mathbf{f}_i^T \cdot \hat{\mathbf{e}}_{i(i+1)}) \cdot (\mathbf{f}_i^T \cdot \hat{\mathbf{e}}_{(i+1)i}) = 0$$

La définition des vecteurs unitaires par les relations (2,22), (2,23), (2,24) rejoint aussi la condition 3.

Évaluation de la force de manipulation: [8]: Soit la force de manipulation $\mathbf{F}_m = [\mathbf{f}_{m1}^T, \mathbf{f}_{m2}^T, \mathbf{f}_{m3}^T]^T$ élément de \mathbb{R}^9 ; Alors:

$$(2,26) \quad \mathbf{F}_m = \mathbf{B}_m \mathbf{h}_m$$

Avec:

$$(2,27) \quad \mathbf{B}_m = \begin{bmatrix} 0 & (1-k_2).\hat{e}_{13} & k_3.\hat{e}_{12} & \hat{e}_{10} & 0 & 0 \\ k_1.\hat{e}_{23} & 0 & (1-k_3).\hat{e}_{21} & 0 & \hat{e}_{20} & 0 \\ (1-k_1).\hat{e}_{32} & k_2.\hat{e}_{31} & 0 & 0 & 0 & \hat{e}_{30} \end{bmatrix}$$

\mathbf{B}_m est élément de $\mathbb{R}^{9 \times 6}$.

On remarque que la matrice de manipulation \mathbf{B}_m dépend du paramètre α et de $\mathbf{k} = [k_1, k_2, k_3]$ élément de \mathbb{R}^3 ($k_i = 0$ ou 1). La signification pratique du paramètre \mathbf{k} est de spécifier lequel des vecteurs de chaque couple apparaîtra dans la matrice de manipulation \mathbf{B}_m . Il s'agit des couples de vecteurs suivants: $(\hat{e}_{23}, \hat{e}_{32})$, $(\hat{e}_{13}, \hat{e}_{31})$, $(\hat{e}_{12}, \hat{e}_{21})$. Il y a donc huit combinaisons possibles pour le choix du paramètre \mathbf{k} .

Le vecteur inconnu $\mathbf{h}_m = [h_{m1}, h_{m2}, h_{m3}, h_{m4}, h_{m5}, h_{m6}]^T$ élément de \mathbb{R}^6 est tel que pour un vecteur force résultant \mathbf{T} donné on a:

$$\mathbf{T} = \mathbf{A} \mathbf{F}_m = \mathbf{A} \mathbf{B}_m \mathbf{h}_m$$

$$\text{d'où} \quad \mathbf{h}_m = (\mathbf{A}\mathbf{B}_m)^{-1} \mathbf{T} \quad \text{avec } h_{mi} \geq 0$$

Algorithme de décomposition de la force aux bouts des doigts: Dans la commande d'un organe de préhension on a besoin de connaître l'une ou l'autre composante (saisie ou manipulation) de la force aux bouts des doigts afin d'apporter la correction appropriée. L'algorithme de décomposition préconisé par les auteurs [8] est le suivant:

Soit $\mathbf{F} = [\mathbf{f}_1^T, \mathbf{f}_2^T, \mathbf{f}_3^T]^T$ le vecteur force totale mesuré aux bouts des

doigts; supposons connues les grandeurs suivantes, avec $i = 1, 2, 3$:

\mathbf{r}_i , vecteur position des points de contact C_i dans le repère $R(0, x, y, z)$.

\mathbf{a}_i , vecteur unitaire "entrant" à la surface de l'objet aux points de contact C_i .

μ_i , coefficient de frottement statique aux points de saisie C_i .

Alors on peut décomposer le vecteur force totale comme suit:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_m = \mathbf{B} \mathbf{H}$$

avec $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_s, \mathbf{B}_m]$ élément de $\mathbb{R}^{9 \times 9}$

et $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_s^T, \mathbf{h}_m^T]^T$ élément de \mathbb{R}^9

Etape 1

Trouver tous les modes de saisie réalisables, α , à partir des paramètres connus $\mathbf{r}_i, \mathbf{a}_i, \mu_i$.

Etape 2

Choisir un mode de saisie α déterminé à l'étape 1.

Calculer $\mathbf{H} = \mathbf{B}^{-1} \mathbf{F}$ pour les huit combinaisons du paramètre k .

Etape 3

Sélectionner le paramètre k pour lequel $H_i \geq 0$.

Considérer le vecteur \mathbf{H} correspondant à ce paramètre k .

Calculer la force de saisie: $\mathbf{F}_s = \mathbf{B}_s \mathbf{h}_s$.

Calculer la force de manipulation: $\mathbf{F}_m = \mathbf{B}_m \mathbf{h}_m$.

Si la condition de non glissement est satisfaite pour la force de saisie \mathbf{F}_s alors la décomposition est valable: $\mathbf{F} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_m$

Etape 4

Répéter le processus à partir de l'étape 2 pour tous les autres modes de saisie déterminés à l'étape 1.

Pour toute décomposition valable, on devrait toujours avoir $\|F_m\| \leq \|F\|$. En guise de conclusion nous allons remarquer que l'inconvénient de l'algorithme de décomposition est le temps d'exécution. En effet, le nombre de calcul à réaliser est assez considérable mais ce problème peut être atténué en utilisant des interfaces matériels, dédiés à certains groupes de calculs (DSP, RISC ...etc).

CHAPITRE 3

ANALYSE ET PROPOSITION D'UNE STRUCTURE MÉCANIQUE

Dans ce chapitre, nous exposerons l'analyse détaillée de la structure mécanique que nous proposons. Elle devrait permettre la réalisation d'opérations de saisie symétrique sur des objets à symétrie circulaire avec optimisation et contrôle de la force de saisie.

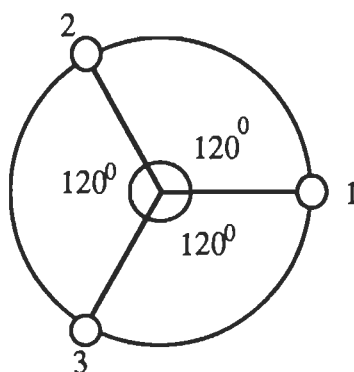


Figure 13. Répartition symétrique des trois doigts.

Analyse de la structure mécanique: Dans notre analyse, nous exploiterons les résultats du chapitre 2 pour valider la structure mécanique, en regard aux principales exigences. La première approximation de la solution que nous allons analyser serait un système à action bilatérale comportant trois doigts disposés symétriquement autour d'un cercle (Figure 13). Cette disposition contribue à stabiliser mécaniquement la saisie d'objets à symétrie circulaire en trois points de contact.

Optimisation de la force de saisie: Nous chercherons essentiellement à annuler la force de manipulation dans toute les directions afin que toute la force agissant aux bouts des doigts, F , soit essentiellement la force de saisie étant donné que:

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_m$$

Configuration optimale de saisie: Considérons les trois cas d'application de force au niveau d'un doigt, pour un système à action bilatérale (Figure 14).

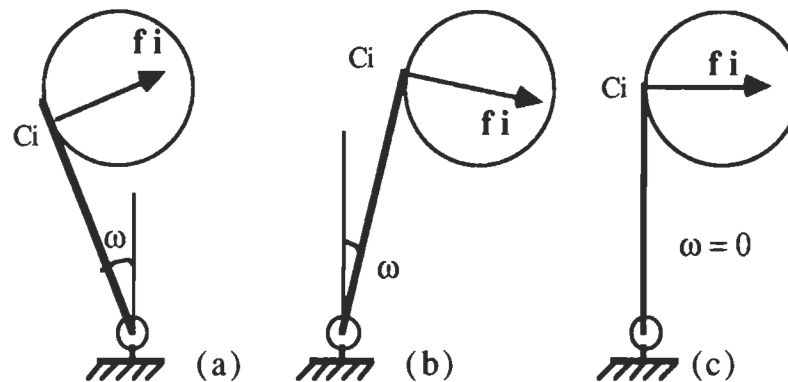


Figure 14. Influence de l'angle de saisie.

Pour les cas (a) et (b), on remarque que le point focal P de la force interne, s'il existe, est forcément situé en dehors du plan de saisie passant par les trois points de contact. Ainsi, les trois forces ne sont pas coplanaires; et dans ce cas, il n'existe pas de mode de saisie conformément aux deux relations fondamentales (2,15) et (2,16). Par contre dans le cas (c), le point focal P sera toujours situé dans la région I du plan de saisie.

Examinons pour le cas (c) la condition de non glissement au point C_i en utilisant la formule (2,7); on a:

$$(\mathbf{f}_i \cdot \mathbf{a}_i) / \|\mathbf{f}_i\| > 1 / \sqrt{1 + \mu_i^2}$$

Ou encore: $\cos(\theta_{\text{pai}}) > 1 / \sqrt{1 + \mu_i^2}$

Cette condition est optimale lorsque la valeur de $\cos(\theta_{\text{pai}})$ est maximale c'est à dire $\theta_{\text{pai}} = 0^\circ$, ce qui est toujours vrai pour le cas(c) de la figure 14. Ainsi allons nous adopter un mouvement d'approche et de saisie parallèle au niveau des trois doigts.

Annulation de la force de manipulation dans le plan de saisie Q:

Adoptons la disposition symétrique des doigts (Figure 13), et l'approche parallèle du cas (c) (Figure 14). Utilisons l'algorithme de décomposition [8] présenté au chapitre 2. Considérons la configuration de vecteurs dans le plan de saisie Q (Figure 15).

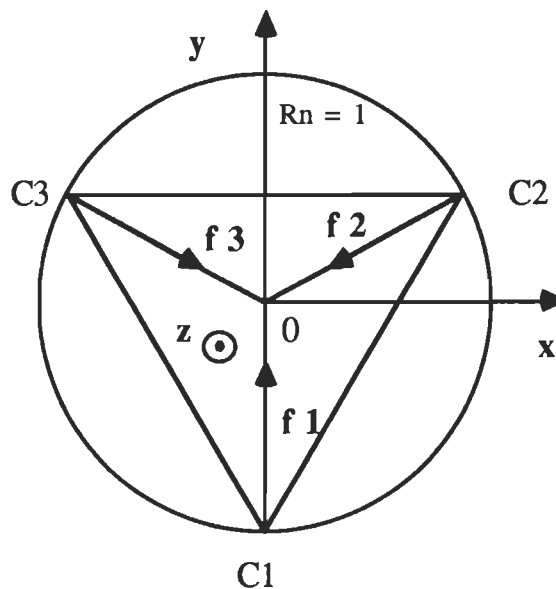


Figure 15. Vecteurs force dans le plan de saisie Q.

Etape 1: Détermination des modes de saisie α .

On remarque que les trois directions respectives des trois forces appliquées convergent au centre de l'objet; par conséquent, le point focal P se situe dans la région I et on a: $\gamma = [+, +, +]$. De plus le fait que les vecteurs e_{pi} et a_i soient colinéaires implique que $\theta_{pai} = 0^\circ$, et par conséquent, $\beta = [+, +, +]$. Ainsi on vérifie bien que $\beta = \gamma$, et on calcule: $\alpha = (\gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3) \cdot \beta = [+, +, +]$. Ainsi, un seul mode de saisie est possible.

Etape 2: Calcul du vecteur H par $H = B^{-1}F$ pour les huit combinaisons du paramètre k . Pour ce faire, normalisons certaines grandeurs dont f_i et R_n :

$\|f_i\| = 1$ (vecteur force normalisé) $i = 1, 2, 3$.

$R_n = 1$ (rayon normalisé du cercle contenant les points de saisie C_i)

$F = [0, 1, 0, -\sqrt{3}/2, -1/2, 0, \sqrt{3}/2, -1/2, 0]^T$ (vecteur force totale normalisé), d'après le repère R lié à l'objet (Figure 15).

Déterminons la matrice $B = [B_s, B_m]$ afin de calculer le vecteur H .

Vecteurs de position des points C_i dans le repère R :

$r_1 = [0, -1, 0]^T$, $r_2 = [\sqrt{3}/2, 1/2, 0]^T$, $r_3 = [-\sqrt{3}/2, 1/2, 0]^T$

Vecteurs unitaires e_{ij} dans le plan de saisie Q par (2,1):

$$e_{12} = (r_2 - r_1) / \|r_2 - r_1\| = [1/2, \sqrt{3}/2, 0]^T$$

$$e_{13} = (r_3 - r_1) / \|r_3 - r_1\| = [-1/2, \sqrt{3}/2, 0]^T$$

$$e_{23} = (r_3 - r_2) / \|r_3 - r_2\| = [-1, 0, 0]^T$$

$$e_{21} = -e_{12} = [-1/2, -\sqrt{3}/2, 0]^T$$

$$e_{31} = -e_{13} = [1/2, -\sqrt{3}/2, 0]^T$$

$$e_{32} = -e_{23} = [1, 0, 0]^T$$

Vecteurs unitaires $\hat{e}_{i(i+1)}$ et $\hat{e}_{i(i+2)}$ par (2,21):

$$\hat{e}_{12} = \alpha_3 \cdot e_{12} = [1/2, \sqrt{3}/2, 0]^T$$

$$\hat{e}_{23} = \alpha_1 \cdot e_{23} = [-1, 0, 0]^T$$

$$\hat{e}_{23} = \alpha_1 \cdot e_{23} = [-1, 0, 0]^T$$

$$\hat{e}_{31} = \alpha_2 \cdot e_{31} = [1/2, -\sqrt{3}/2, 0]^T$$

$$\hat{e}_{21} = -\hat{e}_{12} = [-1/2, -\sqrt{3}/2, 0]^T$$

$$\hat{e}_{32} = -\hat{e}_{23} = [1, 0, 0]^T$$

$$\hat{e}_{13} = -\hat{e}_{31} = [-1/2, \sqrt{3}/2, 0]^T$$

Vecteurs unitaires \hat{e}_{i0} , $\hat{e}_{i(i+1)}$ et $\hat{e}_{i(i+2)}$ par (2,22) à (2,24):

$$\hat{e}_{10} = (\hat{e}_{12} \times \hat{e}_{13}) / \|\hat{e}_{12} \times \hat{e}_{13}\| = [0, 0, 1]^T$$

$$\hat{e}_{20} = (\hat{e}_{23} \times \hat{e}_{21}) / \|\hat{e}_{23} \times \hat{e}_{21}\| = [0, 0, 1]^T$$

$$\hat{e}_{30} = (\hat{e}_{31} \times \hat{e}_{32}) / \|\hat{e}_{31} \times \hat{e}_{32}\| = [0, 0, 1]^T$$

$$\hat{e}_{12} = \hat{e}_{13} \times \hat{e}_{10} = [-\sqrt{3}/2, 1/2, 0]^T$$

$$\hat{e}_{23} = \hat{e}_{21} \times \hat{e}_{20} = [-\sqrt{3}/2, 1/2, 0]^T$$

$$\hat{e}_{31} = \hat{e}_{32} \times \hat{e}_{30} = [0, -1, 0]^T$$

$$\hat{e}_{21} = \hat{e}_{20} \times \hat{e}_{23} = [0, -1, 0]^T$$

$$\hat{e}_{32} = \hat{e}_{30} \times \hat{e}_{31} = [-\sqrt{3}/2, 1/2, 0]^T$$

$$\hat{e}_{13} = \hat{e}_{10} \times \hat{e}_{12} = [-\sqrt{3}/2, 1/2, 0]^T$$

Déterminons les matrices B_s et B_m en posant: $a = 1/2$ et $b = \sqrt{3}/2$:

$$B_s = \begin{bmatrix} 0 & -a & a \\ 0 & b & b \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -a \\ 0 & 0 & -b \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & a & 0 \\ 0 & -b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & -(1-k_2).b & k_3.b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-k_2).a & k_3.a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k_1.b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ k_1.a & 0 & -(1-k_3) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ (1-k_1).b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-k_1).a & -k_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Les résultats de cette étape sont disponibles dans le tableau 1

Etape 3: Calcul de la force de saisi et de celle de manipulation en utilisant les expressions (2,20) et (2,26). Les résultats sont aussi disponibles dans le tableau 1.

Tableau 1

Résultats de simulation pour les valeurs des vecteurs H , F_s et F_m					
H	F_s	F_m	H	F_s	F_m
$k = [0, 0, 0]$			$k = [0, 0, 1]$		
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,5774	1,0000	0,0000	0,5774	1,0000	0,0000
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,0000	-0,8660	0,0000	0,0000	-0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,8660	0,0000	0,0000	0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tableau 1 (suite)

H	F _s	F _m	H	F _s	F _m
k = [0, 1, 0]			k = [0, 1, 1]		
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,5774	1,0000	0,0000	0,5774	1,0000	0,0000
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,0000	-0,8660	0,0000	0,0000	-0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,8660	0,0000	0,0000	0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
k = [1, 0, 0]			k = [1, 0, 1]		
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,5774	1,0000	0,0000	0,5774	1,0000	0,0000
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,0000	-0,8660	0,0000	0,0000	-0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,8660	0,0000	0,0000	0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
k = [1, 1, 0]			k = [1, 1, 1]		
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,5774	1,0000	0,0000	0,5774	1,0000	0,0000
0,5774	0,0000	0,0000	0,5774	0,0000	0,0000
0,0000	-0,8660	0,0000	0,0000	-0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0,0000	0,8660	0,0000	0,0000	0,8660	0,0000
0,0000	-0,5000	0,0000	0,0000	-0,5000	0,0000
0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Le calcul des matrices a été effectué à l'aide du logiciel MATLAB, et le tableau 1 a été élaboré à partir des résultats bruts; le programme est fourni à l'annexe A. On remarque que les composantes des vecteurs \mathbf{H} , \mathbf{F}_s et \mathbf{F}_m , sont identiques pour les huit combinaisons du paramètre k (tableau 1), et que toutes les composantes du vecteur \mathbf{H} sont positives ou nulles; la décomposition est donc possible dans tous les cas. La force de manipulation est toujours nulle et celle de saisie est intégralement égale à la force aux bouts des doigts, soit:

$$\mathbf{F}_s = [0, 1, 0, -\sqrt{3}/2, -1/2, 0, \sqrt{3}/2, -1/2, 0]^T.$$

Ce résultat confère une efficacité maximale à cette première approximation de la structure mécanique. Il est à noter que ces résultats sont purement théoriques et qu'en pratique la force de manipulation ne sera pas nulle mais négligeable. L'existence pratique de cette force quoique négligeable sera due aux jeux mécaniques et aux imperfections de montage. Ces facteurs provoqueraient de faibles excentriques de telle sorte que la structure mécanique ne sera jamais parfaitement symétrique.

Optimisation du temps d'opération: Le problème de l'optimisation du temps d'opération se pose surtout pendant les opérations de vissage et de dévissage. En effet une telle opération comporte les séquences suivantes:

- saisie de l'objet par la pince,
- rotation du poignet du robot d'un angle $+\theta$ ou $-\theta$,
- relachement de l'objet par la pince,
- rotation du poignet du robot d'un angle $-\theta$ ou $+\theta$, ainsi de suite.

Ainsi remarque t-on que l'optimisation du temps d'opération réside dans la capacité de la pince à réaliser des mouvements de saisie et de relachement rapide. Par conséquent nous préconisons une pince à trois doigts à deux actions dont:

- un premier mouvement de prépositionnement qui ouvrirait les trois doigts, symétriquement, à presque la dimension de l'objet à saisir. Ce mouvement qui peut être relativement lent sera effectué une seule fois pour un même objet;

- ensuite, un deuxième mouvement de pincement ou de relachement rapide étant donné la petitesse de l'espace entre les doigts et l'objet. La petitesse de cet espace, rappelons le, est la conséquence directe du mouvement de prépositionnement.

Proposition de la structure mécanique optimale: Le système que nous proposons est constitué essentiellement par trois unités de saisie, d'un axe supportant deux vis sans fin, le tout monté sur une base circulaire (Figure 20). La base circulaire comporte deux plateaux (supérieur et inférieur). Les deux plateaux intègre une cavité interne dans laquelle se loge un disque codeur à 30 dents. La base supporte aussi l'axe à vis sans fin ainsi que les moteurs de prépositionnement et de pincement (Figure 21). On désigne par unité de saisie, l'ensemble constitué par les éléments suivants:

- le doigt;
- les deux engrenages supportant le doigt sur deux axes: cette liaison garantit le déplacement parallèle du doigt lorsque les engrenages sont entraînés par l'intermédiaire des deux vis sans fin;

- et enfin le support des engrenages qui est fixé sur le plateau supérieur de la base.

Deux unités de saisie sont parfaitement identiques tandis que le troisième diffère seulement par la forme du trou supérieur de son doigt (Figure 27 et 28). Pendant le prépositionnement, les trois unités de saisie sont commandées symétriquement et les trois doigts bougent de façon parallèle. Alors que pendant le mouvement de pincement, seul un doigt bouge, via un système de câble gainé. Les détails du système de pincement sont montrés à la figure 21. Le retour de force se fait par l'intermédiaire de capteurs de force réalisés à partir de deux jauges de contrainte, montées sur un corps d'épreuve en flexion. Les figures 22 à 33 montrent les principales pièces mécaniques de la pince. Les dessins ont été réalisés à partir du logiciel AUTOCAD. Toutes les pièces seront usinées en aluminium, sauf indication, afin de minimiser le poids de la pince.

Étude de la déformation au niveau des doigts lors du pincement: Cette étude est nécessaire afin de s'assurer que les déformations subies par les doigts lors du pincement se situent dans le domaine élastique. Tous les calculs qui seront faits dans cette section supposent la considération des hypothèses suivantes:

- la force agissant au bout des doigts est toujours ramenée au point O représentant le centre de la longueur utile de saisie sur les doigts;

- les déformations calculées sont des valeurs nominales qui ne tiennent pas compte du facteur de concentration de contrainte au voisinage des discontinuités géométriques des doigts.

Considérons la représentation planaire d'un doigt (Figure 16) et exprimons l'équation de la droite (Δ).

$$y = a \cdot x + b$$

La pente, a , est telle que: $a = - \Delta y / \Delta x = -1,375'' / 2,750'' = - 0,5$.

Aussi (Δ) passe par le point $(3,5''; 0,875'')$, dans le plan $(0, x, y)$; ce qui donne: $b = 2,625''$. D'où:

$$(\Delta) \quad y = - 0,5 \cdot x + 2,625''$$

Par conséquent la hauteur $h(x)$ s'exprime par les relations suivantes:

$$h(x) = h_0 = 1,75'', \quad 0 \leq x \leq 3,5''$$

$$h(x) = (h_0/2) + y = -0,5 \cdot x + 3,5'' \quad 3,5'' \leq x \leq 6,25''$$

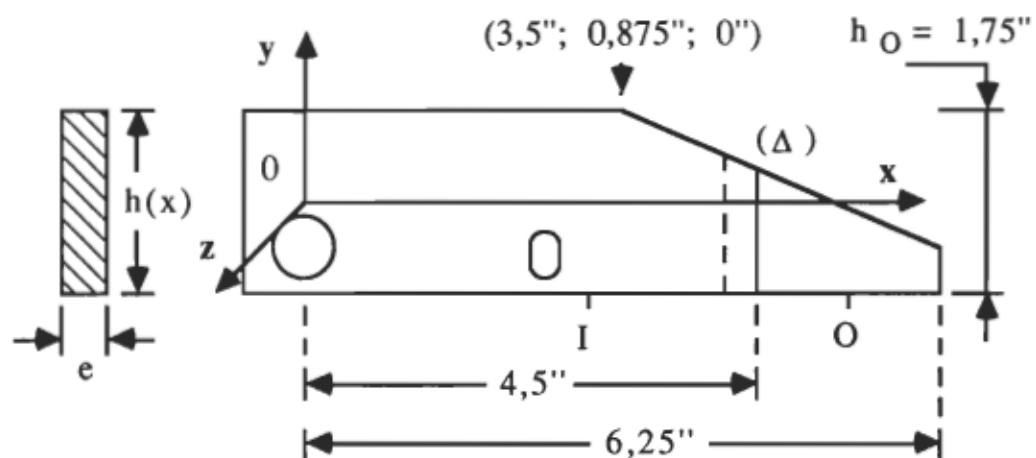


Figure 16. Schéma de l'étude de déformation sur le doigt.

L'équation du centroïde s'exprime par:

$$y = 0 \quad 0 \leq x \leq 3,5''$$

$$y = [-h_O + h(x)]/2 = -0,25 \cdot x + 0,875'' \quad 3,5'' \leq x \leq 6,25''$$

Chaque doigt est libre en rotation autour du point A (Figure 17). Pour le doigt mobile, F_I représente la force d'action du câble de traction; tandis que pour les doigts semi-mobiles, elle caractérise la réaction de l'axe de guidage, fixé à l'engrenage supérieur. Au niveau des trois doigts, F_O représente la réaction de l'objet pincé. Les points d'application de ces deux forces sont tels que:

$$X_I = 3,032'' \quad (\text{doigt mobile}).$$

$$X_I = 2,75'' \quad (\text{doigts semi-mobiles}).$$

$$X_O = 4,5'' + [(6,25'' - 4,5'')/2] = 5,375''$$

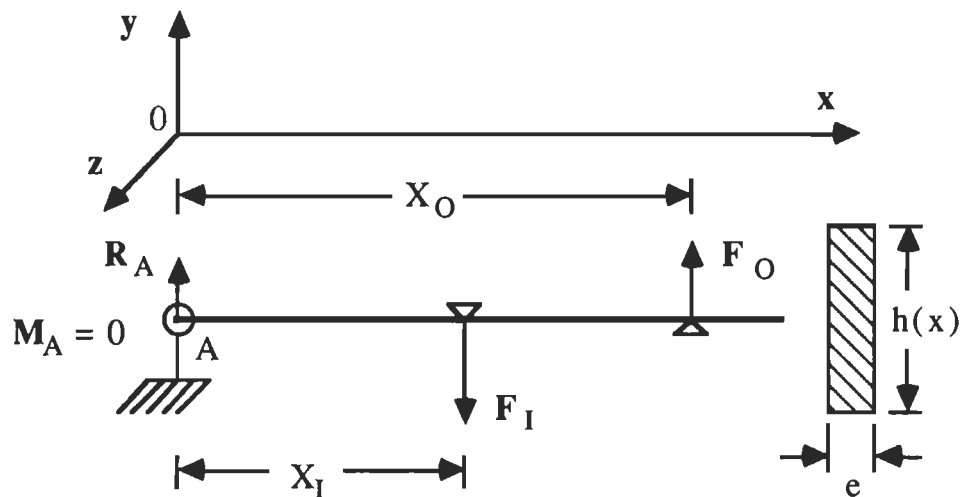


Figure 17. Sollicitation en flexion du doigt mobile.

Les équations d'équilibre donnent:

$$\sum F = 0 \quad \text{----->} \quad R_A = F_I - F_O$$

$$\sum M = 0 \quad \text{----->} \quad M_A = 0 \quad \text{----->} \quad F_I = F_O \cdot (X_O/X_I)$$

Tous les résultats, concernant l'effort tranchant et le moment fléchissant dans une section d'abscisse x , ainsi les déformations provoquées, sont résumés sur la figure 18. L'évolution de la contrainte, le long du doigt est montrée sur la figure 19. L'étude a été faite, en considérant la force maximale de saisie de 100 N, sur les fibres extrêmes car ce sont les points de contrainte maximale en flexion.

Ainsi remarque t-on, que la valeur de la contrainte maximale atteinte est de 3,1814 Mpa, très inférieure à la plus faible valeur de contrainte admissible des alliages d'aluminium, soit 69 Mpa. Rappelons que les courbes de contrainte tracées sont nominales et que, en pratique, il faudra éventuellement corriger ces valeurs par le coefficient de concentration de contrainte, au niveau des diverses discontinuités géométriques sur les doigts.

Détails techniques pour le choix du câble de traction et du moteur de pincement:

Choix du câble de traction : D'après la figure 17 on peut écrire que:

$F_I = F_O \cdot (X_O/X_I)$. Donc, pour $F_O = 100$ N on obtient $F_I = 177,28$ N. Par conséquent, en considérant un coefficient de sécurité de trois, la force de rupture est de 532 N. Ainsi, le câble choisi est du type 7 x 7, de diamètre 1/32", avec une force de rupture de 52,2 kg, soit 522 N.

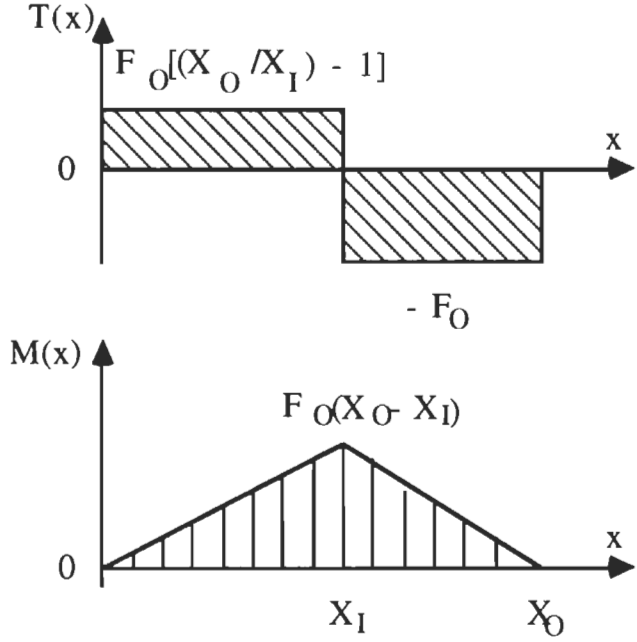
Section d'abscisse x	$0 \leq x \leq X_I$	$X_I < x \leq X_O$
Effort tranchant $T(x)$	$T(x) = R_A$ ou encore $T(x) = F_O[(X_O/X_I) - 1]$	$T(x) = -F_O$
Moment fléchissant $M(x)$	$M(x) = F_O[(X_O/X_I) - 1].x$	$M(x) = -x.F_O$
Courbes $T(x) = f(x)$ $M(x) = g(x)$	 <p>The figure shows two graphs. The top graph is the shear force $T(x)$ versus position x. It is a step function: for $0 \leq x \leq X_I$, $T(x) = F_O[(X_O/X_I) - 1]$ (positive, shaded with diagonal lines); for $X_I < x \leq X_O$, $T(x) = -F_O$ (negative, shaded with diagonal lines). The bottom graph is the bending moment $M(x)$ versus position x. It is a piecewise linear function: for $0 \leq x \leq X_I$, $M(x)$ increases linearly from 0 at $x=0$ to $F_O(X_O - X_I)$ at $x=X_I$ (shaded with vertical lines); for $X_I < x \leq X_O$, $M(x)$ decreases linearly from $F_O(X_O - X_I)$ at $x=X_I$ to 0 at $x=X_O$ (unshaded).</p>	
Déformation sur fibre supérieure. $\epsilon_{(x)} = \frac{M(x)}{E I} \frac{h(x)}{2}$ $I = (e.[h(x)]^3)/12$	$\frac{6 \cdot F_O[(X_O/X_I) - 1].x}{E \cdot e \cdot [h(x)]^2}$	$\frac{6 \cdot F_O \cdot x}{E \cdot e \cdot [h(x)]^2}$

Figure 18. Récapitulatif sur l'étude des doigts sollicités en flexion.

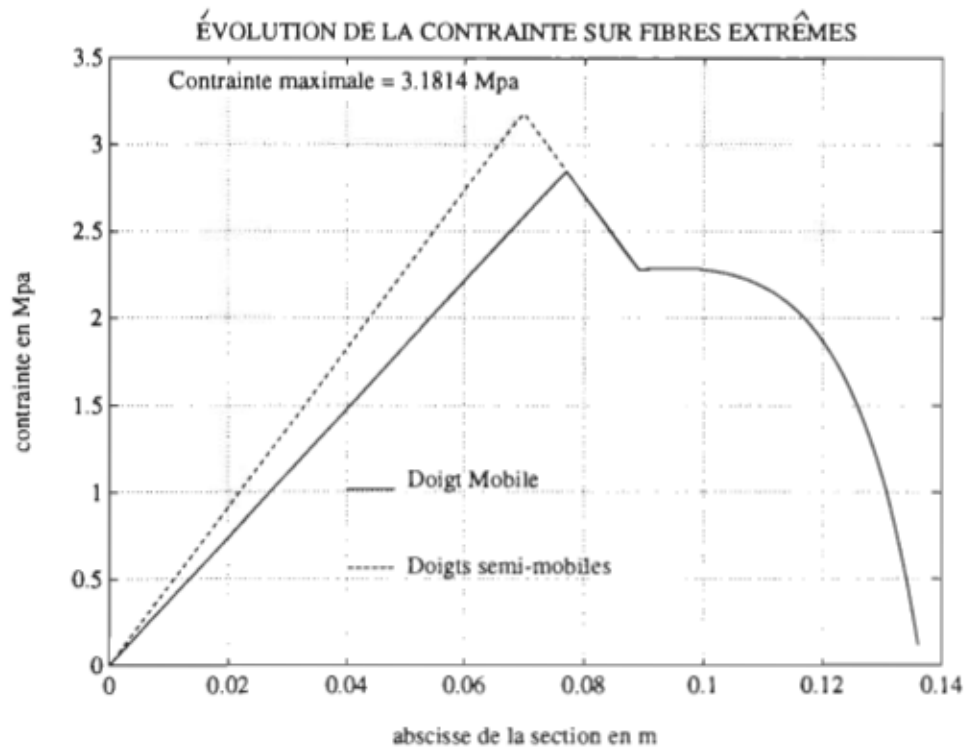


Figure 19. Contrainte nominale sur les fibres extrêmes.

Choix du moteur de pincement : Ce moteur devrait être en mesure de développer le couple nécessaire pour fournir la force limite $F_I = 177,28 \text{ N}$. Nous avons considéré que pratiquement l'application de la force de saisie s'effectue à rotor bloqué. Par conséquent le choix du moteur doit tenir compte du courant permis à rotor bloqué, ainsi que de la limitation imposée par l'interface de puissance qui est de 3 A théoriquement. De plus, pour des raisons de contrôle, le courant maximal dans le moteur à rotor bloqué devrait correspondre à une tension équivalent à un rapport cyclique inférieur ou égal à 90%.

À rotor bloqué, on a:

$$T_g = T_L + T_f = K_t \cdot i_a \cdot N \cdot r\%$$

Où, N et $r\%$ sont respectivement le rapport et le rendement du réducteur.

La force engendrée se calcule par:

$$F = F_I + F_f = (K_t \cdot i_a \cdot N \cdot r\%) / r_p$$

Où F_f représente la composante de force perdue par friction, et r_p , le rayon de la poulie de traction (Figure 21).

Nous avons opté pour un rapport de transformation relativement élevé, pour un courant maximal relativement faible afin d'éviter l'échauffement du moteur et donc la variation de ses paramètres de commande. Il est à noter que le faible rendement conséquent n'est pas gênant, car compensé par la valeur de N . Ainsi nous avons abouti au moteur-réducteur suivant:

PITTMAN, modèle GM8712, 187:1, $r\%=59\%$.

La force maximale de 100 N sera obtenue pour un courant $i_a = 1$ A environ.

Figure 20. Vue d'ensemble simplifiée: base et unité de saisi.

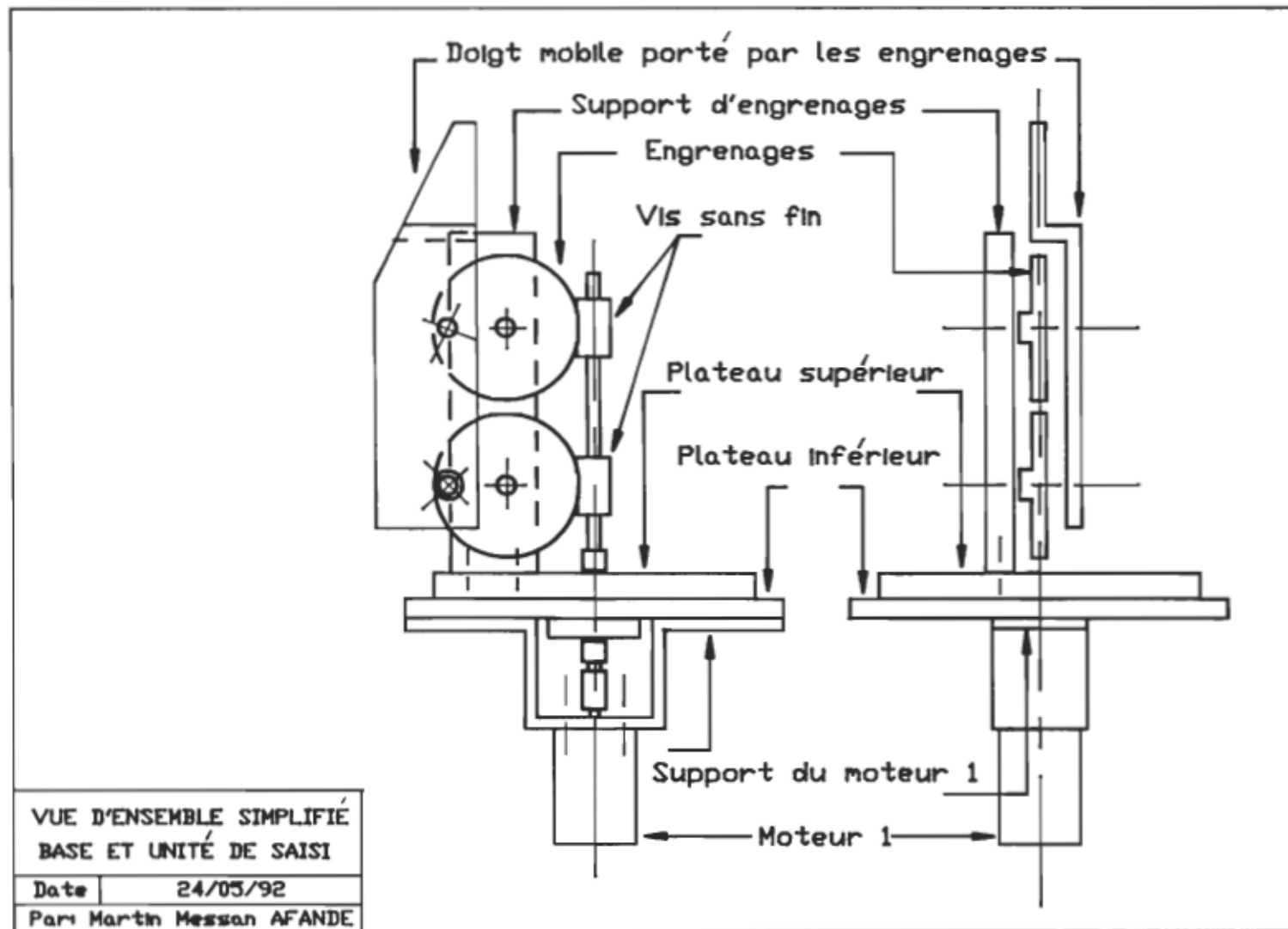


Figure 21. Détails sur le système de pincement.

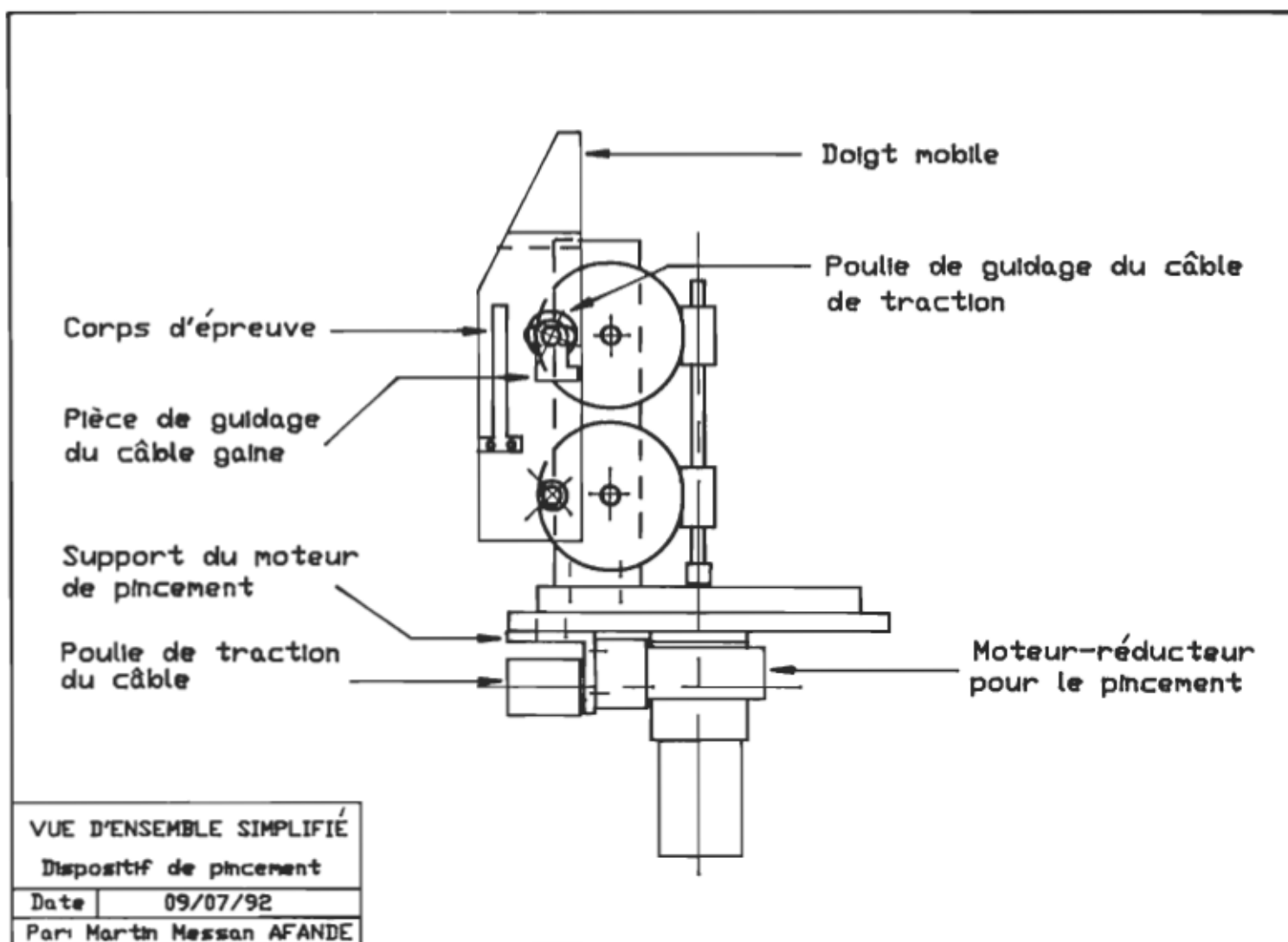


Figure 22. Plateau supérieur.

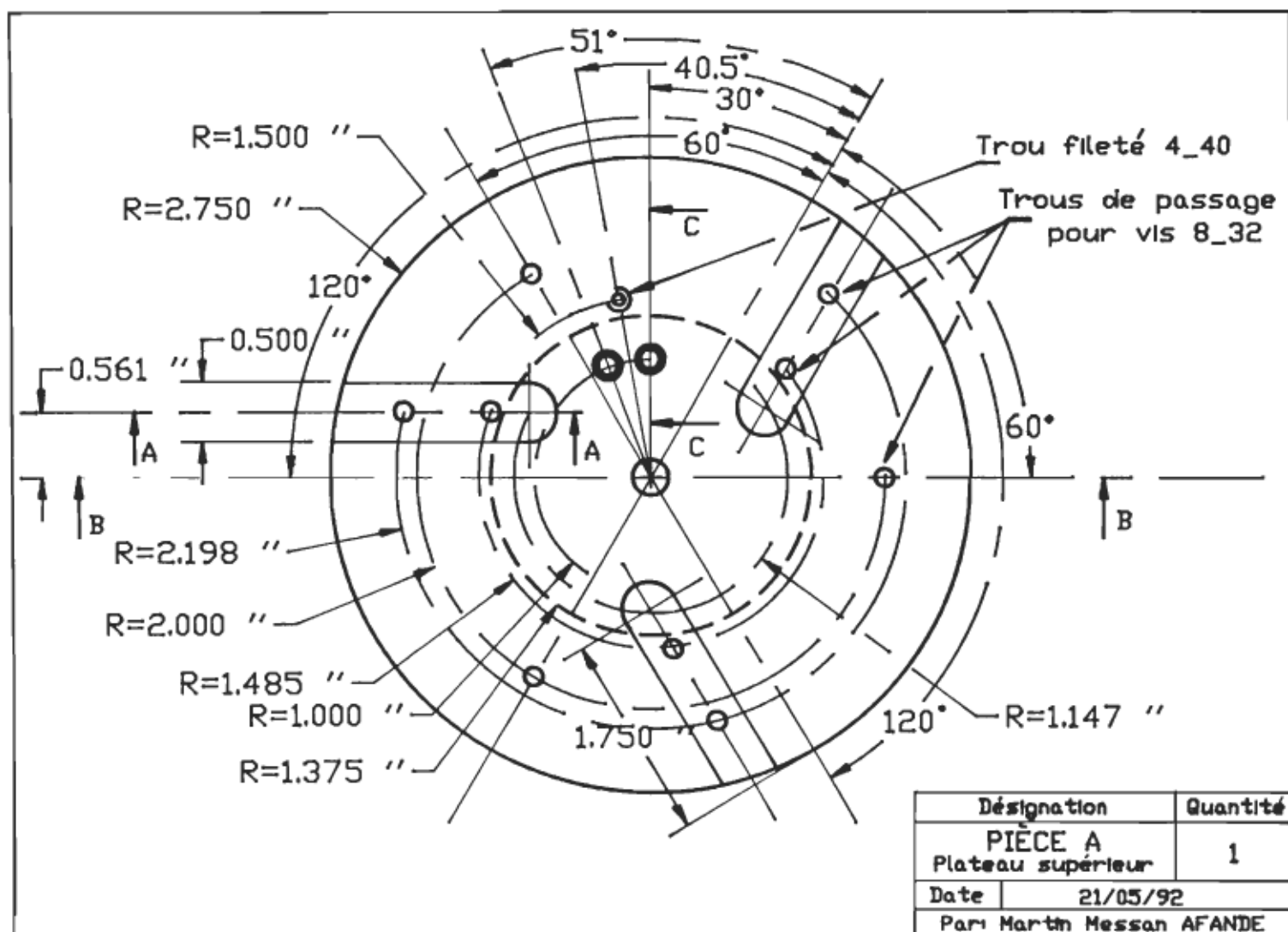


Figure 23. Vues de coupes du plateau supérieur.

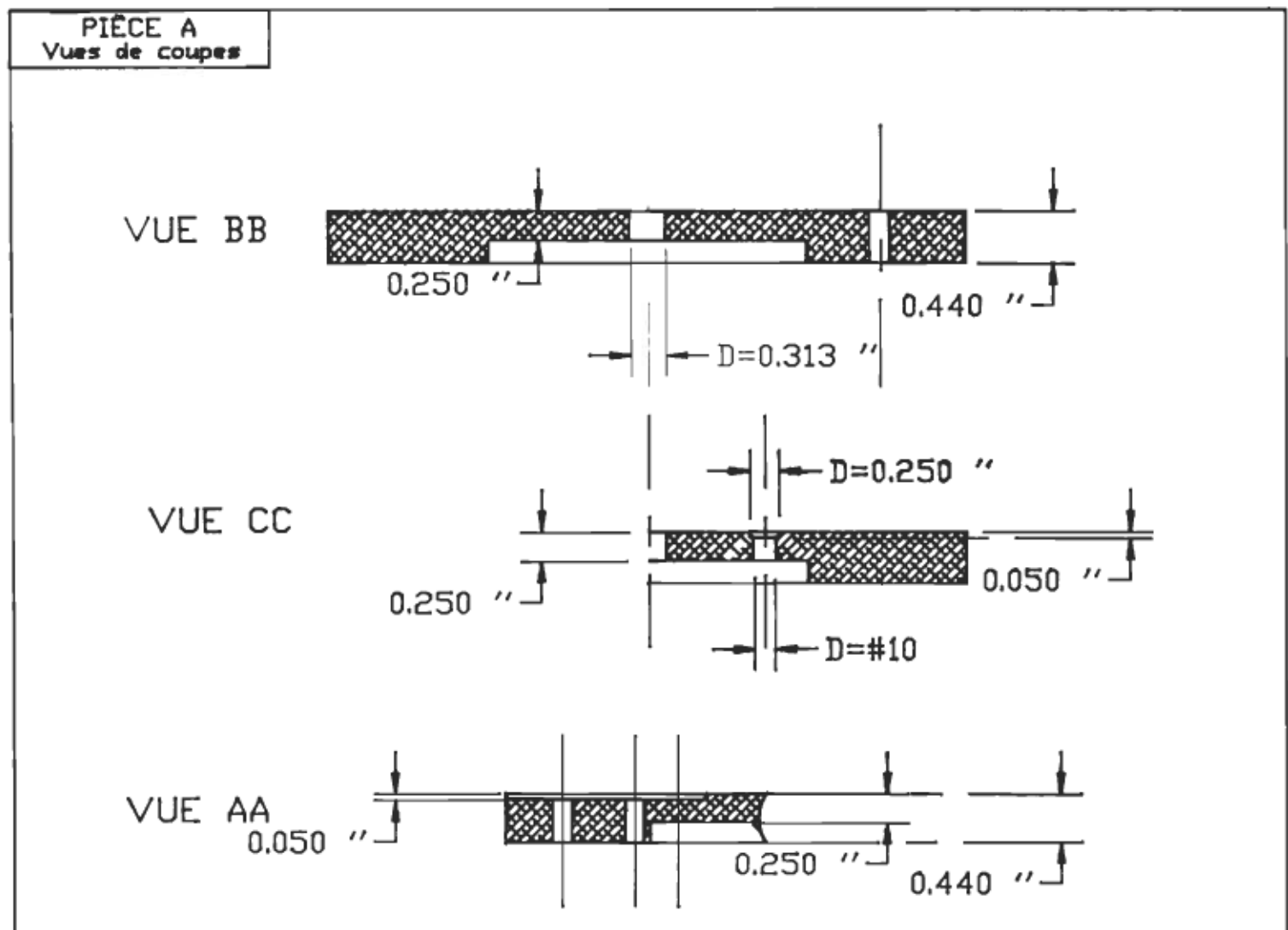


Figure 24. Plateau inférieur.

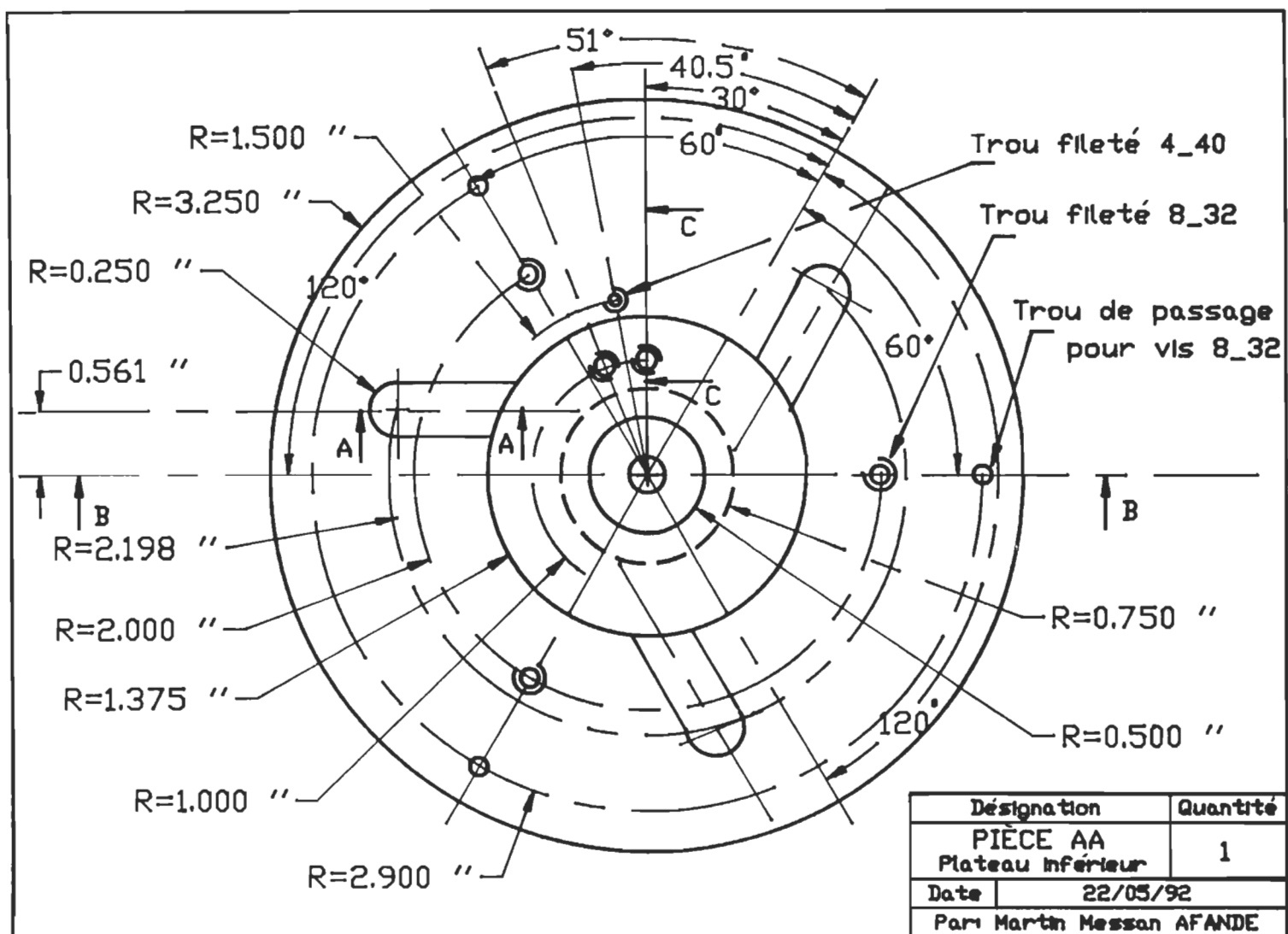


Figure 25. Vues de coupes du plateau inférieur.

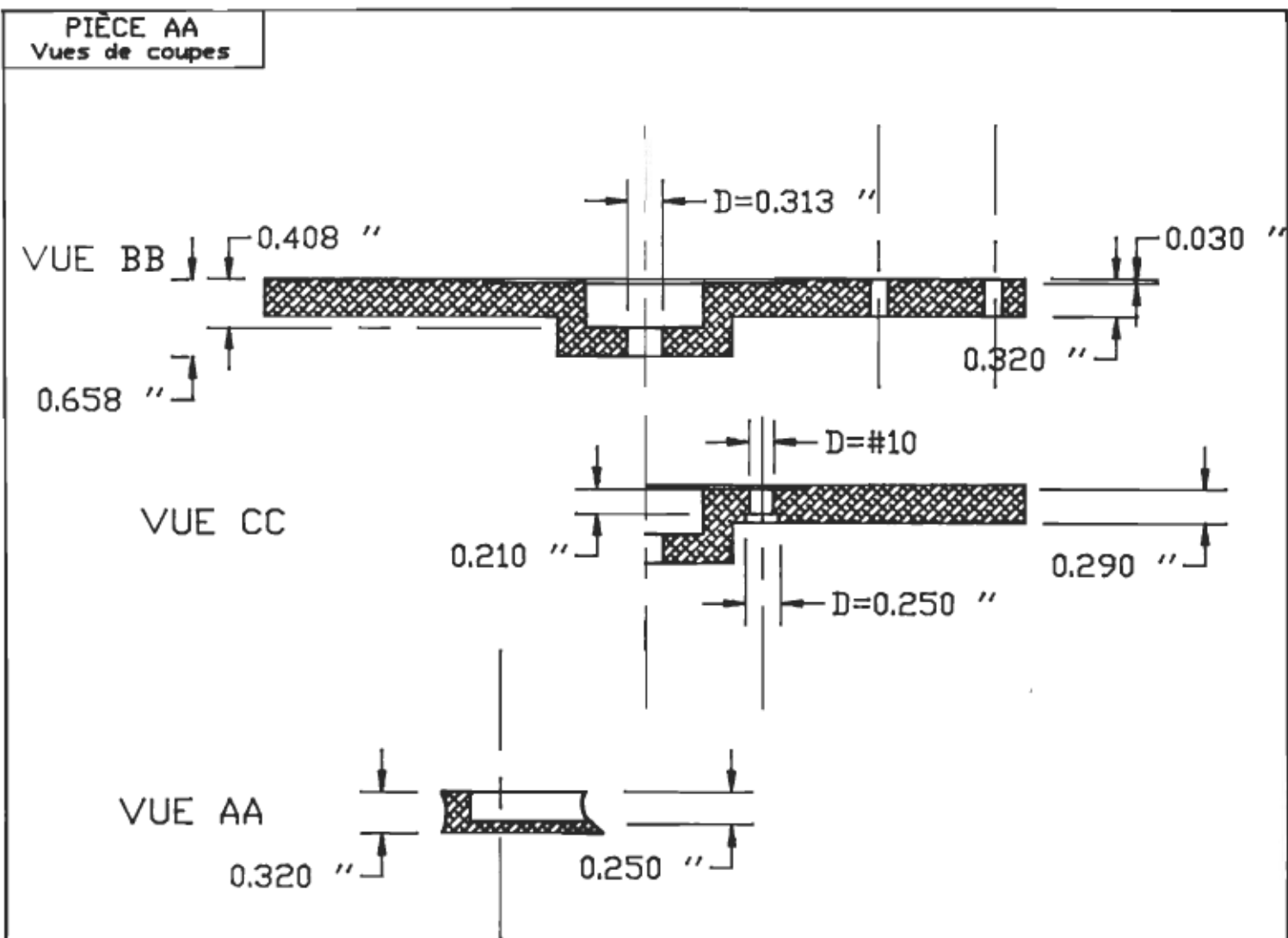


Figure 26. Support d'engrenages.

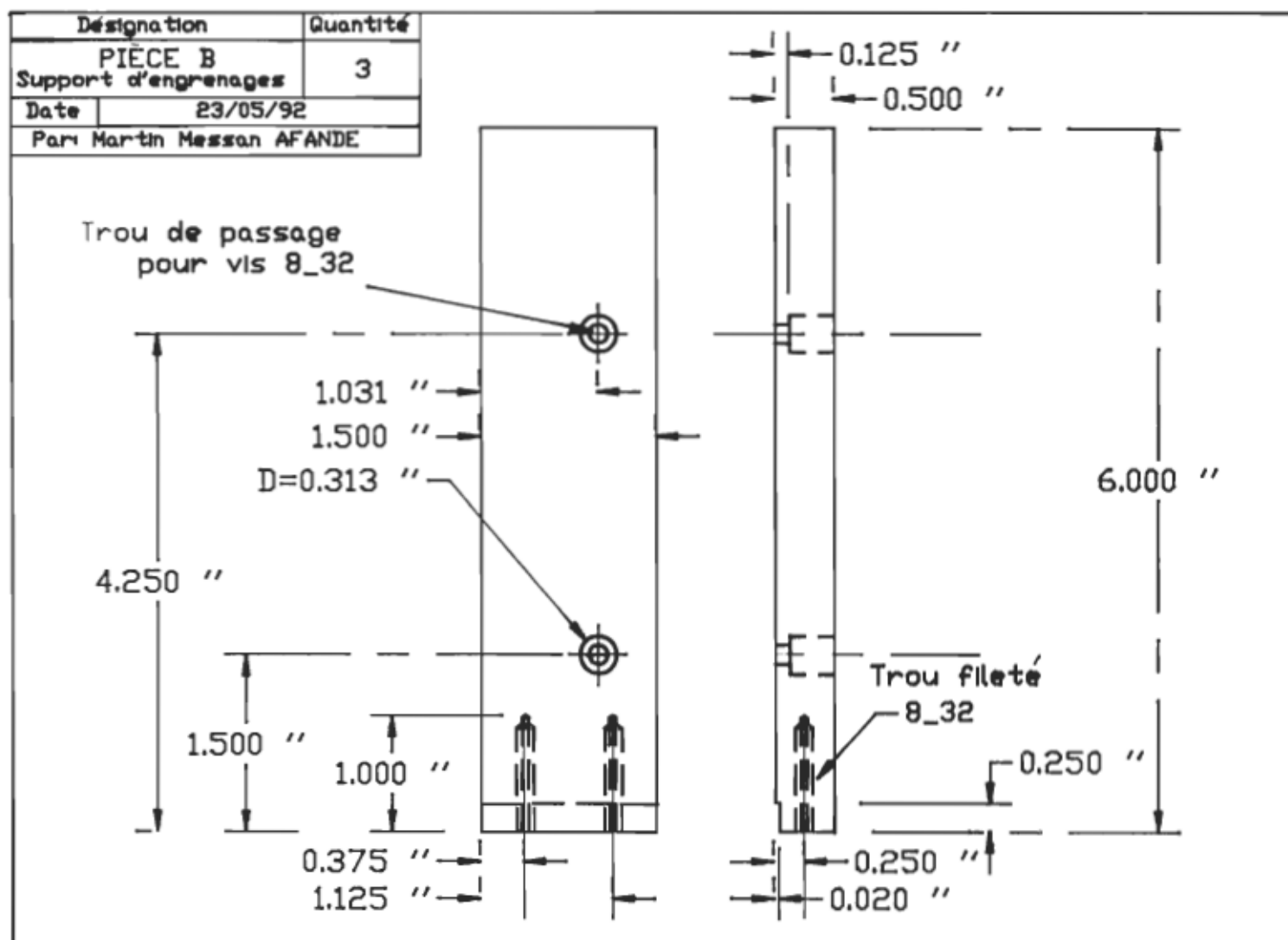


Figure 27. Doigt mobile.

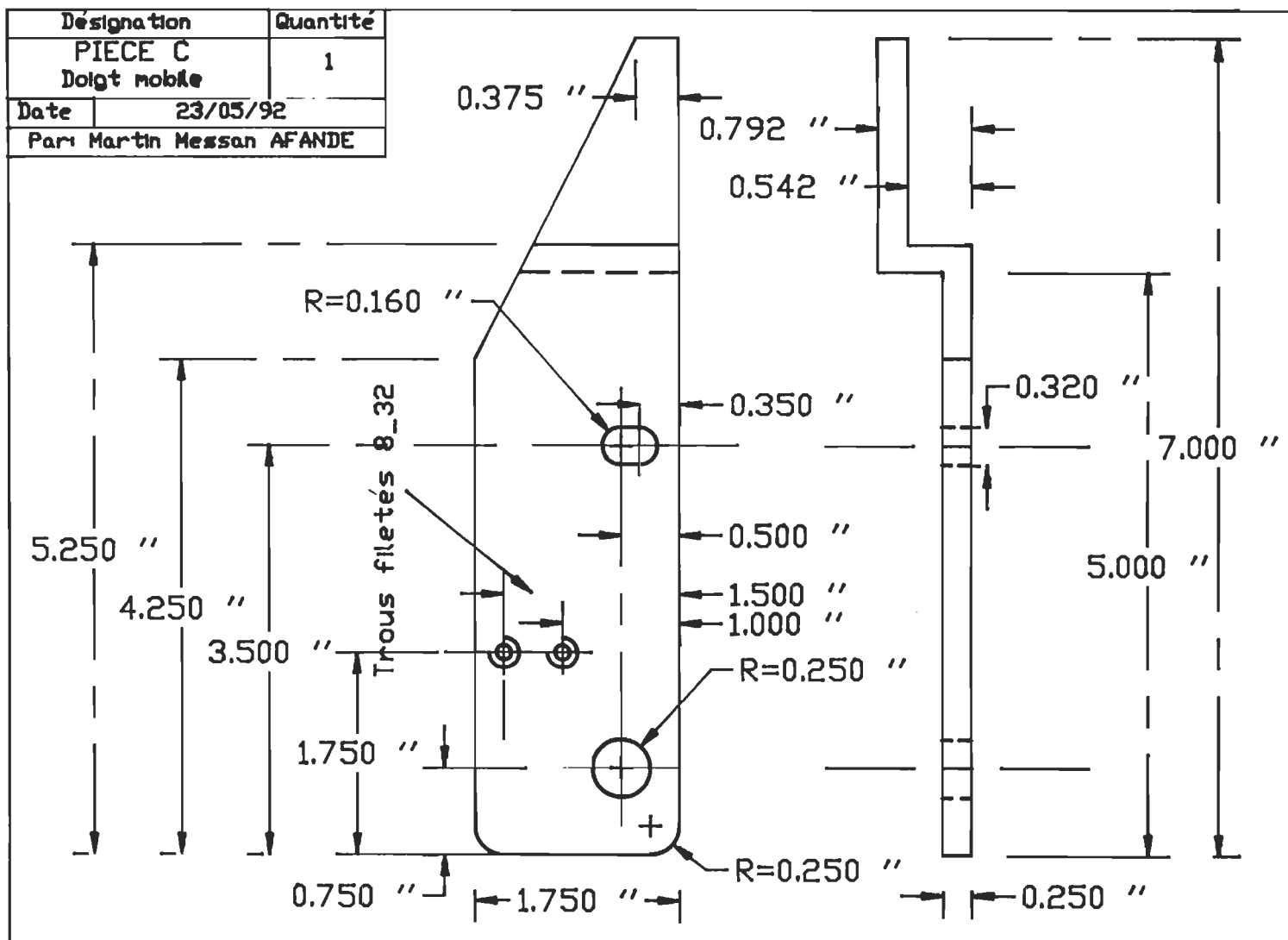


Figure 28. Doigt semi-mobile.

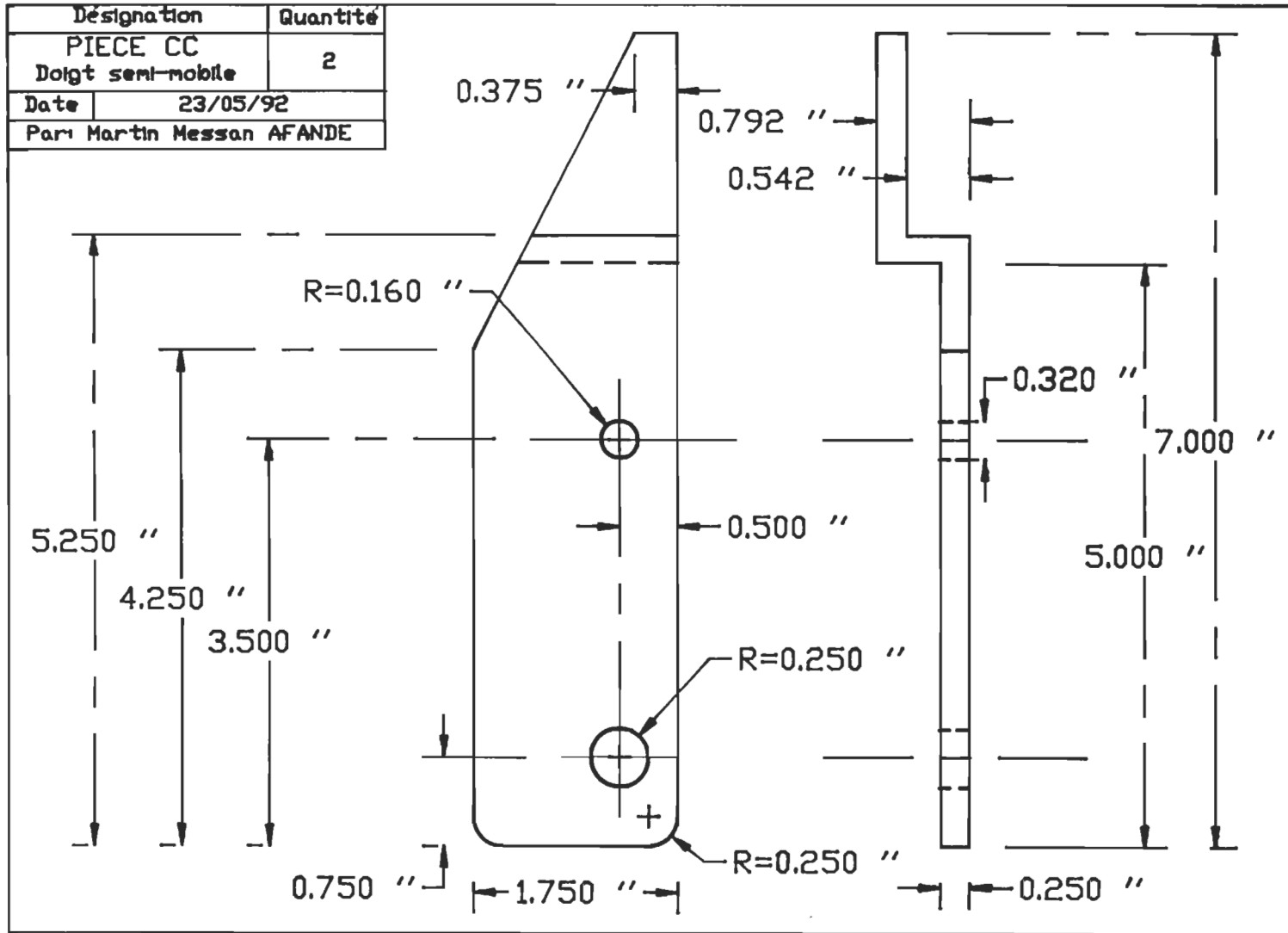
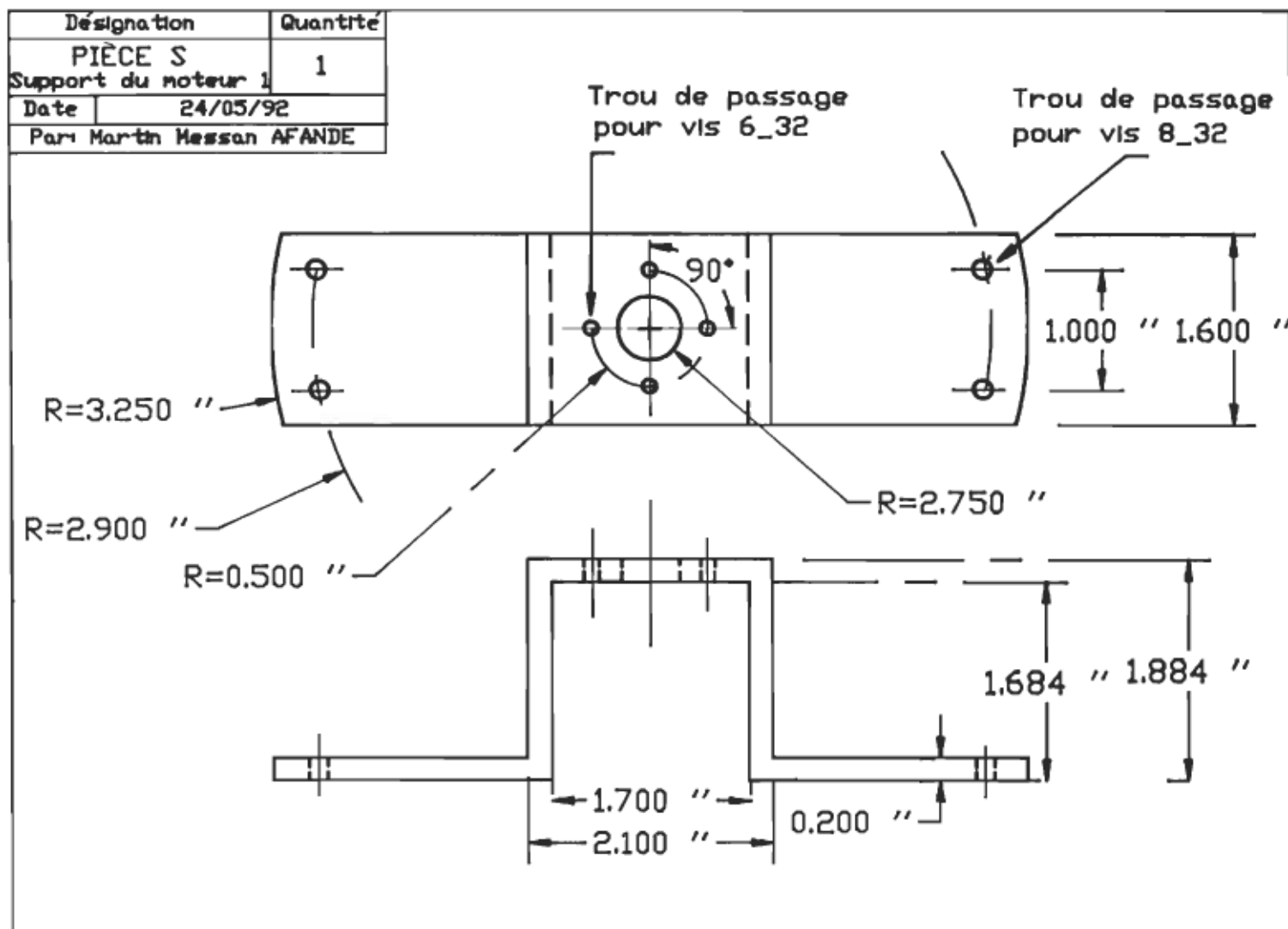


Figure 29. Support du moteur de prépositionnement.



pincement.

Figure 30.

Corps d'épreuve pour la mesure de la force de

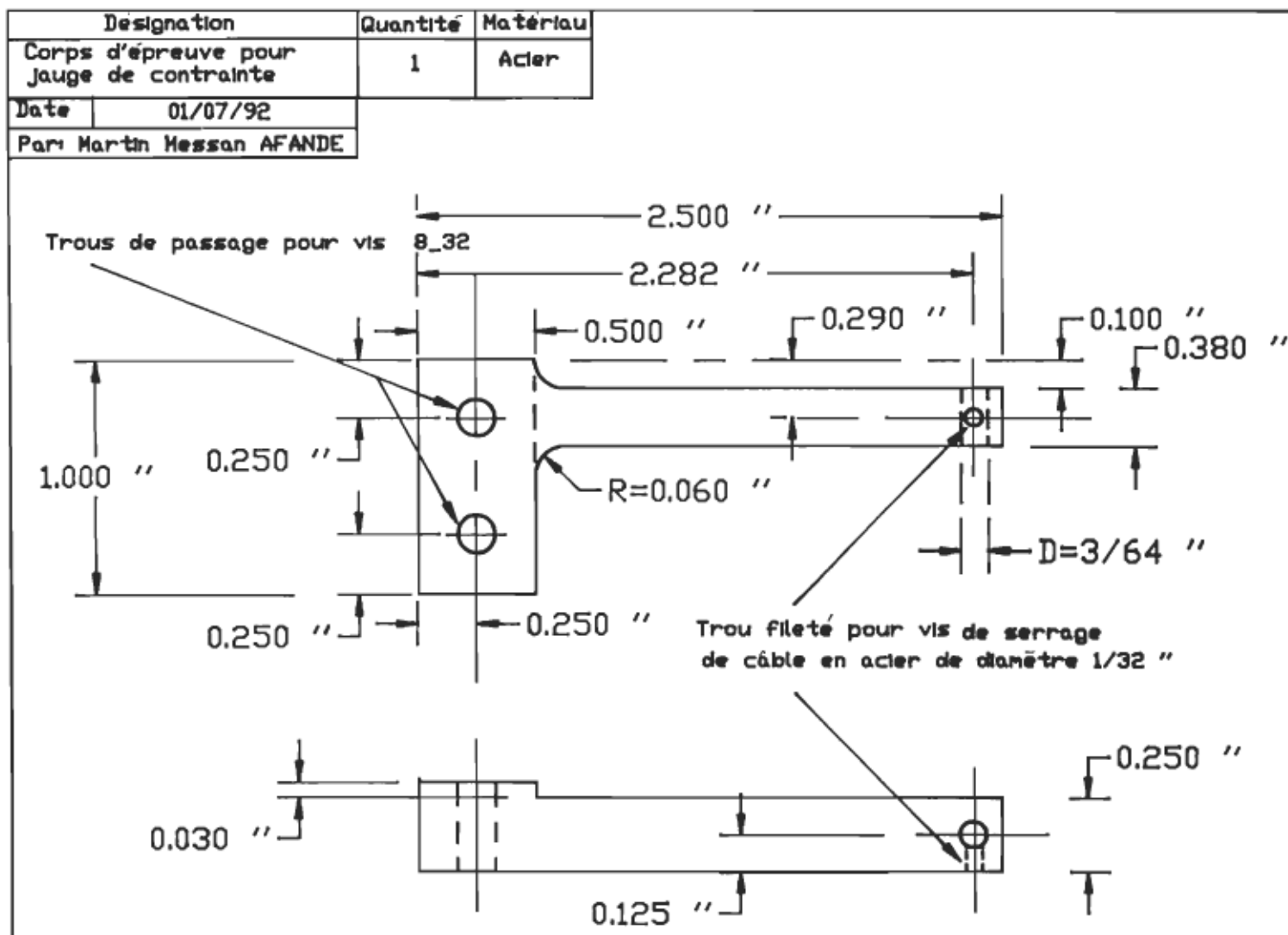


Figure 31.

Poulie et pièce de guidage du câble gainé.

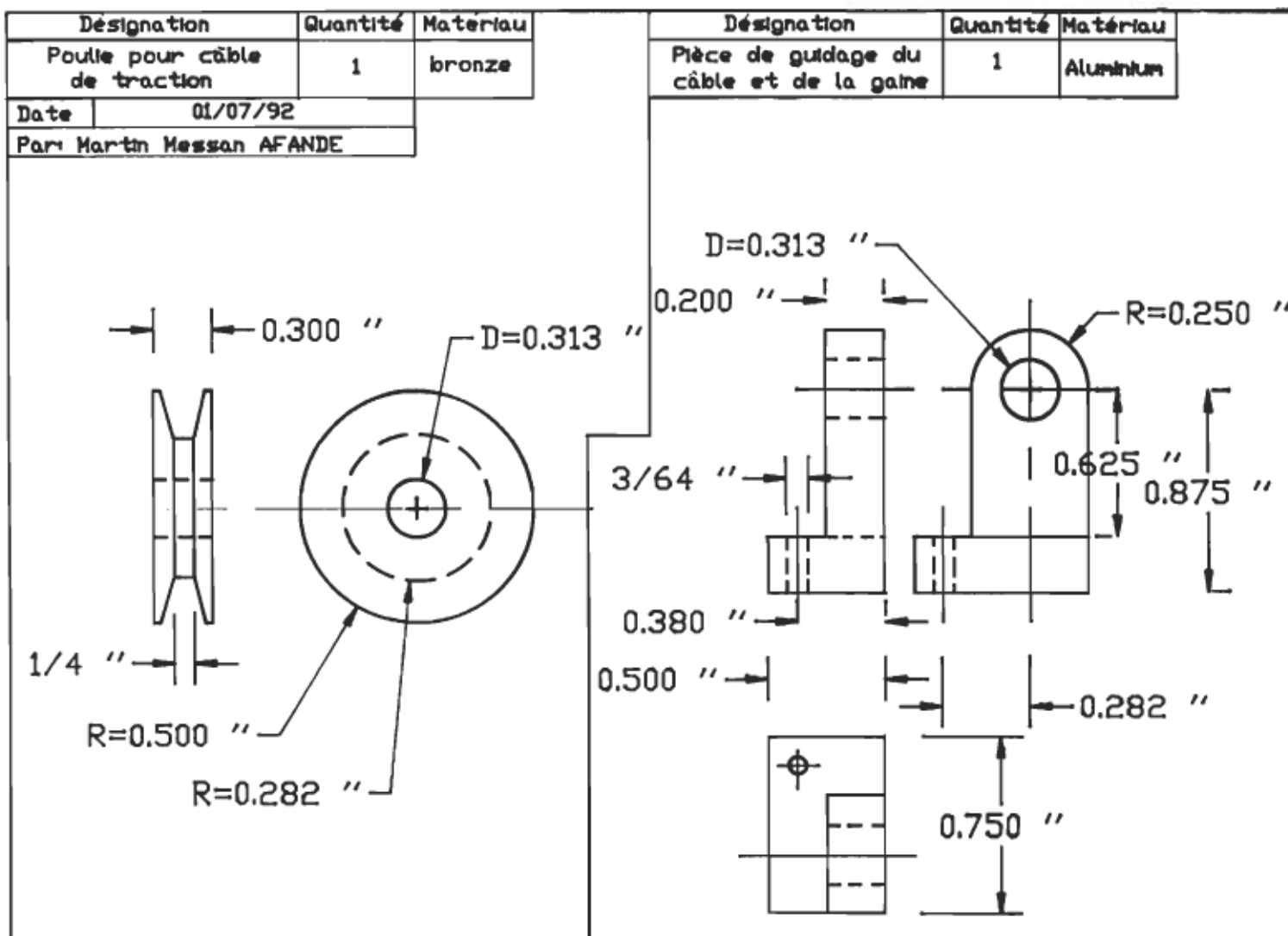


Figure 32. Poule de traction du câble de pincement.

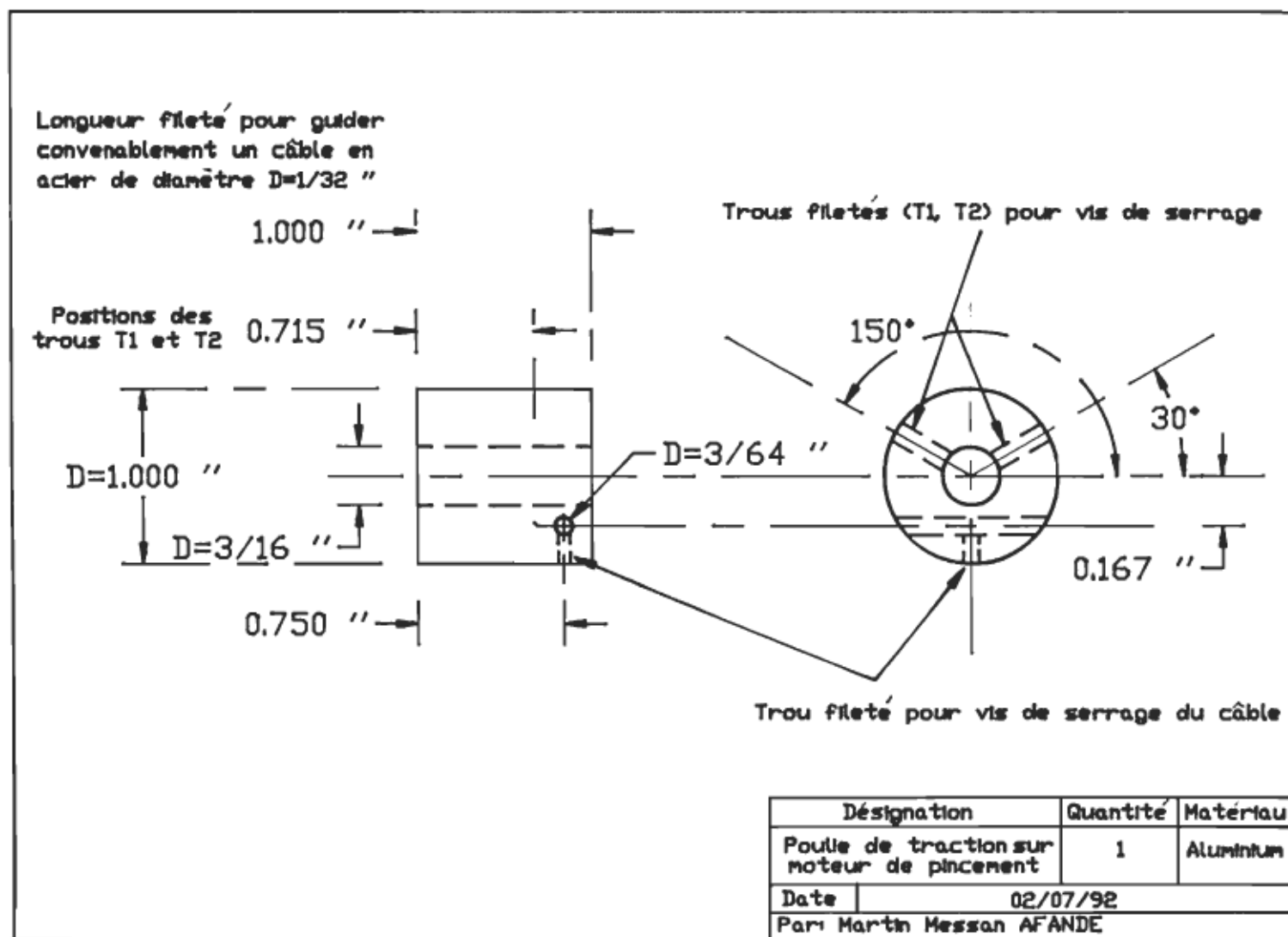
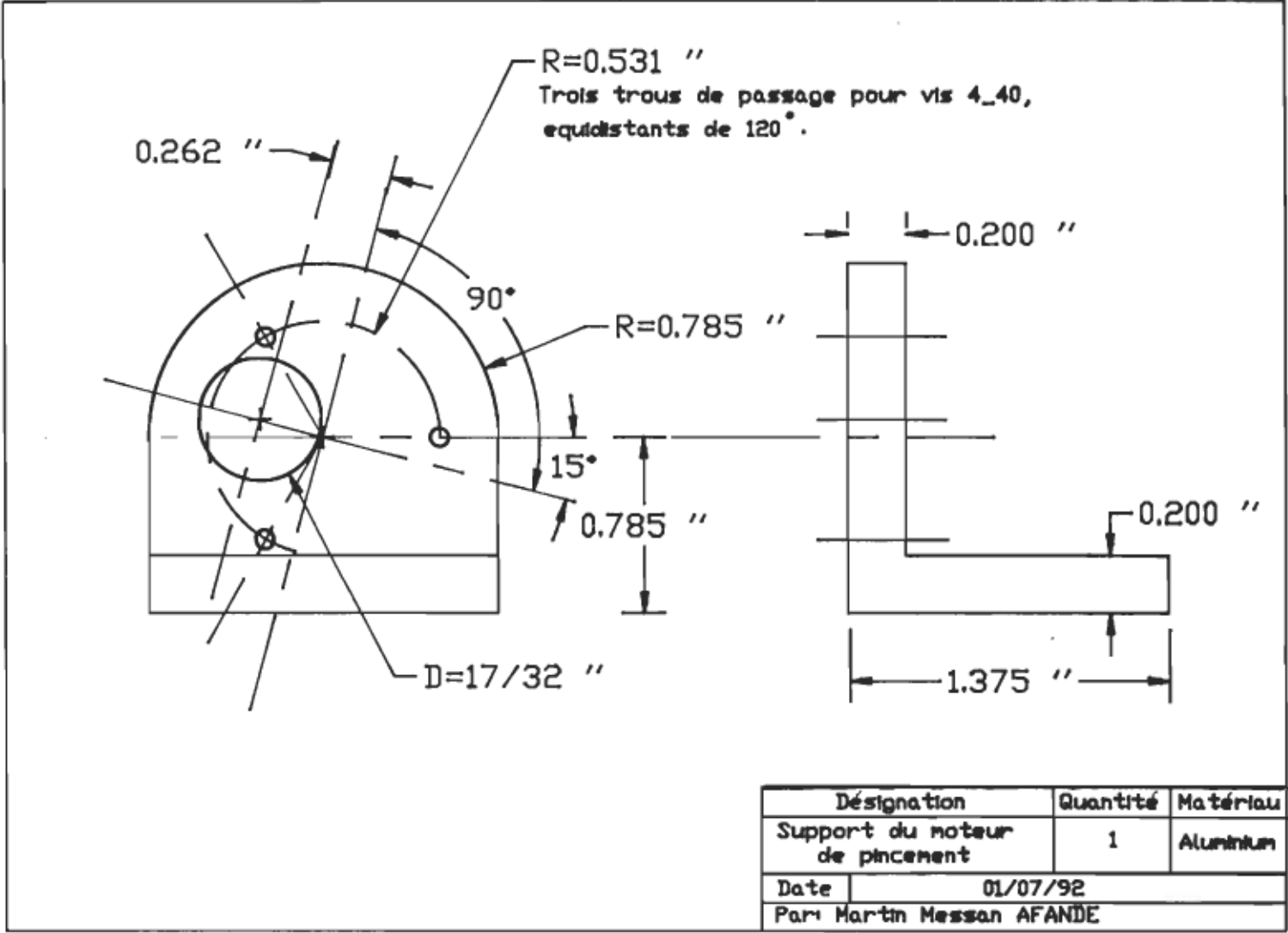


Figure 33. Support du moteur de pincement.



CHAPITRE 4

DÉTERMINATION DE PARAMÈTRES ET MODÉLISATION

Nous présenterons, le calcul du moment d'inertie J_L des pièces tournantes de la pince, la détermination expérimentale du coefficient de frottement visqueux DL , ainsi que le calcul des paramètres du corps d'épreuve pour le pincement. Nous exposerons aussi, la modélisation des systèmes (prépositionnement et pincement), en vue de l'élaboration des consignes de commande.

Détermination de paramètres:

Calcul du moment d'inertie J_L rapporté à l'axe des vis sans fin: Le schéma d'étude est présenté à la figure 34 et les résultats de pesage des différents éléments sont regroupés dans le tableau 2. Les masses de différentes rondelles n'ont pas été prises en considération car négligeables. Pour le calcul, nous avons utilisés les formules classiques de calcul de moment d'inertie (pièce creuse ou pleine). Pour toute masse m_i , R_i représente le rayon externe et r_i le rayon du trou interne s'il existe. La dénomination m_{iUSi} désigne la masse m_i appartenant à l'unité de saisie "i". Calculons les moments d'inertie de chaque pièce tournante:

$$J_{Lm1} = (m_{1US1} + m_{1US2} + m_{1US3}) . a^2$$

$$J_{Lm2} = (m_{2US1} + m_{2US2} + m_{2US3}) . a^2$$

$$J_{Lm6} = (m_{6US1} + m_{6US2} + m_{6US3}) . a^2$$

$$J_{Lm3} = 1/2 \cdot (m_{3US1} + m_{3US2} + m_{3US3}) \cdot (R_3^2 - r_3^2)$$

$$J_{Lm7} = 1/2 \cdot (m_{7US1} + m_{7US2} + m_{7US3}) \cdot (R_7^2 - r_7^2)$$

$$J_{Lm4} = 1/2 \cdot m_4 \cdot R_4^2$$

$$J_{Lm5} = J_{Lm8} = 1/2 \cdot m_5 \cdot (R_5^2 - r_5^2)$$

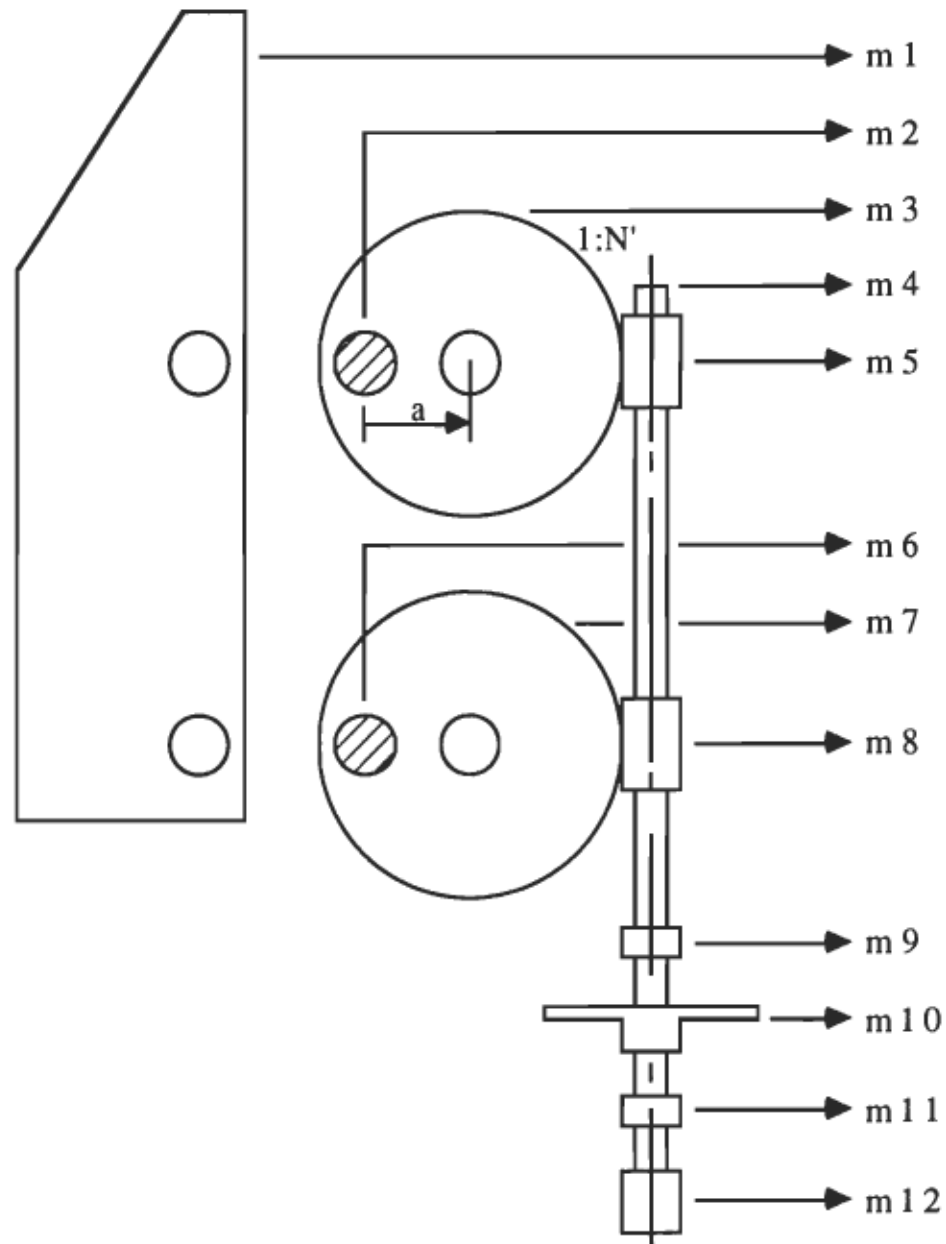


Figure 34. Schéma équivalent du point de vue inertie.

$$J_{Lm9} = J_{Lm11} = 1/2 \cdot m_9 \cdot (R_9^2 - r_9^2)$$

$$J_{Lm10} = 1/2 \cdot m_{10} \cdot (R_{10}^2 - r_{10}^2)$$

$$J_{Lm12} = 1/2 \cdot m_{12} \cdot (R_{12}^2 - r_{12}^2)$$

Le moment d'inertie total J_L est donné par:

$$(4,1) \quad J_L = ((J_{Lm1} + J_{Lm2} + J_{Lm3} + J_{Lm6} + J_{Lm7}) / N'^2) + J_{Lm4} + \\ + 2 \cdot J_{Lm5} + 2 \cdot J_{Lm9} + J_{Lm10} + J_{Lm12}$$

N' étant le rapport de transformation du système à vis sans fin.

Tableau 2

Résultats de pesage

masse(g)	P.C	U.S.1	U.S.2	U.S.3
m1		127,22	144,21	145,23
m2		14,03	14,01	14,00
m3		137,61	138,63	133,20
m4	25,12			
m5	13,61			
m6		16,58	15,46	15,73
m7		133,85	137,37	133,29
m8	13,61			
m9	4,24			
m10	18,75			
m11	4,24			
m12	8,50			

P.C signifie: pièces communes.

U.S.1 signifie: unité de saisie 1.

U.S.2 signifie: unité de saisie 2.

U.S.3 signifie: unité de saisie 3.

Application numérique:

$$a = 2,3876 \cdot 10^{-2} \text{ m.}$$

$$\begin{aligned} J_L = & [(127,22+144,21+145,23) \cdot 10^{-3} \cdot (2,3876)^2 \cdot 10^{-4} + \\ & +(14,03+14,01+14,00) \cdot 10^{-3} \cdot (2,3876)^2 \cdot 10^{-4} + \\ & +(1/2) \cdot (137,61+138,63+133,20) \cdot 10^{-3} \cdot ((3,175)^2 - (0,3969)^2) \cdot 10^{-4} + \\ & +(1/2) \cdot (133,85+137,37+133,29) \cdot 10^{-3} \cdot ((3,175)^2 - (0,3969)^2) \cdot 10^{-4} + \\ & +(16,58+15,46+15,73) \cdot 10^{-3} \cdot (2,3876)^2 \cdot 10^{-4}] / 80^2 + \\ & +(1/2) \cdot 25,12 \cdot 10^{-3} \cdot (0,2381)^2 \cdot 10^{-4} + \\ & +13,61 \cdot 10^{-3} \cdot ((0,5563)^2 - (0,2381)^2) \cdot 10^{-4} + \\ & +(4,24+(1/2) \cdot (18,75+8,50)) \cdot 10^{-3} \cdot ((0,5080)^2 - (0,2381)^2) \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

On trouve finalement:

$$J_L = 0,8832 \cdot 10^{-6} \text{ Kg} \cdot \text{m}^2.$$

Détermination expérimentale du coefficient de frottement visqueux

DL: La structure mécanique de la pince engendre du frottement à plusieurs endroits (Figure 35). Nous précisons que la figure 35 ne représente que le schéma équivalent pertinent à notre étude. Par conséquent, certaines pièces essentielles dont le base de la pince, supportant le servomoteur, n'apparaît pas sur la représentation.

La méthode de détermination consiste à mesurer le courant dans le servomoteur en régime établi (fin de course) en commandant les doigts entre deux positions extrêmes . Écrivons les équations de base d'un moteur à courant continu:

$$(4,2) \quad R_a \cdot i_a + L_a \cdot di_a/dt + K_e \cdot \omega_m = V_a$$

$$(4,3) \quad T_g = K_t \cdot i_a = J \cdot d\omega_m/dt + D \cdot \omega_m$$

$$\text{Avec} \quad J = J_m + J_L$$

$$D = D_m + D_L$$

En régime établi on a:

$$di_a/dt = 0 \quad \text{et} \quad d\omega_m/dt = 0$$

Par conséquent les expressions (4,2) et (4,3) deviennent:

$$(4,4) \quad R_a \cdot i_a + K_e \cdot \omega_m = V_a$$

$$(4,5) \quad T_g = K_t \cdot i_a = D \cdot \omega_m$$

De (4,5) on a: $\omega_m = (K_t \cdot i_a)/D$

portons la valeur de ω_m dans (4,4); on obtient:

$$R_a \cdot i_a + K_e \cdot (K_t \cdot i_a)/D = V_a$$

Ou encore: $D = K_e \cdot (K_t \cdot i_a) / (V_a - R_a \cdot i_a)$

Ce qui donne finalement:

$$(4,6) \quad D_L = [K_e \cdot (K_t \cdot i_a) / (V_a - R_a \cdot i_a)] - D_m$$

Application numérique: (Sermoteur PITTMAN, model 9413).

$$K_e = 0,0388 \text{ V/rad/s}$$

$$K_t = 0,0388 \text{ N.m/A}$$

$$R_a = 8,19 \Omega$$

$$D_m = 0,76 \cdot 10^{-6} \text{ N.m/rad/s}$$

$$V_{cc} = 12 \text{ V}$$

$V_R = 1\text{V}$ (V_R est une valeur moyenne considérée au milieu du nuage de points sur l'écran de l'oscilloscope à mémoire).

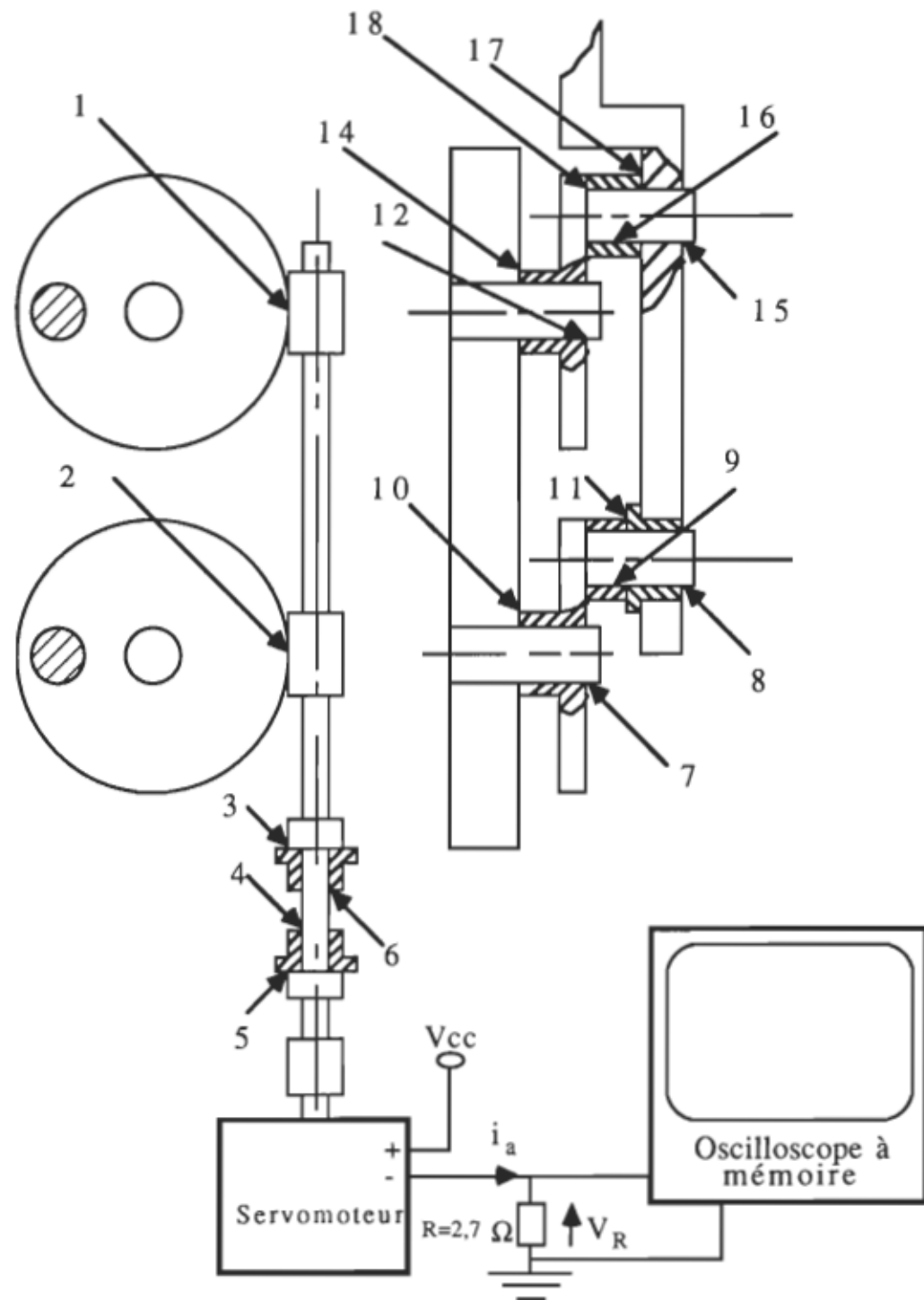


Figure 35. Schéma équivalent du point de vue frottement visqueux.

On calcule: $i_a = V_R/R = 0,3704 \text{ A}$

Alors: $V_a = V_{cc} - V_R = 11 \text{ V}$

Application numérique:

$$D_L = [0,0388.(0,0388.0,3704)/(11-8,19.0,3704)]-0,76.10^{-6}$$

On trouve:

$$D_L = 69,24 \cdot 10^{-6} \text{ N.m/rad/s}$$

Calcul des paramètres du corps d'épreuve pour le pincement: Tous les calculs qui seront faits dans cette sous section supposent les mêmes hypothèses que pour l'étude de déformation sur les doigts. L'utilisation d'un corps d'épreuve est nécessaire dans notre situation car cela permet, d'une part l'optimisation du rapport signal sur bruit, et d'autres parts un changement d'échelle de mesure relativement facile. Ce corps d'épreuve, solidaire au doigt mobile (Figure 21), servira de support au câble de traction lors du pincement. Il sera calculé en flexion avec encastrement à une extrémité et portera deux jauges de mesure de déformation (Figure 36). Les équations d'équilibre donnent:

$$\sum F = 0 \quad \text{----->} \quad R_A = F_I$$

$$\sum M = 0 \quad \text{----->} \quad M_A = - F_I \cdot L, \text{ avec } F_I = F_O \cdot (X_O/X_I)$$

Tous les résultats connexes sont résumés sur la figure 37. Il est à noter, que la détermination des paramètres du corps d'épreuve, tiendra compte essentiellement, de la limite d'élasticité de l'acier utilisé, ainsi que des discontinuités géométriques de la pièce. L'acier que nous avons choisi pour le calcul est: UNSG10400 CD (acier étiré à froid) avec une limite d'élasticité $S_y = 490 \text{ Mpa}$. La contrainte

nominale subie par le corps d'épreuve sur toute sa longueur (Figure 37) est donnée par (4,7).

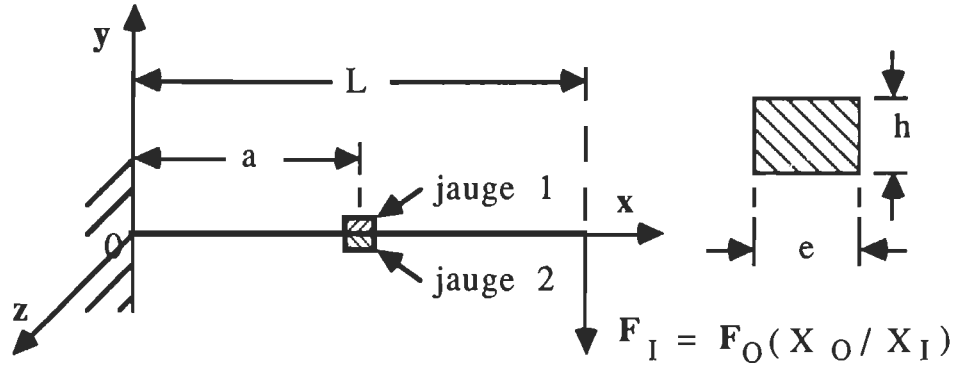


Figure 36. Schéma d'étude du corps d'épreuve pour la mesure de force.

$$(4,7) \quad \sigma(x) = E \cdot \varepsilon(x) = [6 \cdot F_O \cdot X_O \cdot (L - x)] / (e \cdot h^2 \cdot X_I)$$

Le cas le plus défavorable est obtenu à $x = 0$ où se situe la seule discontinuité géométrique (épaulement). Dans ce cas, on doit faire intervenir le facteur de concentration de contrainte défini par:

$$K_{t\sigma} = \sigma / \sigma_{nom}$$

Ainsi, la contrainte à l'épaulement devient:

$$(4,8) \quad \sigma(0) = K_{t\sigma} \cdot [6 \cdot F_O \cdot X_O \cdot L] / (e \cdot h^2 \cdot X_I)$$

En considérant un facteur de sécurité de deux, la condition de déformation élastique donne:

$$(4,9) \quad \sigma(0) \leq S_y / 2$$

Portons (4,8) dans (4,9); après rangement on obtient:

$$(4,10) \quad L / (e \cdot h^2) \leq S_y \cdot X_I / (12 \cdot K_{t\sigma} \cdot F_O \cdot X_O)$$

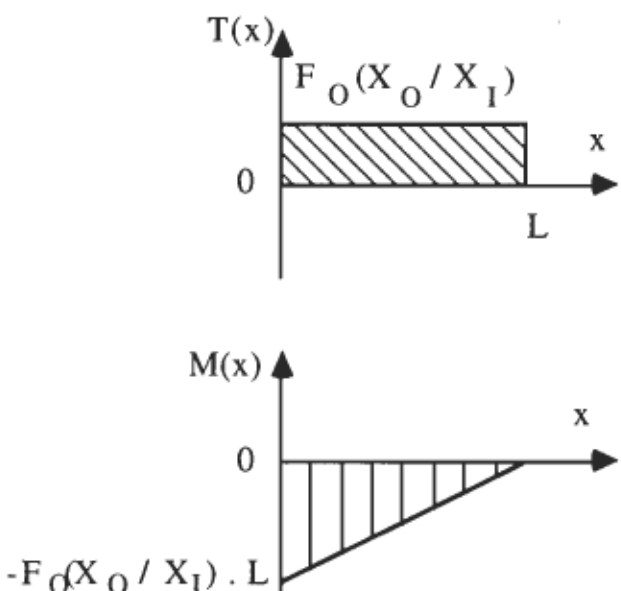
Section d'abscisse x	$0 \leq x \leq L$
Effort tranchant $T(x)$	$T(x) = R_A = F_I$ ou encore $T(x) = F_O (X_O / X_I)$
Moment fléchissant $M(x)$	$M(x) = F_O (X_O / X_I) \cdot (x - L)$
Courbes $T(x) = f(x)$ $M(x) = g(x)$	
Déformation sur fibre supérieure. $\epsilon(x) = - \frac{M(x)}{E I} \frac{h}{2}$ avec $I = (e h^3) / 12$	$\epsilon(x) = \frac{6 \cdot F_O \cdot X_O \cdot (L - x)}{E \cdot e \cdot X_I \cdot h^2}$

Figure 37. Récapitulatif sur l'étude du corps d'épreuve.

La longueur L a été optimisée à sa plus grande valeur conformément à l'encombrement au niveau du doigt. Quant à la valeur du facteur de

concentration de contrainte $K_{t\sigma}$, nous nous sommes situés dans le pire cas pour cette configuration de discontinuité. Ainsi on a: $L = 1,782$ " et $K_{t\sigma} = 3$. En considérant le cas limite où la force de saisie est maximale ($F_O = 100$ N) et en fixant $e = 0,250$ ", on obtient à partir de (4,10) que, $h = 0,380$ ". Ce qui complète la détermination du corps d'épreuve. Il est à noter que d'autres combinaisons de paramètres e et h sont possibles et que le critère de choix est surtout lié à l'encombrement disponible sur le doigt. D'où le récapitulatif suivant quant aux paramètres du corps d'épreuve:

$$L = 1,782 \text{ "}$$

$$e = 0,250 \text{ "}$$

$$h = 0,380 \text{ "}$$

Modélisation du mouvement de prépositionnement et de l'action de pincement:

Modélisation du prépositionnement: Il est essentiellement caractérisé par deux déplacements, axial et radial. Le mouvement radial détermine l'écartement de la pince. Les positions extrêmes sont situées aux points P0 et P1; donc l'angle θ varie de 0 à 180° (Figure 38). Le mouvement axial intervient comme une perturbation car il nécessite une correction suivie au niveau du bras manipulateur. Ainsi allons nous introduire les deux coordonnées, axiale (z_r) et radiale (r). À partir de la figure 38 on écrit que:

$$(4,11) \quad r = R \cdot (1 - \cos(\theta))$$

$$(4,12) \quad z_r = Z_0 + L_1 + L_2 + R \cdot \sin(\theta)$$

Nous allons transformer l'expression (4,11) afin de l'utiliser comme valeur de consigne dans la commande. De (4,11), on obtient:

$$\theta = \arccos(1-r/R), \quad \text{et} \quad \theta_m = N' \cdot \theta;$$

Donc: $\theta_m = N' \cdot \arccos(1-r/R)$

Ainsi connaissant la dimension de l'objet à saisir (r) on calcule l'angle θ_m de consigne pour la commande du moteur de prépositionnement. La mesure de cet angle se fait par l'intermédiaire d'un codeur de gain K_c tel que:

$$K_c = (\text{Résolution})/(2 \cdot \pi) = 2 \cdot 30/(2 \cdot \pi) = 30/\pi; \text{ (on détecte les fronts montants et descendants).}$$

Par conséquent il devient plus intéressant d'exprimer la consigne sous forme d'impulsions. Donc en multipliant θ_m par le gain K_c , on obtient:

$$(4,13) \quad N_{\text{imp}} = ((30 \cdot N')/\pi) \cdot \arccos(1-r/R), \text{ avec:} \quad R = 0,940''$$

À partir de L'expression (4,13), nous avons généré le tableau 3.

La table de consigne (tableau 3), lie le paramètre de dimension r_n , ($r_n = 100 \cdot r$) à la consigne de commande N_{imp} . Dans cette table, r_n varie de 0 à 188 avec un pas de 1, ce qui correspond à une variation de $r = 0$ à $2.R$ avec un pas se $0,010''$; en pratique, ce pas minimum est suffisant pour garantir une certaine versatilité au niveau de la dimension des objets à saisir. L'avantage de cette approche de modélisation est, entre autres, l'élimination de calculs intermédiaires.

Tableau 3

Valeurs de consigne N_{imp} en fonction du paramètre de dimension r_n

r_n	$*N_{imp}$	r_n	$*N_{imp}$	r_n	$*N_{imp}$	r_n	$*N_{imp}$
1	70	31	27F	61	39E	91	498
2	9E	32	28A	62	3A7	92	4A0
3	C2	33	295	63	3AF	93	4A8
4	E0	34	29F	64	3B8	94	4B0
5	FA	35	2AA	65	3C0	95	4B8
6	112	36	2B4	66	3C9	96	4C0
7	129	37	2BE	67	3D1	97	4C8
8	13D	38	2C8	68	3DA	98	4D1
9	151	39	2D3	69	3E8	99	4D9
10	164	40	2DD	70	3EB	100	4E1
11	175	41	2E6	71	3F3	101	4E9
12	186	42	2F0	72	3FC	102	4F1
13	197	43	2FA	73	404	103	4F9
14	1A6	44	304	74	40C	104	501
15	1B6	45	30D	75	415	105	50A
16	1C4	46	317	76	41D	106	512
17	1D3	47	320	77	425	107	51A
18	1E1	48	329	78	42D	108	522
19	1EE	49	333	79	436	109	52A
20	1FC	50	33C	80	43E	110	533
21	209	51	345	81	446	111	53B
22	215	52	34E	82	44E	112	543
23	222	53	357	83	456	113	54B
24	22E	54	360	84	45F	114	554
25	23A	55	369	85	467	115	55C
26	246	56	372	86	46F	116	564
27	252	57	37B	87	477	117	56D
28	25D	58	384	88	47F	118	575
29	269	59	38D	89	487	119	57E
30	274	60	395	90	48F	120	586

Tableau 3 (suite)

r_n	*N _{imp}	r_n	* N _{imp}	r_n	* N _{imp}	r_n	* N _{imp}
121	58F	138	624	155	6CB	172	79C
122	597	139	62D	156	6D6	173	7AA
123	5A0	140	637	157	6E1	174	7BA
124	5A8	141	640	158	6EC	175	7C9
125	5B1	142	649	159	6F7	176	7DA
126	5B9	143	653	160	703	177	7EB
127	5C2	144	65C	161	70E	178	7FC
128	5CB	145	666	162	71A	179	80F
129	5D3	146	670	163	726	180	823
130	5DC	147	67A	164	732	181	837
131	5E5	148	683	165	73E	182	84E
132	5EE	149	68D	166	74B	183	866
133	5F7	150	698	167	757	184	880
134	600	151	6A2	168	764	185	89E
135	609	152	6AC	169	772	186	8C2
136	612	153	6B6	170	77F	187	8F0
137	61B	154	6C1	171	78D	188	960

* Les valeurs de consigne sont exprimées en hexadécimal pour fin de programmation.

Modélisation du pincement: Pour le prépositionnement, la modélisation a été basée sur le circuit de détection de la position. Parallèlement, dans le cas du pincement, la modélisation tiendra compte essentiellement du système de mesure de la force de pincement. Par conséquent nous allons étudier, dans un premier temps, le circuit de conditionnement des signaux provenant des jauges.

Circuit de conditionnement du signal des jauges: Le montage adopté est la configuration classique en demi-pont (Figure 39).

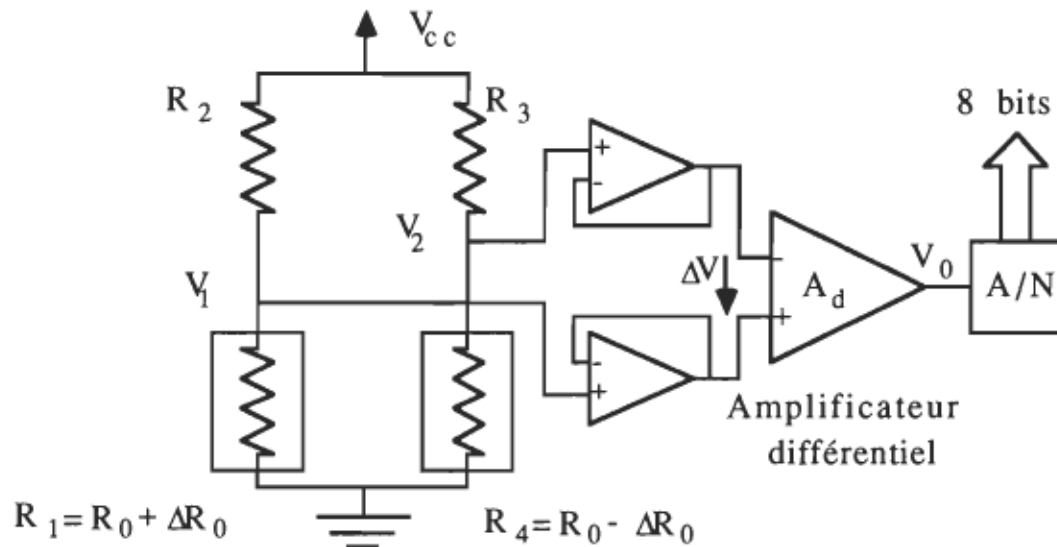


Figure 39. Circuit de conditionnement du signal des jauges.

Les jauges de mesure, représentées par les résistances R_1 et R_4 , subissent des déformations égales et opposées; la jauge R_1 étant collée sur la face supérieure du corps d'épreuve s'étire, tandis que R_2 collée sur la face inférieure se contracte. Ce montage réalise une compensation en température et améliore la sensibilité du pont par rapport au montage à une jauge. D'après la figure 39, on peut écrire:

$$V_1 = [R_1 / (R_1 + R_2)] \cdot V_{cc}$$

$$V_2 = [R_4 / (R_3 + R_4)] \cdot V_{cc}$$

Considérons: $R_1 = R_0 + \Delta R_0$, $R_4 = R_0 - \Delta R_0$ et $R_2 = R_3 = R_0$; alors la tension différentielle à l'entrée de l'amplificateur est donnée par:

$$(4,14) \quad \Delta V = V_1 - V_2 = [(R_0 + \Delta R_0) / (2 \cdot R_0 + \Delta R_0)] \cdot V_{cc} + \\ - [(R_0 - \Delta R_0) / (2 \cdot R_0 + \Delta R_0)] \cdot V_{cc}$$

On remarque que l'expression (4,14) comporte une non linéarité caractérisée par la présence du terme ΔR_0 au dénominateur. Si on remplace R_2 et R_3 par des jauges dont les déformations sont opposées à celles de R_1 et R_4 respectivement, alors l'expression (4,14) serait parfaitement linéaire; le dénominateur deviendrait: $R_0 + \Delta R_0 + R_0 - \Delta R_0 = 2 \cdot R_0$. Mais nous n'adopterons pas cette solution car, en remarquant que la sensibilité des jauges métalliques est faible par opposition à celle des jauges à semiconducteur, on peut écrire que:

$\Delta R_0 \ll R_0$; donc l'expression (4,14) devient:

$$(4,15) \quad \Delta V = [\Delta R_0 / R_0] \cdot V_{cc}$$

Considérons maintenant les variations de la tension d'alimentation en posant: $V_{cc} = V_{cco} + \Delta V_{cc}$; alors l'expression (4,15) devient:

$$\Delta V = [\Delta R_0 / R_0] \cdot V_{cco} + [(\Delta V_{cc} \cdot \Delta R_0) / R_0]$$

On voit bien qu'on peut négliger le terme $\Delta V_{cc} \cdot \Delta R_0$ ce qui confirme la validité de l'expression (4,15).

Soit G_F la sensibilité de la jauge de contrainte; alors:

$$(4,16) \quad \Delta R_0 / R_0 = G_F \cdot \varepsilon$$

Portons (4,16) dans (4,15); on obtient:

$$(4,17) \quad \Delta V = (G_F \cdot V_{cc}) \cdot \varepsilon$$

Or d'après les résultats de la figure 37 on a:

$$(4,18) \quad \varepsilon(a) = [6 \cdot F_0 \cdot X_0 \cdot (L - a)] / (E \cdot e \cdot X_1 \cdot h^2)$$

portons (4,18) dans (4,17); on obtient l'expression suivante:

$$(4,19) \quad \Delta V = [(6 \cdot G_F \cdot V_{cc} \cdot X_0 \cdot (L - a)) / (E \cdot e \cdot X_1 \cdot h^2)] \cdot F_0$$

D'où la tension de sortie de l'amplificateur différentiel:

$$(4,20) \quad V_O = A_d \cdot K_{FO} \cdot F_O$$

$$\text{Avec:} \quad K_{FO} = [6 \cdot G_F \cdot V_{cc} \cdot X_O \cdot (L - a)] / (E \cdot e \cdot X_I \cdot h^2)$$

Afin d'éviter la correction par le facteur de concentration de contrainte $K_{t\sigma}$, qui serait une source d'erreur supplémentaire, nous fixerons les jauges loin des discontinuités. Ainsi, on a: $a = 0,500$ ". Considérons le module d'élasticité de l'acier, $E = 205 \cdot 10^9$ N/m², une tension d'alimentation, $V_{cc} = 5$ V, et les paramètres déjà déterminés. Posons: $F_I = F_O \cdot X_O/X_I$, la force agissant par le câble de traction. Alors:

$$(4,21) \quad V_O = A_d \cdot K_{FI} \cdot F_I$$

$$\text{avec:} \quad K_{FI} = [6 \cdot G_F \cdot V_{cc} \cdot (L - a)] / (E \cdot e \cdot h^2)$$

La valeur numérique calculée pour le facteur K_{FI} est:

$$K_{FI} = 16,11 \cdot 10^{-6} \text{ V/N}$$

Pour la force maximale de pincement, soit 100 N, l'expression (4,18) donne:

$$\epsilon_{\max} = 285,6 \cdot 10^{-6}$$

On vérifie, d'après les notes techniques de la série de jauge qui nous intéresse (CEA-13-125UN-350), que cette déformation garantit un nombre de cycles d'opération supérieur à 10^8 .

En considérant $G_F = 2$ (donnée technique) et $V_{cc} = 5$ V, on obtient, à partir de (4,19):

$$\Delta V_{\max} = 2,856 \text{ mV.}$$

On désire obtenir une tension de sortie V_O d'environ 1 V pour la force maximale de pincement; d'où le gain de l'amplificateur différentiel:

$$A_d = 390$$

ce qui donne en réalité une tension de sortie, $V_O = 1.11$ V.

Limite inférieure de la plage de mesure: Il est à remarquer que la limite inférieure de la plage de mesure sera essentiellement déterminée par la résolution du convertisseur A/N. Considérons l'erreur de conversion de ± 1 LSB (donnée du fabricant).

Avec $V_{ref} = 1,1$ V, on a:

$$\text{Résolution} = 1,1/255 = 4,313 \text{ mV}$$

Ce qui correspond à une erreur ΔF_I , d'après (4,21), égale à:

$$\Delta F_I = 0,686 \text{ N}$$

Donc si on se fixe une erreur maximale de 2%, la force minimale de la plage de mesure sera de:

$$F_{Omin} = (\Delta F_I/2\%) \cdot (X_I/X_O)$$

Soit 20 N environ, équivalent à 2 Kg.

Un convertisseur A/N de résolution plus élevée (12 bits par exemple) permettra d'étendre encore plus la plage de mesure en abaissant F_{Imin} car la précision sera meilleure.

Élaboration de la consigne de force: Comme dans le cas du prépositionnement, nous allons adopter une modélisation qui minimisera les calculs intermédiaires.

Le signal de retour quant à la mesure de la force est codé sur huit bits à la sortie du convertisseur A/N; il prend donc les valeurs de 0 à 255.

Par conséquent, il serait intéressant d'exprimer aussi la consigne de force F_{con} , sous forme d'une variable allant de 0 à 255. Pour ce faire, exprimons ΔF_O (force élémentaire), à partir de ΔF_I :

$$\Delta F_O = \Delta F_I \cdot (X_I/X_O) = 0,387 \text{ N}$$

Posons:

$$(4,22) \quad F_O = F_{con} \cdot \Delta F_O$$

$$\text{Avec:} \quad F_{con} = 0 \text{ -----} > 255$$

On a alors:

$$(4,23) \quad F_{con} = F_O/\Delta F_O$$

Ainsi, connaissant la force à appliquer aux bouts des doigts, F_O , le contrôleur maître (robot), élabore la consigne F_{con} à partir de (4,23), qu'il transfère au contrôleur esclave de la pince. Il est à noter que, dans ce cas, le système de commande autorise une plage de mesure de F_{Omin} à $F_{Omax} = 100 \text{ N}$ avec un pas de $0,4 \text{ N}$. Rappelons que la valeur minimale de l'échelle F_{min} est directement liée à l'erreur maximale permise. Pour une erreur maximale d'environ 2%, $F_{Omin} = 20 \text{ N}$ environ.

Détails techniques sur le circuit de conditionnement : En général le point de mesure étant éloigné du circuit de conditionnement, on a recours à des montages pratiques qui minimisent les effets des grandeurs d'influence, soit la température dans notre cas. Le montage pratique que nous adoptons est désigné sous l'appellation, montage à trois fils (Figure 40).

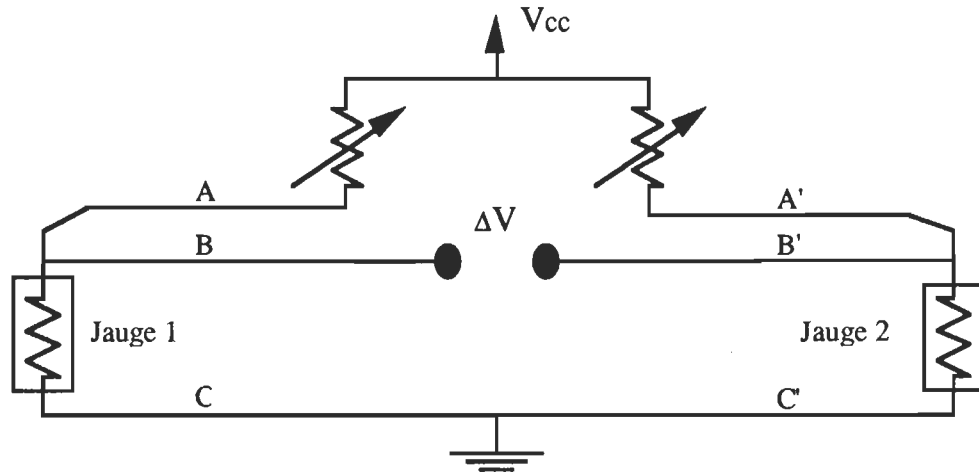


Figure 40. Montage à trois fils.

Il est à noter, que ce montage contribue aussi à minimiser la dégradation du facteur de sensibilité des jauges G_F . Soit G_{FD} la nouvelle valeur; d'après le fabricant on a:

$$G_{FD} = G_F \cdot [R_G / (R_G + R_W)]$$

Avec:

R_G : résistance de la jauge en ohms.

R_W : résistance équivalente du fil C ou C' en ohms.

En général on s'arrange pour que les fils A, B, et C soient identiques de même longueur, ainsi que les fils A', B' et C'.

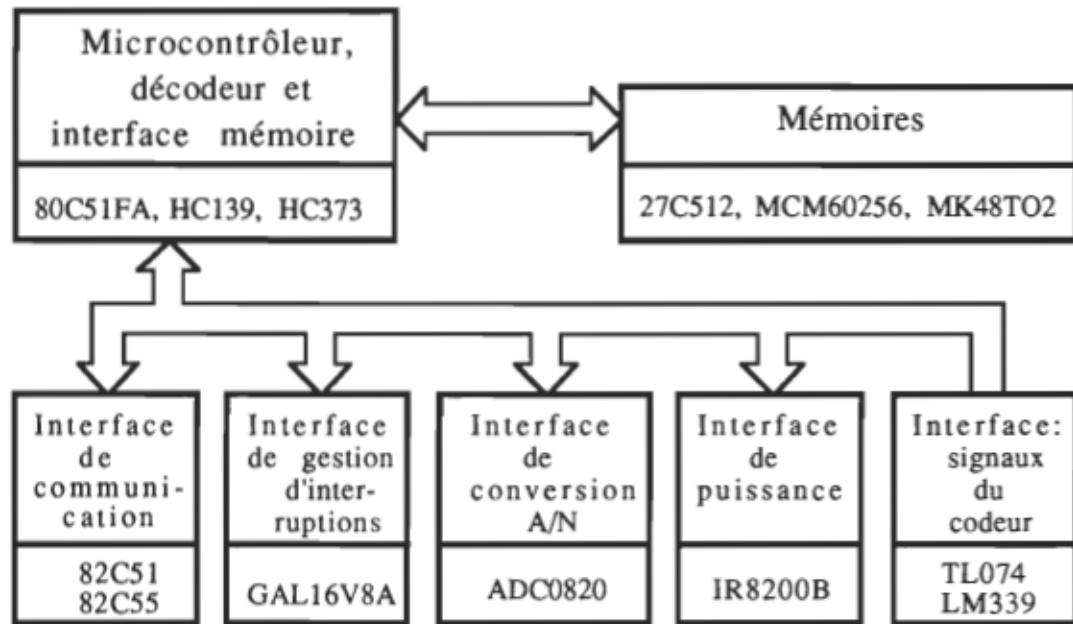
CHAPITRE 5

CONCEPTION DE LA CARTE ÉLECTRONIQUE DE COMMANDE

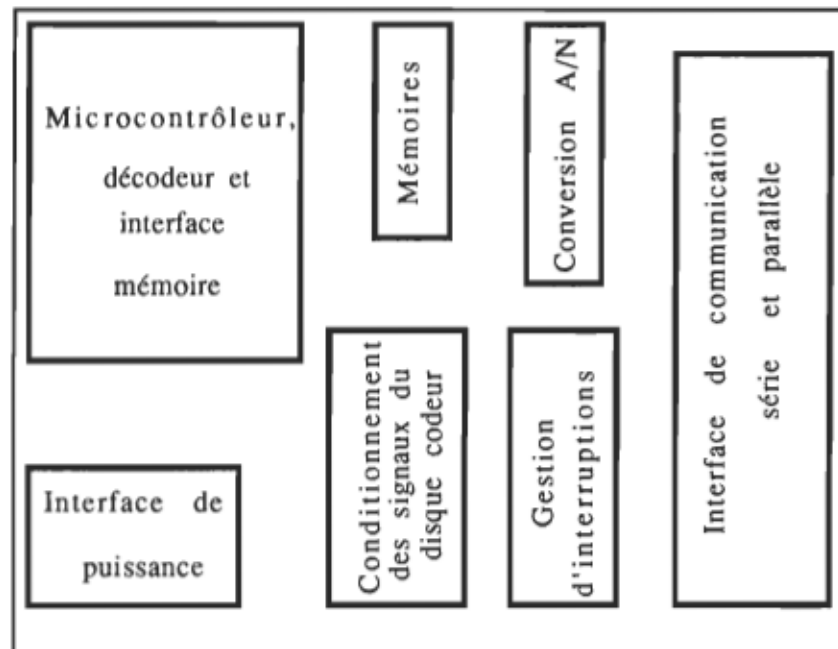
Dans l'introduction de ce rapport, nous avons précisé que le système à étudier devrait être intelligent et autonome; par conséquent, la carte de commande devrait intégrer toutes les composantes nécessaires. D'où la conception d'une carte de commande appropriée. Le lecteur devra être conscient de la nécessité de l'analyse de délais au niveau des différents composants, car elle caractérise le bon fonctionnement d'une carte électronique. Ainsi, ne seront présentés que les détails jugés pertinents.

Organisation générale de la carte: Nous avons doté la carte d'une unité de contrôle et de différentes interfaces (Figure 41).

Choix du microcontrôleur: est lié à certaines considérations dont la capacité en nombre d'interruptions et la simplicité de commande au niveau des circuits de l'interface de puissance (IR8200B). Le microcontrôleur 80C51FA a sept entrées d'interruption et cinq sorties adaptées à la commande PWM. Son horloge de 12 MHz lui confère une vitesse d'exécution raisonnable. En plus, il dispose d'un certain nombre de compteurs internes 16 bits qui se prêtent bien à la commande échantillonnée. Il a une capacité d'adressage de 64 K pour la mémoire de programme, et aussi 64 K pour la mémoire de données. Il dispose en plus d'une RAM interne de 127 octets inclant un espace bit



(a)



(b)

Figure 41. Carte électronique de commande: (a) schéma bloc, (b) disposition physique des composants sur la carte.

adressable. Le jeu d'instructions est particulièrement intéressant dans ce sens qu'il permet entre autres, des opérations de test direct sur les bits, éliminant ainsi l'utilisation de masque.

L'unité de contrôle: Elle utilise un microcontrôleur (80C51FA) de Intel. Ce boîtier fonctionne en mode multiplexé au niveau des données et du byte inférieur des adresses. Par conséquent l'utilisation d'un boîtier d'interface mémoire (HC373) est nécessaire. La mémoire disponible comprend, un EPROM de 64 K (27C512) pour le programme, une RAM de 8K (MCM60256A) pour les données temporaires et une RAM à pile (MK48TO2) pour les données permanentes éventuellement.

Les interfaces: disponibles sont assez variées: soit une interface de communication série (82C51A), parallèle (82C55A), une interface de conversion A/N (ADC0820), une interface de conditionnement des signaux analogiques provenant du codeur rotatif, une interface de gestion d'interruptions (GAL16V8A, logique programmée), et enfin une interface de puissance (IR8200B, commande PWM).

Détails techniques:

Programmation de l'interface de gestion d'interruption:

Description sommaire du circuit GAL16V8A: Le GAL16V8A est un circuit logique programmable et effaçable électriquement. Il comporte 20 broches dont dix entrées dédiées et huit sorties. Chacune des huit sorties peut être utilisée comme entrée en logique séquentielle. Chaque sortie est une somme de huit produits, au maximum, des variables d'entrée. Il autorise trois modes de

programmation dont: le mode registre, le mode simple et le mode complexe. Chaque mode est caractérisé par une configuration particulière du bloc de sortie appelé "macrocell". Dans le mode complexe chacune des sorties est la somme de sept produits de variables d'entrée. Le huitième produit est utilisé pour activer ou désactiver la sortie correspondante, c'est à dire qu'il permet le fonctionnement en état de haute impédance. Cette possibilité est particulièrement intéressante d'autant plus que certaines sorties du circuit (GAL16V8A), seront connectées au bus de données de la carte.

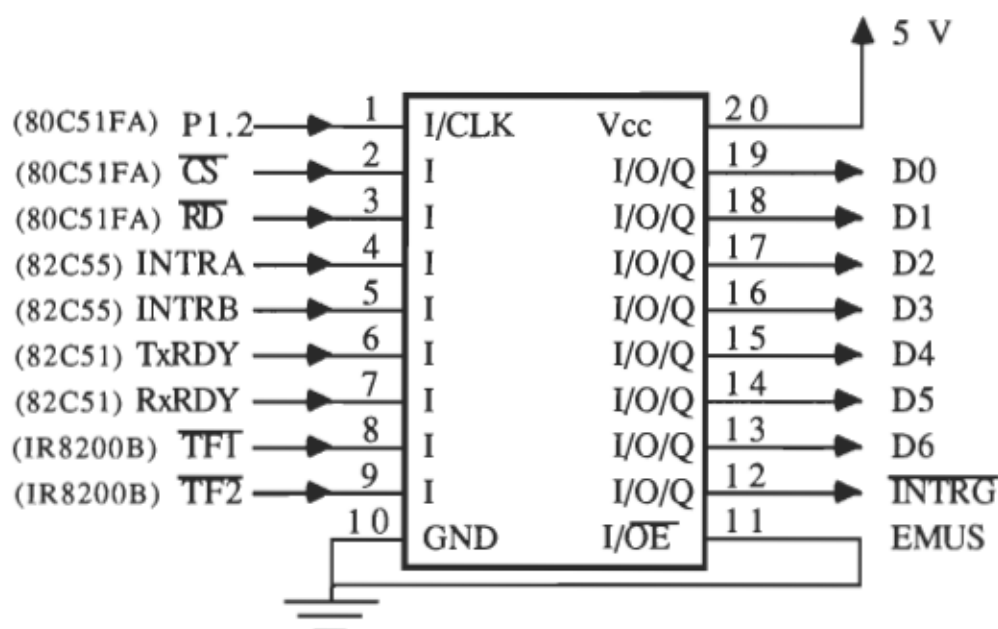


Figure 42. Entrées-sorties de l'interface de gestion d'interruption.

Pourquoi utiliser le circuit GAL16V8A? En effet, le nombre d'interruptions à générer sur la carte est supérieur à la capacité du microcontrôleur. Par conséquent nous devons regrouper un certain nombre d'interruptions et les assigner à une interface de gestion. Cette

gestion suppose, le passage et l'identification d'une interruption qui se présente sur une des entrées de l'interface. Ainsi, l'interface de gestion devrait disposer d'une sortie principale de demande d'interruption vers le microcontrôleur et aussi de sorties d'identification (Figure 42). D'où l'utilisation de la logique programmée.

Description des variables d'entrée et de sortie: Toutes les variables qui sont actives au niveau bas seront précédées du signe "!".

- P1.2: entrée provenant du microcontrôleur pour activer ou désactiver la sortie d'interruption !INTRG.

- !CS: entrée de sélection du circuit GAL16V8A provenant du décodeur.

- !RD: entrée de lecture du circuit GAL16V8A provenant du microcontrôleur.

- INTRA, INTRB: entrées d'interruption des ports A et B provenant de l'interface de communication parallèle.

- TxRDY, RxRDY: entrées d'interruption, respectivement en transmission et en reception, provenant de l'interface de communication série.

- !TF1, !TF2: entrées d'interruption provenant de l'interface de puissance, lorsque la température des boîtiers atteint 145° C.

- EMUS: entrée mise à la masse pour utilisation spéciale.

Remarquons que toutes les entrées non utilisées doivent être mises à la masse afin d'éliminer la possibilité de comportement aléatoire causé par le bruit.

- !INTRG: sortie d'interruption (GAL16V8A) vers l'entrée !INT1 du microcontrôleur.

- D0.....D6: sorties d'identification des interruptions, connectées au bus de données de la carte.

Description des équations de fonctionnement: Il est à souligner que les expressions qui vont suivre ne représentent que la description en logique combinatoire du fonctionnement de l'interface. Par conséquent, il faudrait donc consulter le manuel du logiciel de programmation (ABEL) afin de traduire ces expressions par les syntaxes appropriées (voir le programme compilé à l'annexe A).

$$!INTRG = (p1.2).[INTRA + INTRB + TxRDY + RxRDY + (!TF1) + (!TF2)]$$

$$D0 = (!CS).(!RD).INTRA$$

$$D1 = (!CS).(!RD).INTRB$$

$$D2 = (!CS).(!RD).TxRDY$$

$$D3 = (!CS).(!RD).RxRDY$$

$$D4 = (!CS).(!RD).(!TF1)$$

$$D5 = (!CS).(!RD).(!TF2)$$

$$D6 = (!CS).(!RD).EMUS$$

Le logiciel de programmation offre une option de simulation à partir de vecteurs de test afin de vérifier le bon fonctionnement du système conçu. Le circuit lui même peut être programmé par un équipement approprié. Il faut noter que, le programme pilote du GAL16V8A n'est pas disponible sur la version du logiciel ABEL en notre possession. Par conséquent nous avons donc travaillé avec le programme pilote d'un

PAL compatible. Le circuit GAL16V8A diffère du PAL par son option de programmation de polarité au niveau des blocs de sortie. Ainsi nous avons dû modifier adéquatement la description des équations de fonctionnement afin d'obtenir les résultats désirés.

Décodage d'adresses et connecteurs de communication:

Tableau 4
Décodage d'adresses

Lignes d'adresses				Ligne de selection	Boitier
A ₁₅	A ₁₄	A ₁₃	A ₁₂	$\overline{\text{CS}}$	
0	0	0	0	A ₁₅ (80C51FA)	RAM 32 K
0	0	0	1		
0	0	1	0		
0	0	1	1		
0	1	0	0		
0	1	0	1		
0	1	1	0		
0	1	1	1		
1	0	0	0	1Y1(HC139)	RAM à pile 8 K
1	0	0	1		
1	0	1	0		
1	0	1	1		
1	1	0	0	2Y0(HC139)	ADC0820
1	1	0	1	2Y1(HC139)	82C55
1	1	1	0	2Y2(HC139)	82C51
1	1	1	1	2Y3(HC139)	GAL16V8A

Le décodage se fait à partir des quatre dernières lignes d'adresses

(A15, A14, A13, A12) et du circuit HC139 qui contient deux décodeurs, chacun ayant deux entrées et quatre sorties. Les entrées du premier module décodeur sont les lignes d'adresses A15 et A14, et celles du second module sont les lignes A13 et A12. Le second décodeur est sélectionné par la sortie 1Y3 du premier. Soulignons que la sortie !PSEN du microcontrôleur est dédiée pour la lecture de la mémoire de programme, tandis la mémoire de données externes est activée à partir des sorties !RD et !WR de ce dernier.

Le dessin du circuit imprimé a été réalisé à l'aide du logiciel ORCAD_PCBII (Annexe C). Le développement de la carte a nécessité la mise au point de différents programmes de test appropriés à chaque interface.

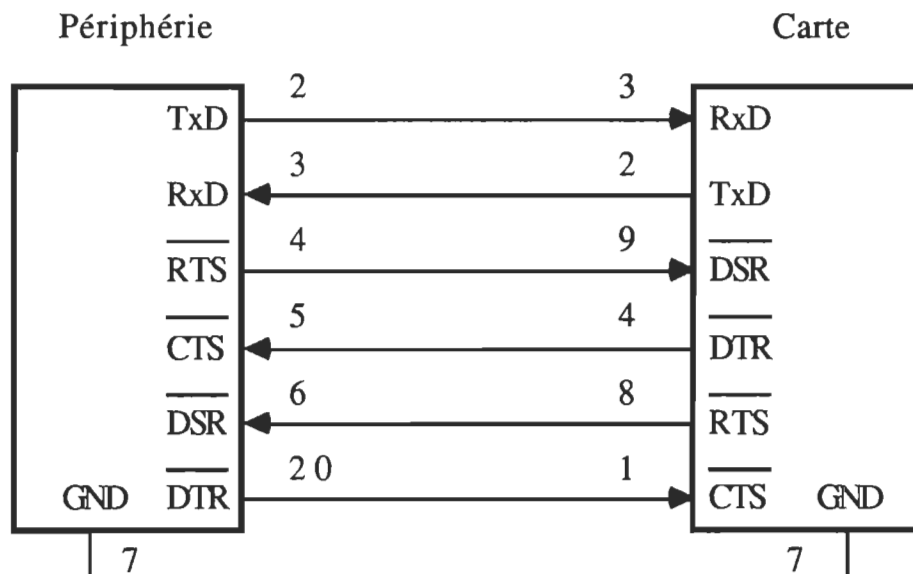


Figure 43. Connexion série entre une périphérie et la carte.

Tableau 5

Détails sur les connecteurs de l'interface de communication

* Connecteur DB 25 de l'interface de communication parallèle

n ⁰	Broche	n ⁰	Broche	n ⁰	Broche
15	PA0	5	PB0	11	PC0
2	PA1	18	PB1	24	PC1
14	PA2	6	PB2	12	PC2
1	PA3	19	PB3	13	PC3
17	PA4	7	PB4	23	PC4
4	PA5	20	PB5	10	PC5
16	PA6	8	PB6	22	PC6
3	PA7	21	PB7	9	PC7
25	GND				

* Connecteur DB 9 de l'interface de communication série

n ⁰	Broche
1	$\overline{\text{CTS}}$
2	TxD
3	RxD
4	$\overline{\text{DTR}}$
8	$\overline{\text{RTS}}$
9	$\overline{\text{DSR}}$
7	GND

*Les broches sont celles des circuits d'interface 82C51 et 82C55.

CHAPITRE 6

ÉTUDE DES BOUCLES DE COMMANDE

Dans ce chapitre nous présenterons l'étude des deux principales boucles de commande (prépositionnement et pincement). Nous exprimerons les différentes fonctions de transfert que nous simplifierons éventuellement. Tous les résultats de simulation (courbes et paramètres) ont été obtenus à partir du logiciel MATLAB; les programmes sont disponibles à l'annexe A.

Boucle de prépositionnement: L'approche que nous allons adopter [11],

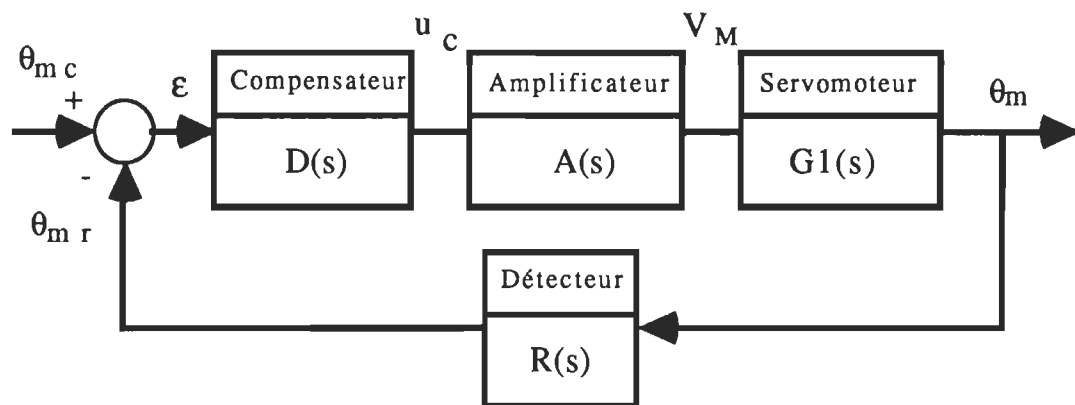


Figure 44. Diagramme structurel du prépositionnement.

combine les deux analyses de système, dans les domaines continu et échantillonné. Dans un premier temps, nous déterminerons le compensateur optimal par une analyse de stabilité dans le domaine continu. Ensuite nous passerons dans le domaine échantillonné en tenant compte du bloqueur d'ordre zéro; puis nous étudierons

l'évolution des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée, en fonction de la période d'échantillonnage T .

Le schéma de commande en verrouillage (Figure 44), combiné avec un profil de vitesse, permet de faire fonctionner le servomoteur comme un moteur pas à pas; c'est donc cette forme de commande que nous adopterons. Les principales exigences pour cette boucle sont les suivantes: une marge de phase supérieure à la limite pratique de 35° en continu, un amortissement inférieur ou égal à l'amortissement critique de 0,707 dans le domaine échantillonné. Le temps de réponse en continu doit être inférieur à 10 ms, soit une fréquence de coupure supérieure à 100 rad/s.

Détermination des fonctions de transfert: Nous les présenterons dans l'ordre suivant: d'abord le système à commander (le servomoteur), ensuite l'organe de commande (l'amplificateur), suivi du détecteur de position. Quant au bloc compensateur, il interviendra en dernier lieu pour garantir la stabilité et améliorer les performances du système bouclé.

Bloc servomoteur: Nous la présenterons sous deux formes, rigoureuse et simplifiée. Rappelons les deux équations classiques de fonctionnement d'un moteur à courant continu (équations électrique et mécanique):

$$(6,1) \quad R_a \cdot i_a + L_a \cdot di_a/dt + K_e \cdot \omega_m = V_M$$

$$(6,2) \quad T_g = K_t \cdot i_a = J \cdot d\omega_m/dt + D \cdot \omega_m + T_L + T_f$$

$$(6,3) \text{ Avec: } \omega_m = d\theta_m/dt$$

$$\begin{aligned}\text{Et} \quad J &= J_m + J_L \\ D &= D_m + D_L\end{aligned}$$

Il est à noter que le couple de charge T_L intervient dans la commande de prépositionnement comme une perturbation. Ainsi, pour le calcul de la fonction de transfert nous allons poser que: $T_L = 0$ et $T_f = 0$. Reprenons les expressions (6,1), (6,2), (6,3) dans le domaine de Laplace; on a:

$$(6,4) \quad (L_a \cdot s + R_a) \cdot I_a(s) + K_e \cdot \Omega(s) = V_M(s)$$

$$(6,5) \quad (J \cdot s + D) \Omega_m(s) = K_t \cdot I_a(s)$$

$$(6,6) \quad \Omega_m(s) = s \cdot \Theta_m(s)$$

À partir de (6,6) et (6,5) on détermine les variables $I_a(s)$ et $\Omega_m(s)$ en fonction de $\Theta_m(s)$. En remplaçant $I_a(s)$ et $\Omega_m(s)$ dans (6,4), on obtient la fonction de transfert classique $G1(s) = \Theta_m(s) / V_M(s)$.

$$G1(s) = K_t / [s \cdot [L_a \cdot J \cdot s^2 + (R_a \cdot J + L_a \cdot D) \cdot s + K_t \cdot K_e + R_a \cdot D]]$$

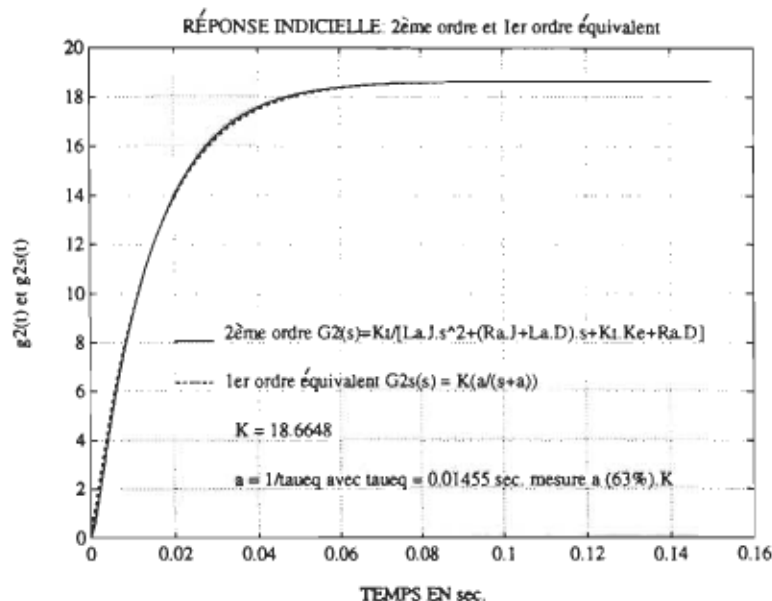


Figure 45. Courbes pour la simplification du modèle.

Dans le but de simplifier le modèle, nous avons évalué la réponse indicielle de $G2(s) = K_t / [L_a \cdot J \cdot s^2 + (R_a \cdot J + L_a \cdot D) \cdot s + K_t \cdot K_c + R_a \cdot D]$, (Figure 45), extrait de $G1(s)$. On remarque donc que l'allure de $g2(t)$ peut être assimilée à celle d'une fonction du 1^{er} ordre. D'où la forme simplifiée $G2s(s)$ de $G2(s)$: $G2s(s) = K \cdot a / (s + a)$.

Ainsi, la forme simplifiée $G1s(s)$ de $G1(s)$ est donnée par:

$$(6,7) \quad G1s(s) = K \cdot a / [s \cdot (s + a)]$$

Ce modèle simplifié servira dans tous les calculs postérieurs.

Bloc amplificateur: Afin de modéliser ce bloc, nous allons analyser brièvement le mode PWM du microcontrôleur, ainsi que la configuration des circuits de l'interface de puissance.

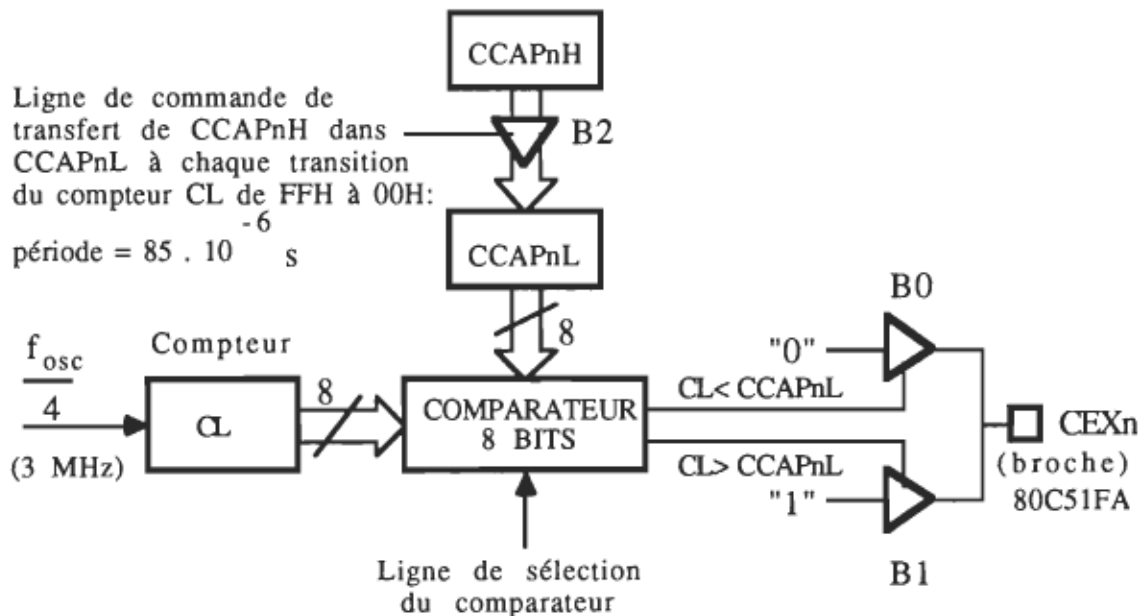


Figure 46. Mode PWM du microcontrôleur (adapté du catalogue de fabricant).

Ce mode de fonctionnement utilise essentiellement, un comparateur 8 bits, un compteur 8 bits (CL) et deux registres de commande 8 bits (CCAPnL, CCAPnH); n étant le numéro du module ($n = 0, 1, 2, 3, 4$). Le comparateur dispose de deux sorties, à activation exclusive, connectées aux deux tampons de sortie, B0 et B1. Ainsi la sortie de commande CEXn basculent entre les états "0" et "1" suivant le résultat de la comparaison du registre CCAPnL au contenu du compteur CL. À chaque transition du compteur CL de 255 à 0, le contenu du registre CCAPnH est transféré dans CCAPnL. Ce dernier spécifie la valeur complémentaire du rapport cyclique (Figures 46 et 47).

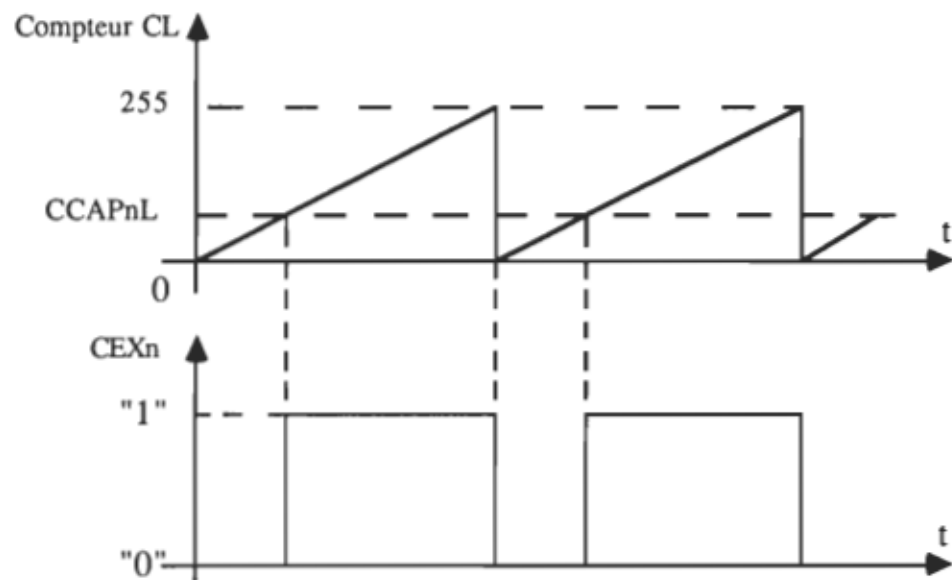


Figure 47. Formes d'ondes du mode PWM du microcontrôleur.

Au niveau de l'interface de puissance, chaque module de commande est composé essentiellement d'un pont H avec des interrupteurs bidirectionnels en courant (Figure 48), commandés par paire (T_1, T_4) et

(T_2, T_3). Par conséquent la tension moyenne qui apparaît aux bornes du servomoteur est exprimée par la relation suivante.

$$V_M = (V_{cc}/256) \cdot (256 - CCAPnL), \text{ telle que:}$$

$$CCAPnL = 0, \text{ ----> } V_M = V_{cc} \text{ (rapport cyclique maximal);}$$

$$CCAPnL = 255, \text{ ----> } V_M = 0,4\% \cdot V_{cc} \text{ (rapport cyclique nul).}$$

Posons:

$$u_c = 256 - CCAPnL$$

Alors: $V_M = (V_{cc}/256) \cdot u_c$

La variable de commande u_c spécifie la valeur du rapport cyclique.

Par conséquent la fonction de transfert du bloc amplificateur s'exprime en première approximation par:

$$(6,8) \quad A(s) = V_M/u_c = K_a,$$

Avec: $K_a = V_{cc}/256$

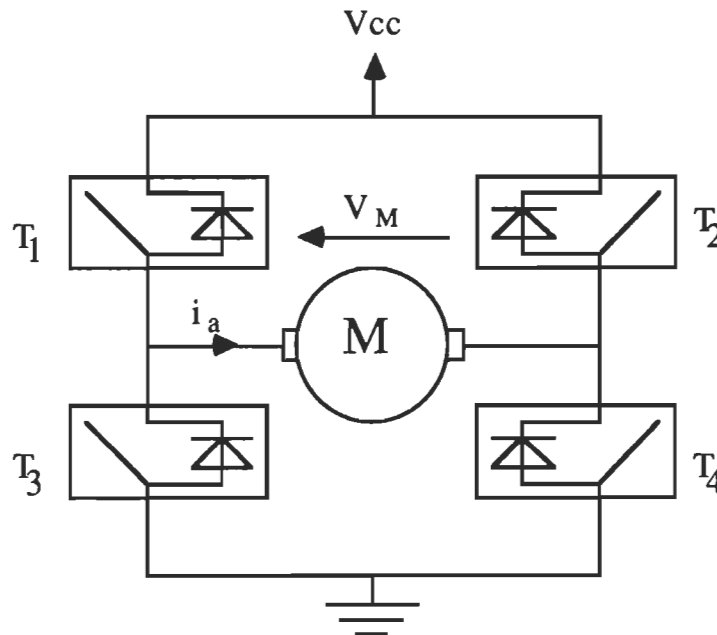


Figure 48. Module de commande de l'interface de puissance.

En analysant de plus près le mode de commande PWM du microcontrôleur, on remarque qu'il peut y avoir un délai pur entre le moment où la nouvelle commande a été portée dans CCAPnH, et le moment où cette nouvelle commande apparaît sur la broche de sortie CEXn. Ceci est lié au fait que le contenu de CCAPnH n'est transféré dans CCAPnL qu'à chaque transition du compteur CL de 255 à 0. La limite inférieure pratique de ce délai peut être considérée nulle. Quant à la limite supérieure, elle est égale à 255 fois la période de fonctionnement du compteur CL; soit:

$$T_{a\max} = 255 \cdot [1/(3 \cdot 10^6)] = 85 \mu s$$

D'où la forme rectifiée de la fonction de transfert $A(s)$ de l'amplificateur.

$$A(s) = K_a \cdot e^{-sT_a}$$

On décomposant le terme e^{-sT_a} en série de Taylor, et en négligeant tous les termes d'ordre supérieur ou égal à deux on obtient:

$$e^{-sT_a} = 1/e^{sT_a} = 1/(1 + s \cdot T_a)$$

Pratiquement, on vient de remplacer un petit retard pur par une petite constante de temps. Ainsi la forme finale de la fonction de transfert $A(s)$ du bloc amplificateur est:

$$(6,9) \quad A(s) = K_a/(1 + s \cdot T_a)$$

Bloc détecteur: Ce bloc devrait assurer la compatibilité d'unité entre la consigne θ_{mc} et le signal de retour θ_{mr} . D'après le tableau 3 la consigne est donnée en nombre d'impulsions et par conséquent on a:

$$R(s) = K_c = \text{Résolution}/(2 \cdot \pi)$$

Avec: Résolution = nombre d'impulsions par rotation = 60; soit:

$$(6,10) \quad R(s) = 30/\pi$$

Bloc compensateur: Le résultat que nous allons donner est anticipé car la configuration de ce bloc a été optimisée compte tenu de la réponse en boucle ouverte des blocs précédents, et des critères de stabilité.

$$D(s) = K_{pid} \cdot [(s + b)/(s + c)]$$

Ce bloc compensateur est du type PID, et permet, entre autres, une correction locale de la phase. Nous verrons au prochain paragraphe que cette structure est celle qui s'adapte au mieux à notre système.

Étude de la stabilité dans le domaine continu: Reprenons le schéma fonctionnel de la boucle de prépositionnement avec les fonctions de transfert calculées.

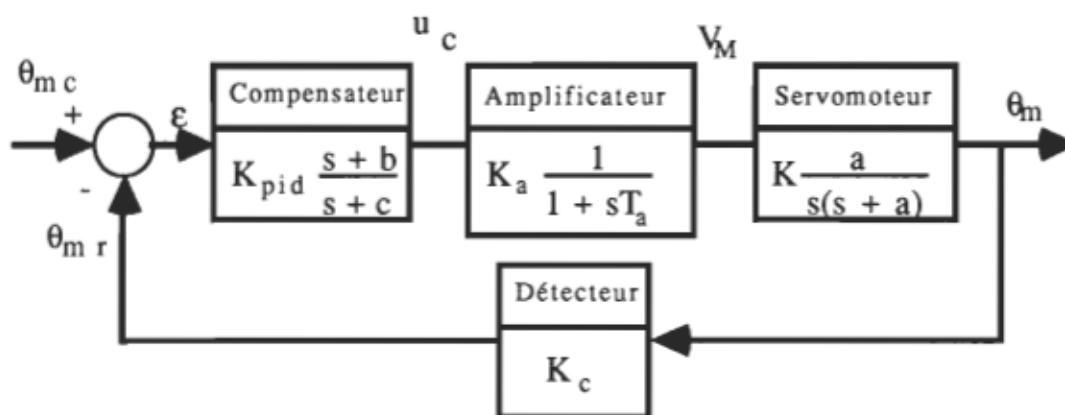


Figure 49. Diagramme structurel détaillé pour le prépositionnement.

Désignons par $G_{BO1}(s)$, la fonction de transfert en boucle ouverte sans compensateur:

$$G_{BO1}(s) = (K \cdot K_a \cdot K_c \cdot a) / [s \cdot (1 + s \cdot T_a) \cdot (s + a)]$$

Les courbes de Bode de cette fonction de transfert sont montrées sur la figure 50, pour les deux valeurs extrêmes du retard T_a , soient 0 et 85 μ s. On remarque donc que la boucle est stable sans compensateur avec une marge de phase d'environ 77°; mais, la fréquence de coupure en boucle fermée ω_0 est faible (Figure 51). D'où la nécessité d'une compensation. Nous avons donc procédé de la façon suivante: dans un premier temps, nous avons optimisé le gain K_{pid} du compensateur afin que la fréquence de coupure vérifie nos exigences (Figure 52). Sur les courbes de Bode, on remarque que la marge de phase est, dans ce cas ci, environ 20°, donc inférieur à la limite pratique de 35°. En se basant sur les courbes de la figure 52, nous avons optimisé la correction locale de la phase sans altérer le gain K_{pid} . D'où le choix de la structure du compensateur. On positionne les paramètres b et c comme suit: $b = 200$ rad/s et $c = 400$ rad/s. Les courbes de bode compensées en boucle ouverte et fermée sont respectivement présentées sur les figures 53 et 54. Ainsi la nouvelle marge de phase est d'environ 43°; ce qui vérifie nos exigences. La fonction de transfert en boucle ouverte avec compensateur est donnée par:

$$G_{BO2}(s) = [K \cdot K_a \cdot K_c \cdot K_{pid} \cdot a \cdot (s + b)] / [s \cdot (1 + s \cdot T_a) \cdot (s + a) \cdot (s + c)]$$

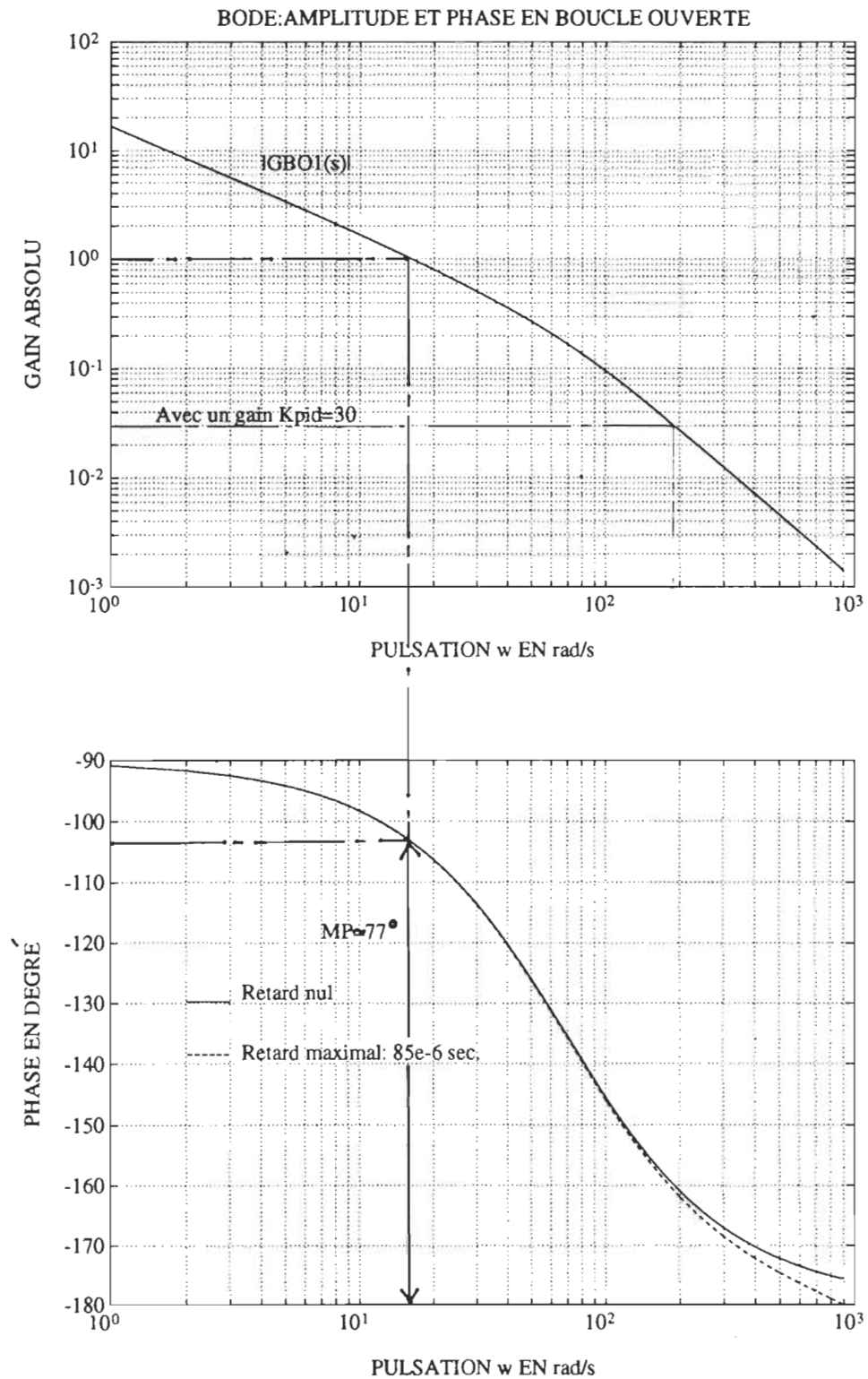


Figure 50. Boucle ouverte sans compensateur (prépositionnement).

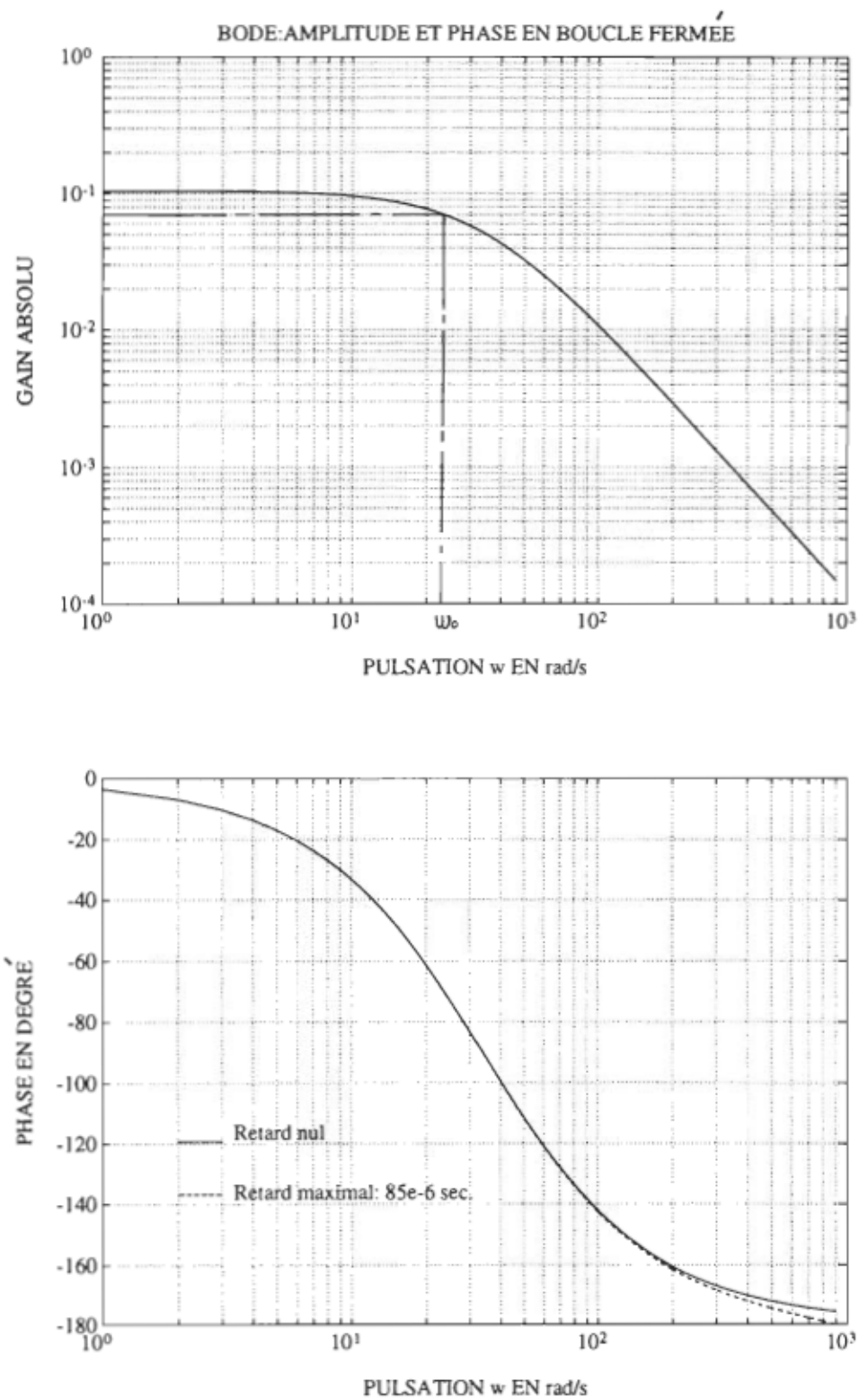


Figure 51. Boucle fermée sans compensateur (prépositionnement).

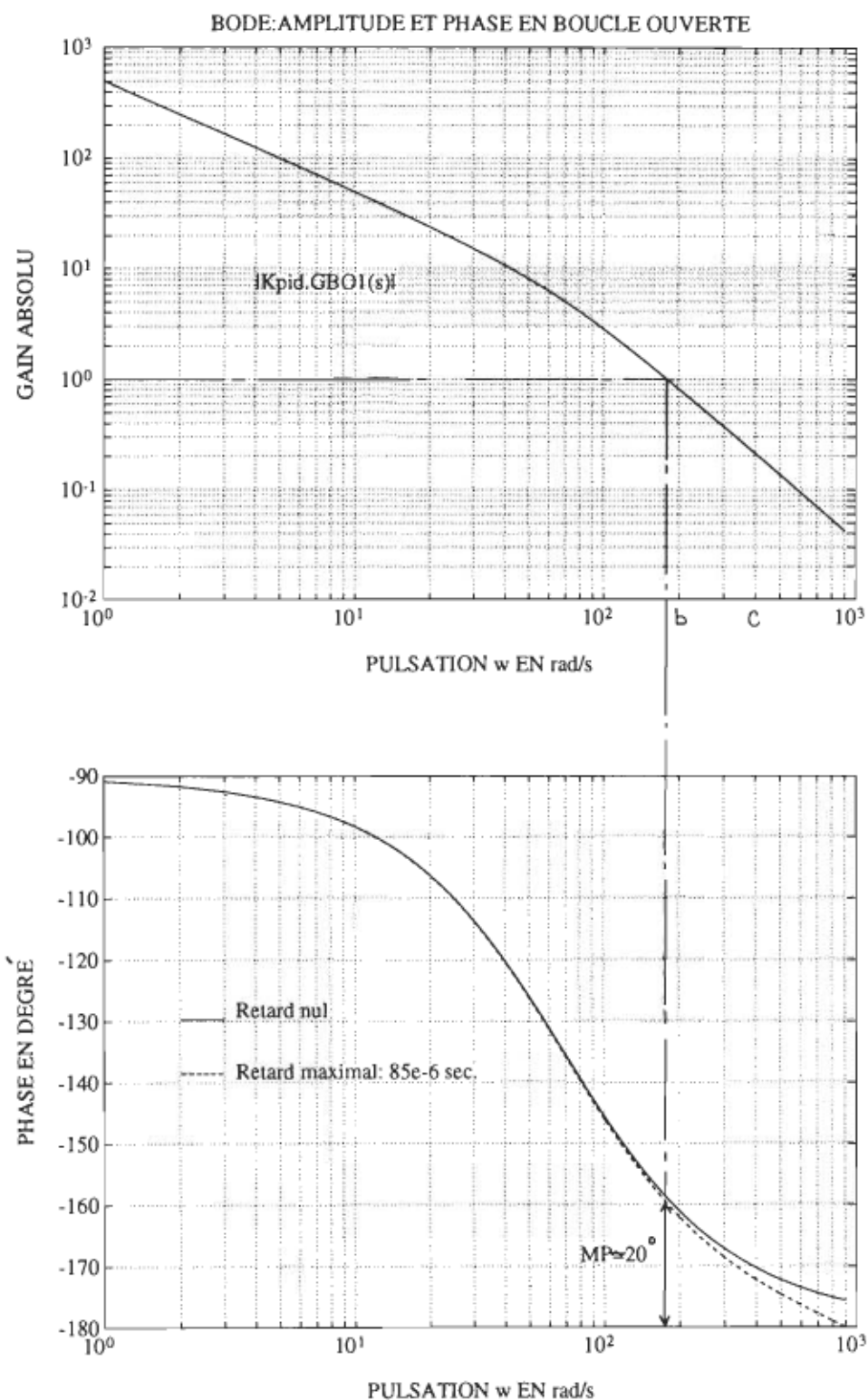


Figure 52. Boucle ouverte avec gain $K_{pid} = 30$ (prépositionnement).

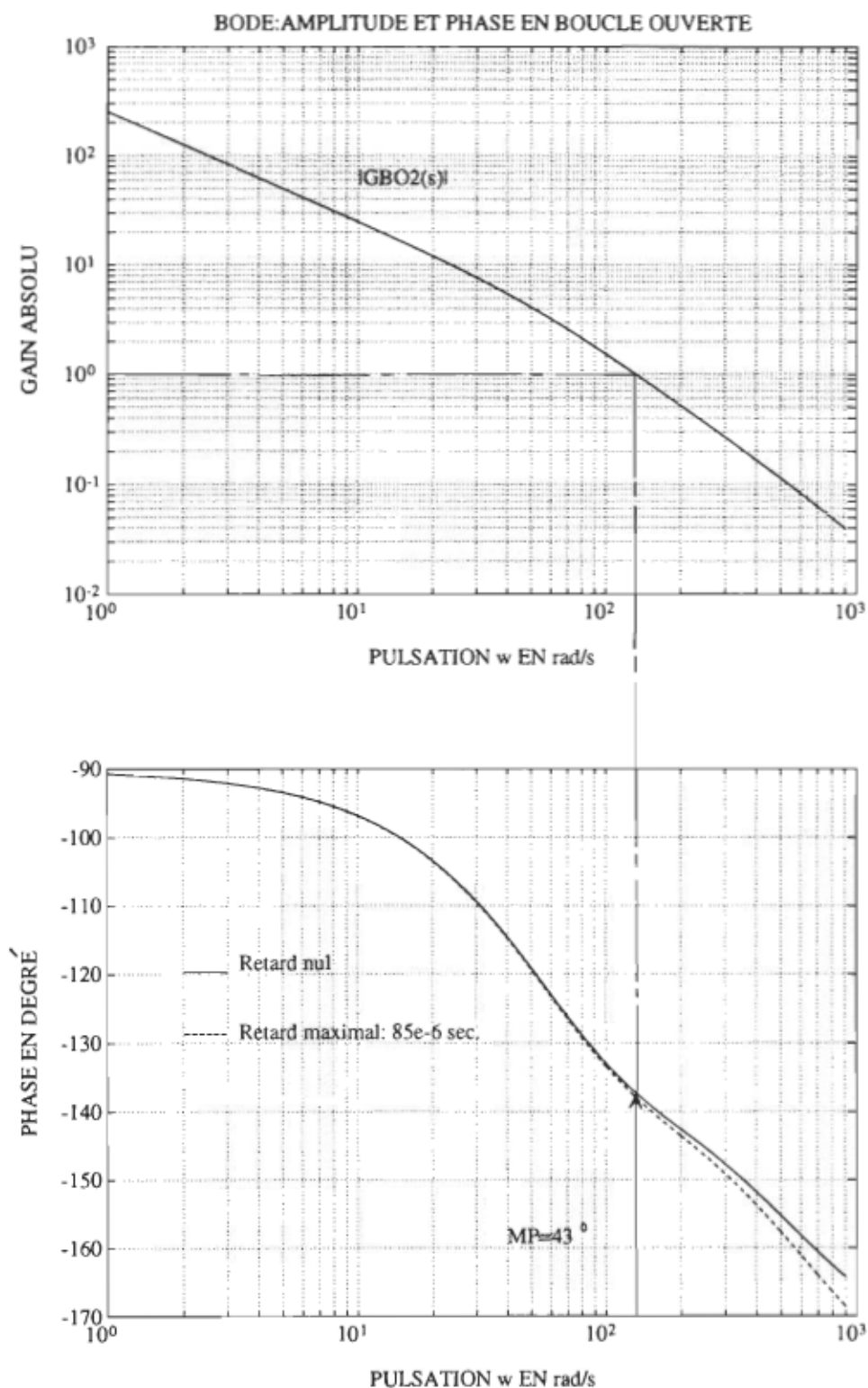


Figure 53. Boucle ouverte avec compensateur (prépositionnement).

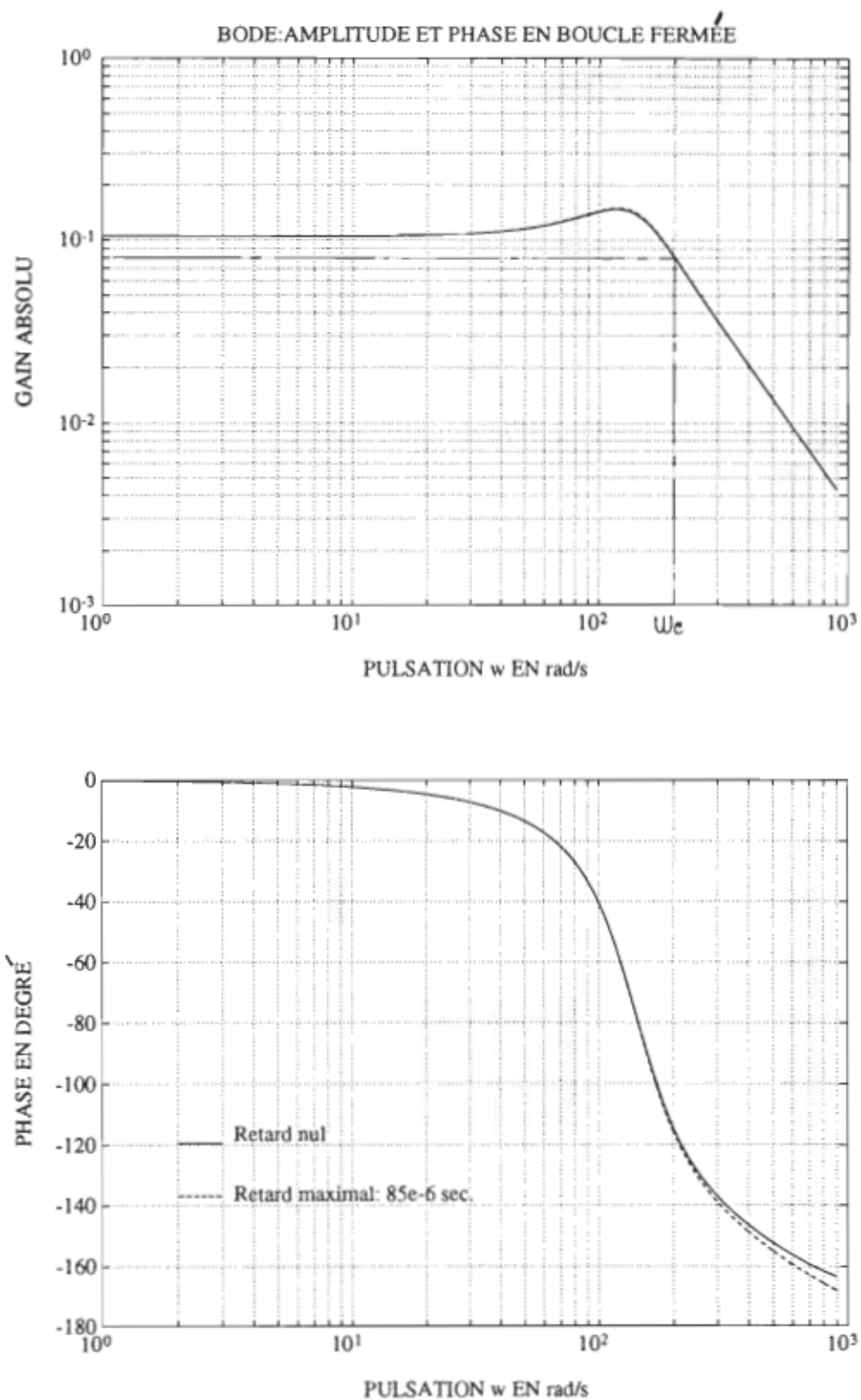


Figure 54. Boucle fermée avec compensateur (prépositionnement).

Étude de la stabilité dans le domaine échantillonné: Comme nous venons de le voir, la boucle de prépositionnement a été stabilisée en continu sans tenir compte de l'influence du bloqueur d'ordre zéro. La fréquence de coupure obtenu est $\omega_c = 200 \text{ rad/s}$. À présent, nous allons transformer le système dans le domaine échantillonné en tenant compte du bloqueur et aussi de la période d'échantillonnage T . En pratique, la fréquence d'échantillonnage doit être supérieure ou égale à $2f_c = \omega_c/\pi$. Pour ce faire, nous allons considérer le schéma de la figure 55.

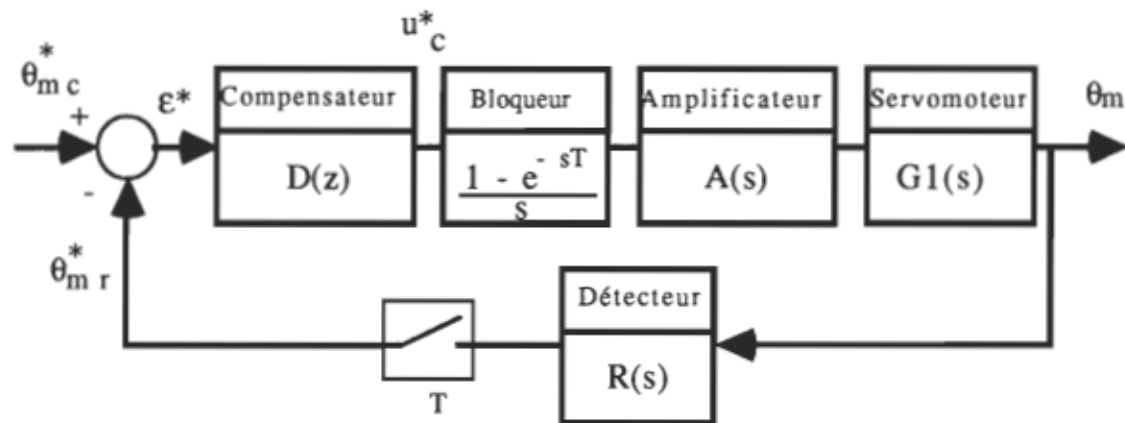


Figure 55. Diagramme structurel dans le domaine échantillonné. (prépositionnement).

Calculons les transformées en z des différentes fonctions de transfert. Pour cela, posons: $G_{BO3}(s) = [(1 - e^{-sT})/s] \cdot G_{BO1}(s)$ et négligeons l'influence de la petite constante de temps T_a ; on a alors:

$$G_{BO3}(s) = [(1 - e^{-sT})/s] \cdot \{K \cdot K_a \cdot K_c \cdot a/[s \cdot (s + a)]\}$$

En posant $K_3 = K \cdot K_a \cdot K_c$, on a:

$$G_{BO3}(z) = K_3 \cdot (1 - z^{-1}) \cdot Z \left\{ a/[s^2 \cdot (s + a)] \right\}$$

Par les tables de transformation [11] on obtient facilement:

$$(6,11) \quad G_{BO3}(z) = K_3 \cdot (1-z^{-1}) \cdot [z \cdot (C_1 \cdot z + C_0) / [a \cdot (z-1)^2 (z-e^{-aT})]]$$

$$\text{Avec: } C_0 = a \cdot T - 1 + e^{-aT} \quad \text{et} \quad C_1 = 1 - e^{-aT} - a \cdot T \cdot e^{-aT}$$

En remarquant que $(1 - z^{-1}) \cdot z = z - 1$, l'expression (6,11) devient:

$$G_{BO3}(z) = K_3 \cdot (z - 1) \cdot [(C_1 \cdot z + C_0) / [a \cdot (z - 1)^2 (z - e^{-aT})]]$$

En simplifiant par $(z - 1)$, on obtient:

$$G_{BO3}(z) = K_3 \cdot [(C_1 \cdot z + C_0) / [a \cdot (z - 1) \cdot (z - e^{-aT})]]$$

Posons $z_3 = e^{-aT}$; alors on a finalement:

$$G_{BO3}(z) = K_3 \cdot [(C_1 \cdot z + C_0) / [a \cdot (z - 1) \cdot (z - z_3)]]$$

Calculons ensuite l'expression $D(z) = \mathbf{Z} \{ D(s) \}$. Nous utiliserons la méthode "MPZ" qui signifie en anglais "Matched Pole-Zero" [11]. Cette méthode comporte trois phases essentielles qui sont les suivantes:

- transformer les pôles et zéros en considérant que: $z = e^{sT}$;
- additionner le terme $(1 + z^{-1})^n$ de multiplicité n correspondant, lorsque le degré du numérateur est inférieur au degré du dénominateur;
- faire correspondre le gain en continu (fréquence nulle).

Rappelons que $D(s) = K_{pid} \cdot [(s + b)/(s + c)]$. La première étape permet d'écrire:

$$\begin{array}{ll} \text{zéro:} & s_1 = -b \quad \text{----->} \quad z_1 = e^{-bT} \\ \text{pôle:} & s_2 = -c \quad \text{----->} \quad z_2 = e^{-cT} \end{array}$$

Dans notre cas, l'ordre du numérateur est égal à celui du dénominateur; par conséquent la deuxième phase ne sera pas prise en considération. Ainsi, on a:

$$D(z) = K_{dz} \cdot (z - z_1) / (z - z_2)$$

La troisième étape permet d'écrire que: $D(s) = D(z)$ pour $s = 0$ et $z = 1$.

D'où,
$$K_{pid} \cdot (b / c) = K_{dz} \cdot [(1 - z_1) / (1 - z_2)]$$

Ou:
$$K_{dz} = K_{pid} \cdot \{[b \cdot (1 - z_2)] / [c \cdot (1 - z_1)]\}$$

Ainsi l'expression de $D(z)$ est complètement déterminée. Exprimons dès lors la fonction de transfert en boucle ouverte:

$$G_{BO4}(z) = D(z) \cdot G_{BO3}(z)$$

L'équation caractéristique de la fonction de transfert en boucle fermée s'exprime par:

$$(6,12) \quad 1 + G_{BO4}(z) = 0$$

Le système échantillonné bouclé sera stable si tous les zéros de (6,12), qui sont en même temps les pôles de la fonction de transfert du système bouclé, sont situés dans le cercle de rayon unité. Développons (6,12):

$$1 + [K_{dz} \cdot K_3 \cdot [(z-z_1) \cdot (C_1 \cdot z + C_0)] / [a \cdot (z-1) \cdot (z-z_2) \cdot (z-z_3)]] = 0$$

Ou:
$$[a \cdot (z - 1) \cdot (z - z_2) \cdot (z - z_3)] + [K_{dz} \cdot K_3 \cdot [(z - z_1) \cdot (C_1 \cdot z + C_0)]] = 0$$

Posons: $K_{bo} = K_{dz} \cdot K_3$; après développement et rangement on obtient:

$$(6,13) \quad A_3 \cdot z^3 + A_2 \cdot z^2 + A_1 \cdot z + A_0 = 0$$

Avec: $A_3 = a$

$$A_2 = a \cdot (-1 - z_2 - z_3) + C_1 \cdot K_{bo}$$

$$A_1 = a \cdot [z_3 \cdot (1 + z_2) + z_2] + K_{bo} \cdot (-C_1 \cdot z_1 + C_0)$$

$$A_0 = -K_{bo} \cdot C_0 \cdot z_1 - a \cdot z_2 \cdot z_3$$

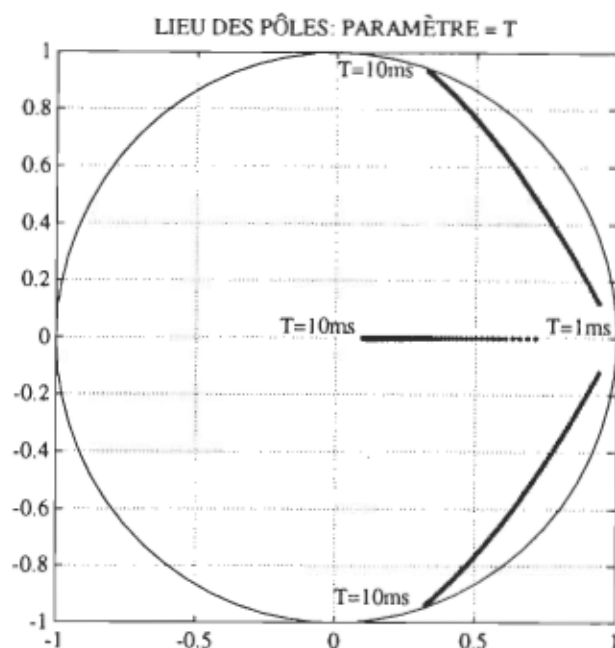


Figure 56. Pôles du système échantillonné bouclé (prépositionnement).

L'évolution des zéros de (6,13) en fonction de la période d'échantillonnage T est montrée sur la figure 56. Afin d'obtenir ces courbes, nous avons fait varier la fréquence d'échantillonnage entre les valeurs pratiques de $3f_c$ et $30f_c$, équivalent à une période de 1 ms à 10 ms.

Nous avons retenu la solution qui procure un amortissement inférieur à l'amortissement critique de 0,707. Cette solution correspond à la période d'échantillonnage de 5 ms. Dans ce cas, les pôles du système échantillonné bouclé sont les suivants:

$$Z_{p1} = 0,6697 + j 0,5536$$

$$Z_{p2} = 0,6697 - j 0,5536$$

$$Z_{p3} = 0,2417$$

Comme on peut le constater, les pôles complexes conjugués Z_{p1} et Z_{p2} ont une partie réelle inférieure à 0,707.

Loi de commande et profil de vitesse: La détermination de la période d'échantillonnage complète l'identification de la fonction de transfert du compensateur dans le domaine échantillonné. On écrit donc que:

$$D(z) = u_c^*(t)/\varepsilon^*(t) = K_{dz} \cdot (z-z_1)/(z-z_2) = K_{dz} \cdot (1-z_1 \cdot z^{-1})/(1-z_2 \cdot z^{-1})$$

$$\text{Ce qui donne: } u_c^*(t) \cdot (1 - z_2 \cdot z^{-1}) = \varepsilon^*(t) \cdot K_{dz} \cdot (1 - z_1 \cdot z^{-1})$$

Considérant que: $z^{-1} u_c^*(t) = u_c^*(t-1)$ et $z^{-1} \cdot \varepsilon^*(t) = \varepsilon^*(t-1)$, on a:

$$u_c^*(t) = K_{dz} \cdot \varepsilon^*(t) - z_1 \cdot K_{dz} \cdot \varepsilon^*(t-1) + z_2 \cdot u_c^*(t-1)$$

Après calcul, on obtient la loi de commande suivante:

$$(6,14) \quad u_c^*(t) = 20,5182 \cdot \varepsilon^*(t) - 7,5482 \cdot \varepsilon^*(t-1) + 0,1353 \cdot u_c^*(t-1)$$

Pour fin de programmation, nous avons simplifié l'expression (6,14) par arrondissement; ce qui nous amène à l'expression finale de la loi de commande.

$$u_c^*(t) = 21 \cdot \varepsilon^*(t) - 8 \cdot \varepsilon^*(t-1) + (1/7) \cdot u_c^*(t-1)$$

Nous avons combiné à cette loi de commande, un profil de vitesse afin de minimiser les problèmes de dépassement. Ce profil comporte trois phase dont (Figure 57):

- une phase d'accélération;
- une phase à vitesse constante;
- une phase de décélération.

Nous rappelons que la commande en verrouillage d'un servomoteur, combiné avec un profil de vitesse s'apparente à la commande d'un moteur pas à pas. Dans le cas d'un moteur pas à pas, la vitesse est fonction de la fréquence de commande. Nous allons, dans notre cas, simuler la fréquence variable par un délai variable entre chaque incrémentation de la consigne. Pendant la phase d'accélération ce délai variable sera en décroissance, alors que pendant la phase de décélération, il sera en croissance. Pendant la phase à vitesse constante, le délai sera constant. Des détails supplémentaires seront fournis au chapitre suivant.

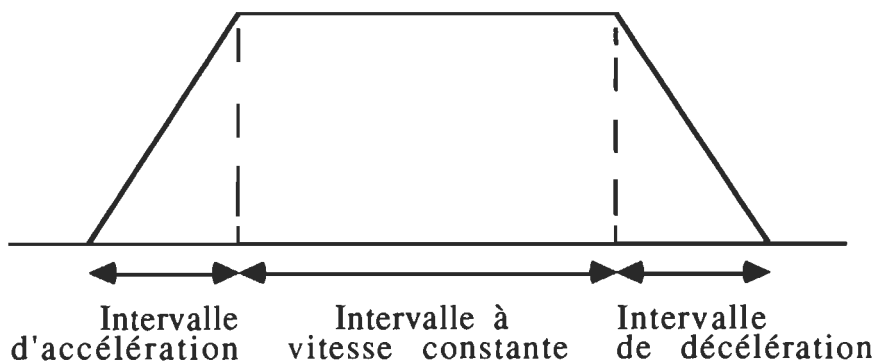


Figure 57. Profil de vitesse trapézoïdal symétrique.

Boucle de pincement: L'approche de conception sera la même que pour la boucle de prépositionnement.

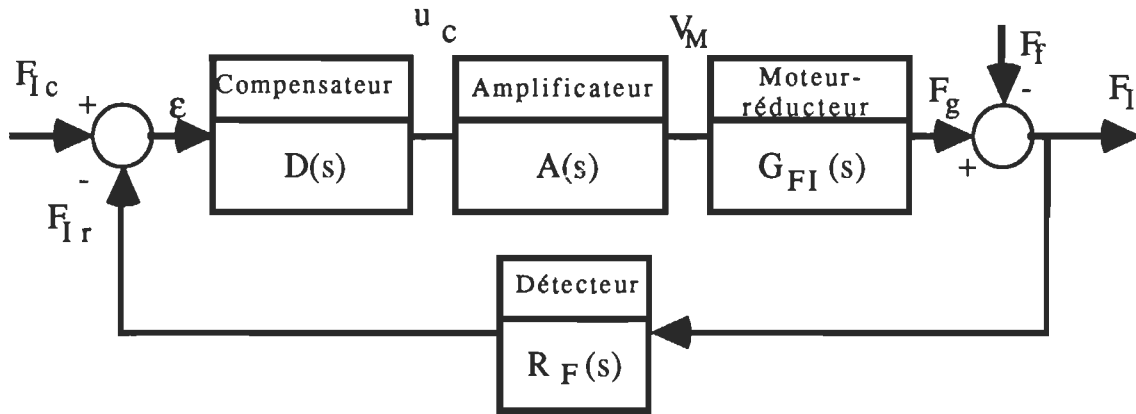


Figure 58. Diagramme structurel de la commande de pincement.

Détermination des fonctions de transfert: Nous suivrons la même ordre que précédemment.

Bloc moteur-réducteur: Reprenons les équations classiques d'un moteur à courant continu (6,1) et (6,2), puis considérons la situation pratique d'application de force à rotor bloqué où $\omega_m = 0$. On a alors:

$$(6,15) \quad R_a \cdot i_a + L_a \cdot di_a/dt = V_M$$

$$(6,16) \quad T_g = K_t \cdot i_a = T_L + T_f$$

La transformée de Laplace de (6,15) donne:

$$I_a(s) = V_M / (R_a + s \cdot L_a)$$

En remplaçant $I_a(s)$ dans la transformée de Laplace de (6,16) on obtient:

$$T_g(s) = T_L(s) + T_f = K_t \cdot V_M / (R_a + s \cdot L_a)$$

Introduisons le rapport de réduction N et le rendement $r\%$ du réducteur ainsi que le rayon r_p de la poulie de traction fixée sur le moteur de pincement; l'expression de $T_g(s)$ donne:

$$F_g(s) = [N \cdot r\% \cdot (T_L(s) + T_f)]/r_p$$

Remarquons que la composante T_L du couple produit la force effective F_I tandis que T_f engendre F_f considérée comme une perte par friction. D'où:

$$F_g(s) = F_I(s) + F_f = [(N \cdot r\% \cdot K_t \cdot V_M)/(L_a \cdot r_p)]/(s + R_a/L_a)$$

En posant $F_f = 0$, on déduit la fonction de transfert $G_{FI}(s) = F_I(s)/V_M$, soit:

$$(6,17) \quad G_{FI}(s) = K_{GFI}/(s + a_5)$$

$$\text{avec} \quad K_{GFI} = (N \cdot r\% \cdot K_t)/(L_a \cdot r_p), \text{ et } a_5 = R_a/L_a$$

Bloc amplificateur: Sa fonction de transfert a été déterminée au paragraphe précédent; on rappelle:

$$A(s) = K_a/(1 + s \cdot T_a)$$

Bloc détecteur: L'expression de la tension V_O à la sortie de l'amplificateur différentiel a été établie et on rappelle que:

$$V_O = A_d \cdot K_{FI} \cdot F_I$$

Par conséquent la fonction de transfert $R_F(s) = V_O/F_I$ est donnée par:

$$R_F(s) = A_d \cdot K_{FI}$$

Nous verrons à la section suivante que le bloc compensateur n'est pas nécessaire car le système non compensé, en plus d'être stable, a une pulsation de coupure d'environ 2450 rad/s, soit un temps de réponse de 0,408 ms.

Étude de la stabilité dans le domaine continu: Considérons le diagramme de la figure ci-dessous.

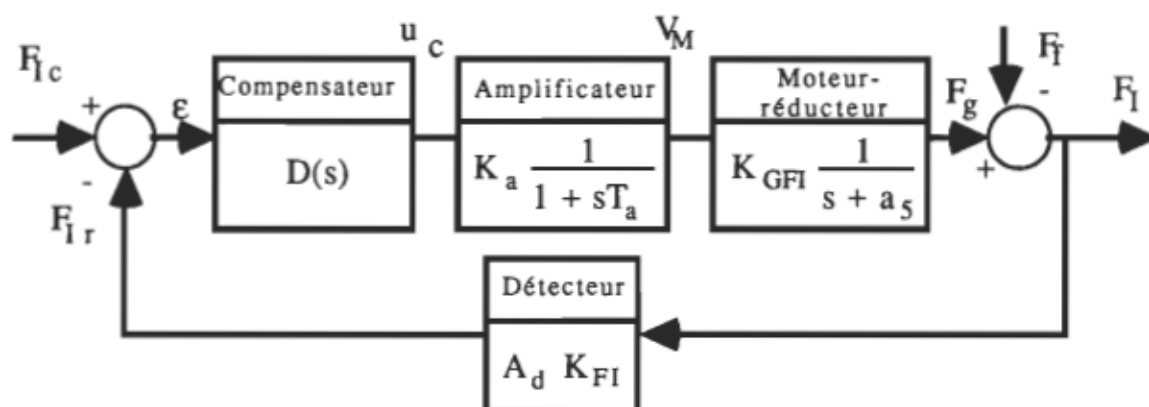


Figure 59. Diagramme structurel détaillé pour le pincement.

Soit $G_{BO5}(s)$, la fonction de transfert en boucle ouverte sans compensateur:

$$G_{BO5}(s) = K_{GFI} \cdot K_a \cdot A_d \cdot K_{FI} / [(1 + s \cdot T_a) \cdot (s + a_5)]$$

Les courbes de Bode en boucle ouverte sont présentées à la figure 60. On remarque facilement que le gain est toujours inférieur à l'unité. Par conséquent la situation d'instabilité, gain = 1 et phase = 180° , est irréalisable. L'allure des courbes de Bode en boucle fermée est montrée à la figure 61. La pulsation de coupure, mesurée à 3 dB est

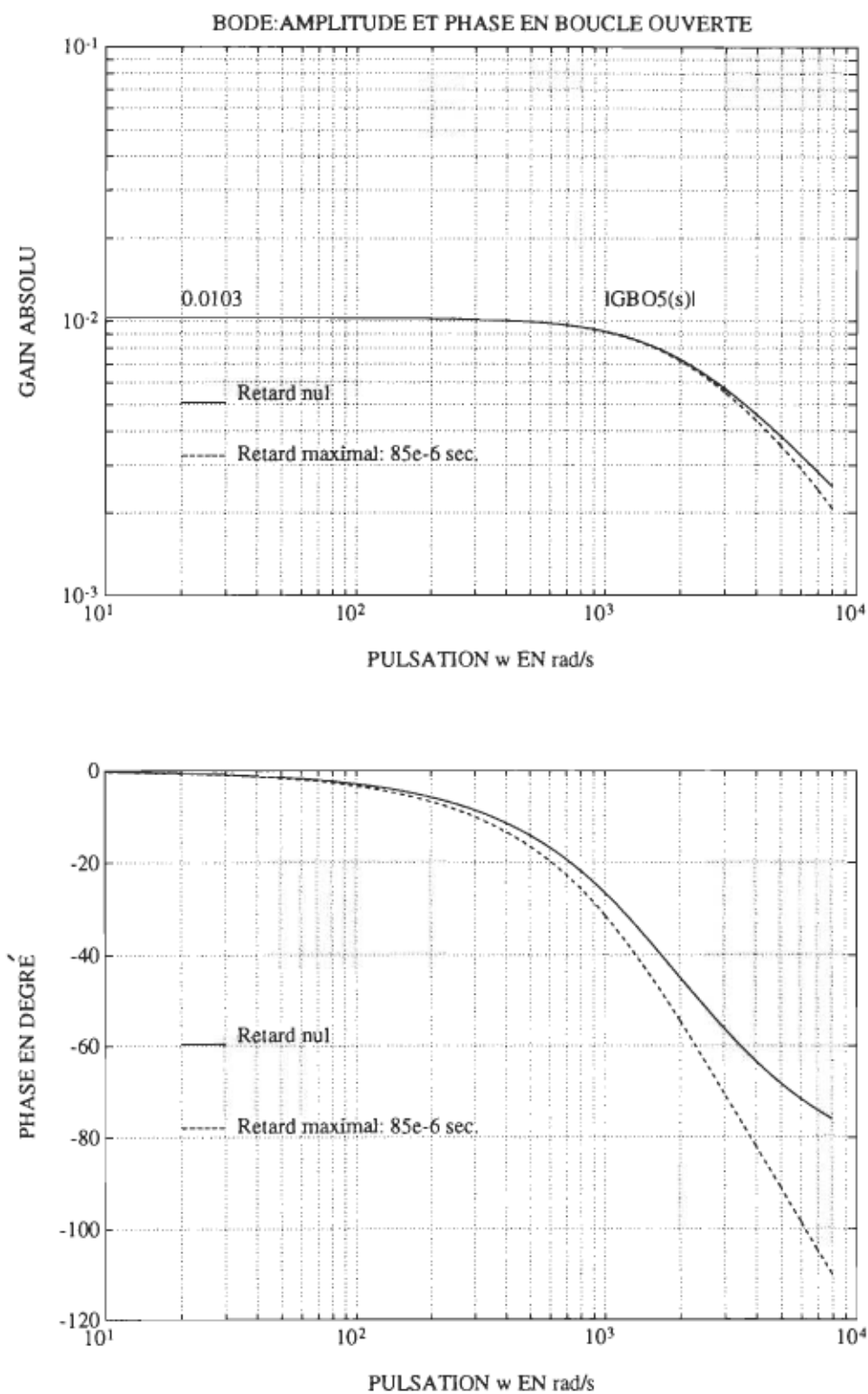


Figure 60. Boucle ouverte sans compensateur (pincement).

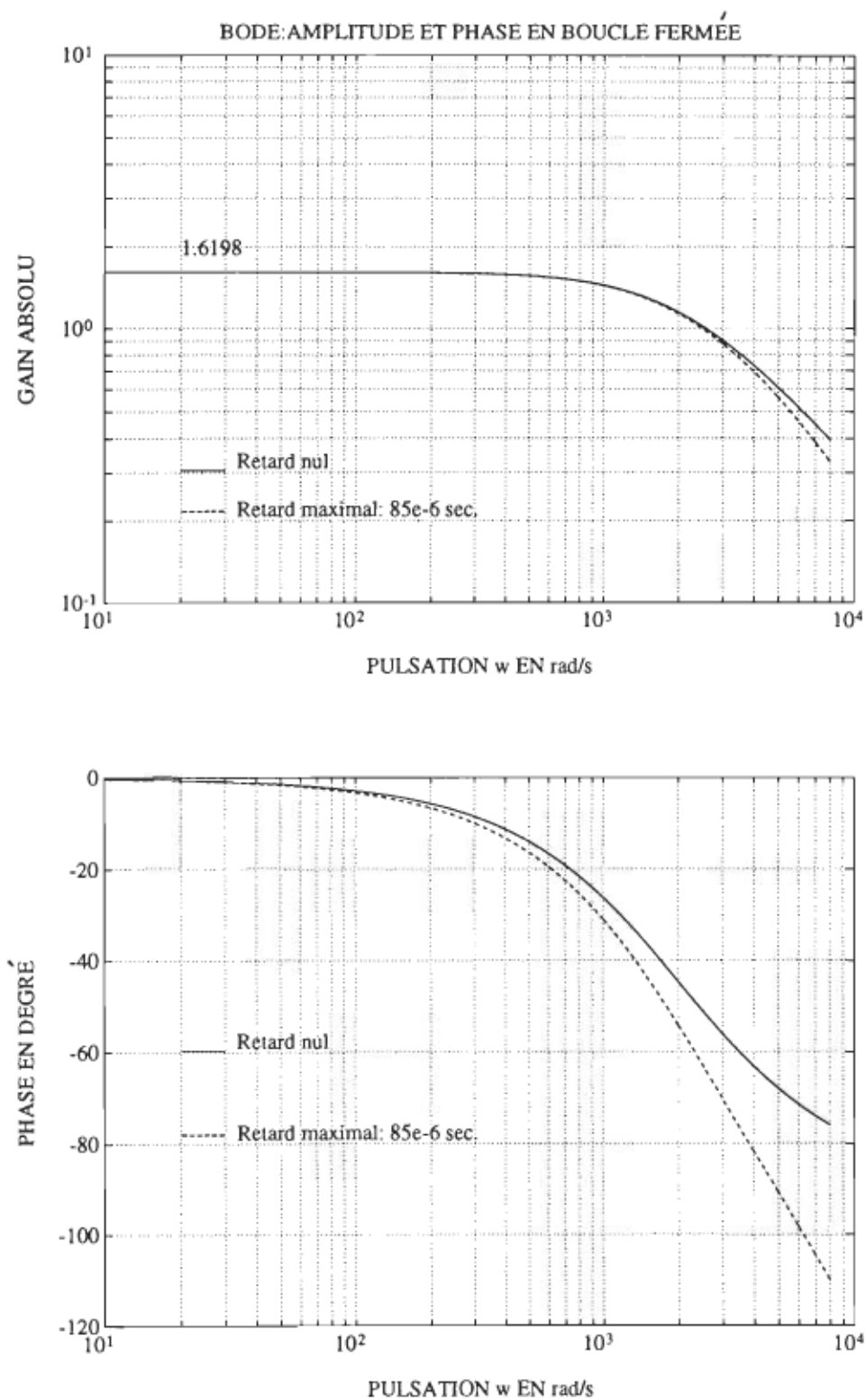


Figure 61. Boucle fermée sans compensateur (pincement).

de 2450 rad/s, soit une fréquence de coupure de 390 Hz. De là on conclue qu'une compensation n'est plus nécessaire en continu étant donné que, non seulement la boucle est stable mais aussi, le temps de réponse est déjà appréciable.

Étude de la stabilité dans le domaine échantillonné: Considérons un bouclage sans compensateur, mais tenant compte du bloqueur d'ordre zéro (Figure 62).

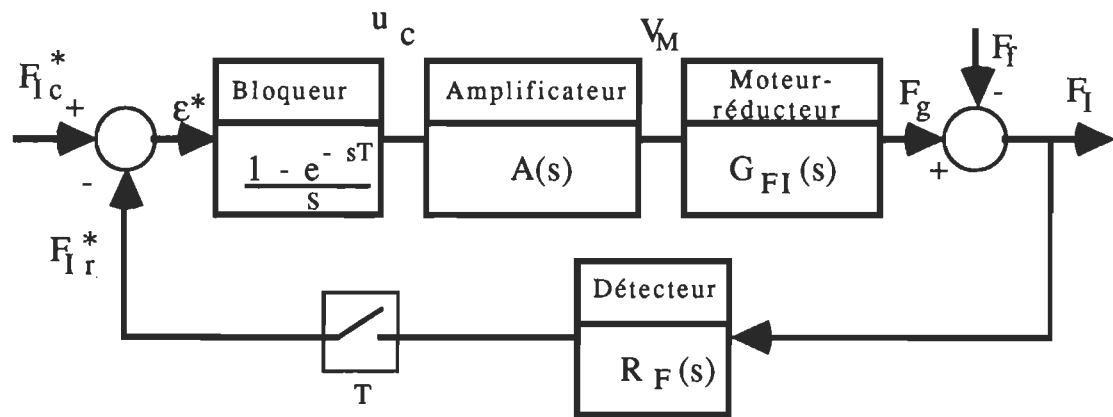


Figure 62. Diagramme structurel dans le domaine échantillonné (pincement).

Soit $G_{BO6}(z)$ la fonction de transfert en boucle ouverte:

On a:
$$G_{BO6}(z) = (1 - z^{-1}) \cdot \mathcal{Z} \left\{ [G_{BO5}(s)]/s \right\}$$

posons $K_6 = K_{GFI} \cdot A_d \cdot K_{FI} \cdot K_a$ et négligeons l'influence de T_a ; on a:

$$G_{BO6}(z) = K_6 \cdot (1 - z^{-1}) \cdot \mathcal{Z} \left\{ 1/[s(s + a_5)] \right\}$$

Par les tables de transformation [11] on obtient facilement, en posant $m = a_5 T$ et $z_5 = e^{-m}$:

$$G_{BO6}(z) = K_6 \cdot (1 - z^{-1}) \cdot [z \cdot (1 - z_5) / [(z - 1) \cdot (z - z_5)]]$$

Ou, après simplification:

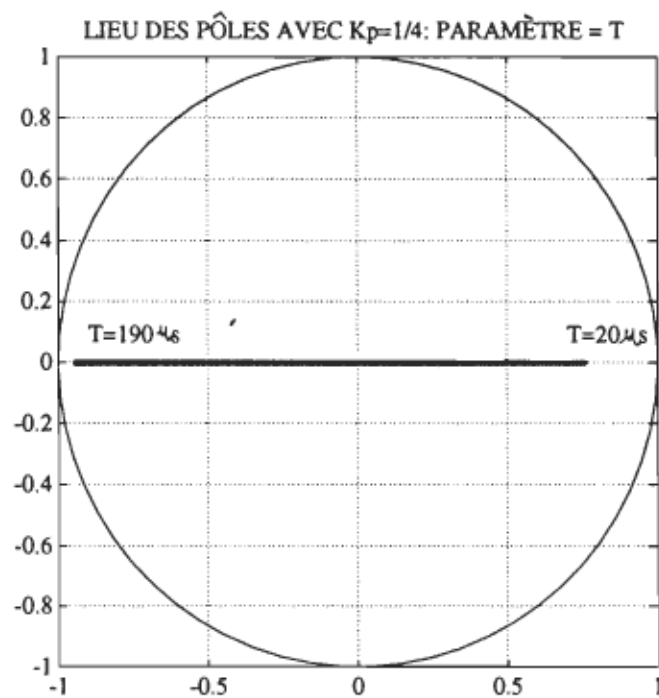
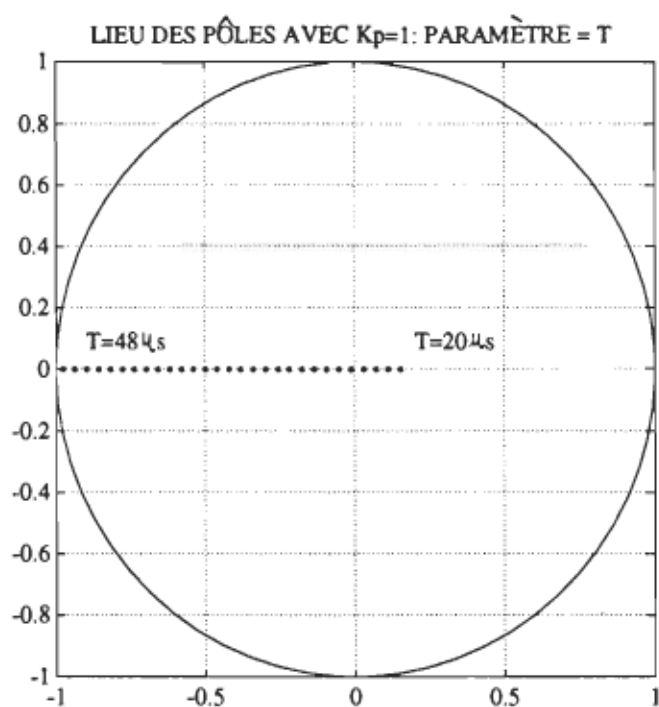


Figure 63. Pôles du système échantillonné (pincement).

$$G_{BO6}(z) = [K_6 \cdot (1 - z_5)] / (z - z_5)$$

L'équation caractéristique du système en boucle fermée s'écrit:

$$1 + G_{BO6}(z) = 0$$

Après rangement on tire l'unique pôle en boucle fermée, soit:

$$z_6 = z_5 \cdot (1 + K_6) - K_6$$

L'évolution du pôle z_6 , en fonction de la période d'échantillonnage, est montrée à la figure 63. Ainsi, remarque t-on que, sans compensateur le système échantillonné devient instable pour de faibles valeurs de période d'échantillonnage. Cette situation n'est pas pratique si on tient compte du temps de calcul. Alors que si on réalise un bouclage avec un compensateur de type P tel que $K_p = 1/4$, on obtient une période d'échantillonnage raisonnable de 160 μ s. En ce moment le pôle unique z_6 est tel que: $z_6 = -0,6817$, procurant ainsi un amortissement inférieur à l'amortissement critique de 0,707.

Loi de commande et modèle de référence: Étant donné que le bouclage se fait sans compensateur, la loi de commande devient très simple et s'exprime par:

$$u_c^*(t) = K_p \cdot \varepsilon^*(t) = K_p \cdot [F_{Ic}^*(t) - F_{Ir}^*(t)]$$

À cette loi de commande, nous combinons un modèle de référence avec incrémentation de la consigne à chaque période d'échantillonnage; ce qui donne:

$$F_{Ic}^*(t) = F_{Ic}^*(t - 1) + 1$$

Nous avons opté pour l'utilisation d'un tel modèle de référence afin de contrôler les dépassements éventuels.

CHAPITRE 7

ÉLABORATION DU LOGICIEL DE COMMANDE

Nous présenterons dans ce chapitre, la structure du logiciel de commande. Les différents organigrammes (programme principal, sous-routines et modules) seront aussi exposés. Lorsque cela est nécessaire, nous préciserons les variables pertinentes ainsi que certains détails de programmation. La compilation du programme, écrit en langage assembleur ASM51 est fourni à l'annexe B. La plupart des variables sont définies en double précision sur 16 bits. Le microcontrôleur 80C51FA performe des opérations d'addition et de soustraction signées en notation complément à deux. Par conséquent le seizième bit des variables de calcul sert de bit de signe. Ainsi nous limiterons toutes les variables de calcul sur un maximum de 15 bits afin que le bit de signe soit toujours conservé.

Structure générale du logiciel de commande: Le programme de commande a été élaboré à partir de routines, sous-routines et modules (Figure 64). Cette organisation du programme, permet de retrouver assez facilement les erreurs de programmation. Le logiciel intègre essentiellement les composantes suivantes:

- Le programme principal.
- R_PRÉPOSI: routine de commande de prépositionnement.
- R_FORCE: routine de commande de pincement.
- SUBR_POAD: sous-routine d'élaboration du positionnement

actuel désiré à partir du paramètre de dimension (PARADIM).

- SUBR_CONSI: sous-routine d'élaboration de la consigne de position pour la commande asservie.

- MOD_IMP_COD: module de comptage des impulsions du disque codeur pendant la commande asservie du prépositionnement.

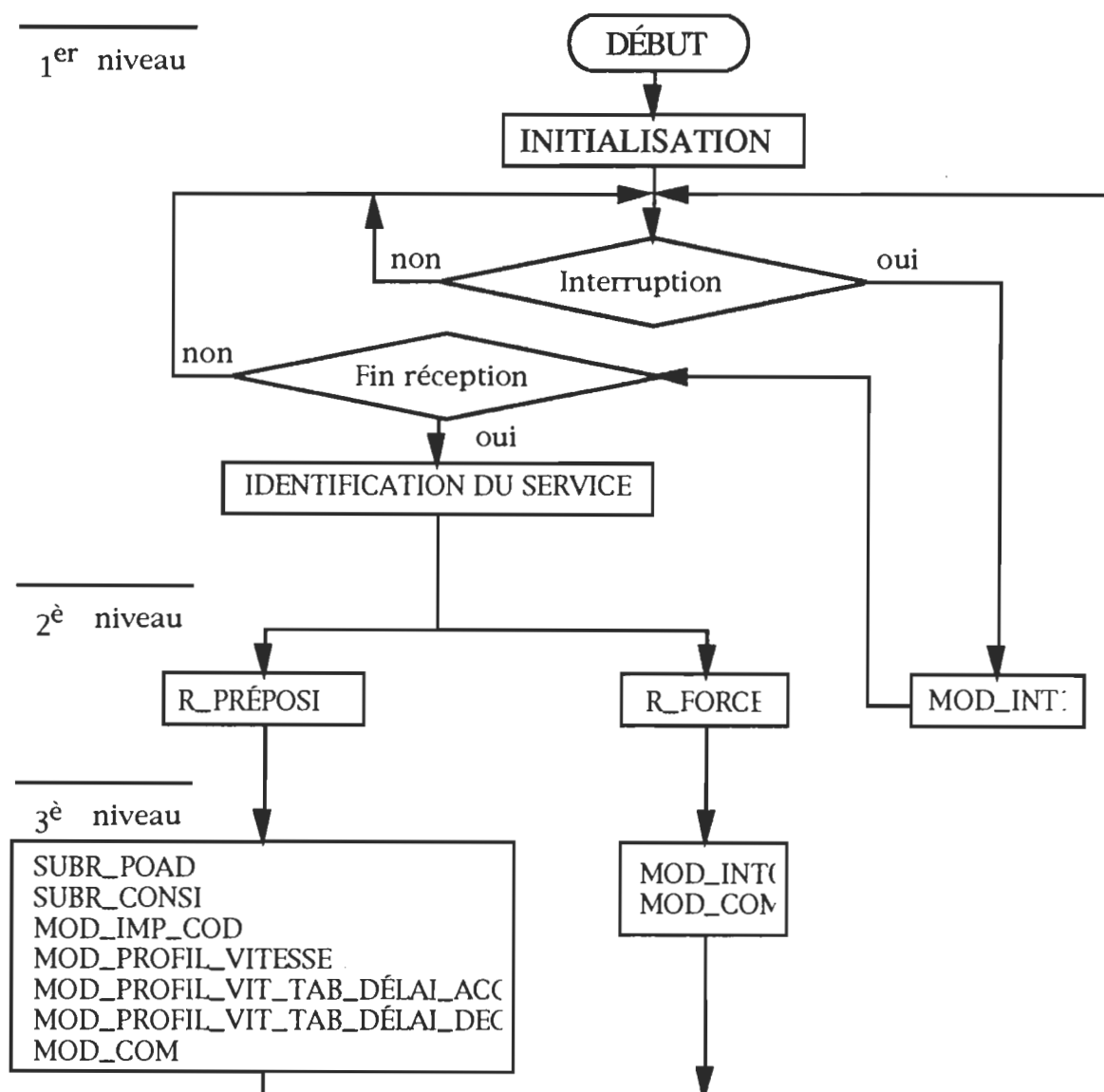


Figure 64. Structure générale du logiciel de commande.

- MOD_COM: module de commande asservie du prépositionnement et du pincement.
 - MOD_INT0: module de lecture du convertisseur A/N.
 - MOD_INT1: module de communication avec une périphérie.
 - MOD_PROFIL_VITESSE: module d'élaboration du profil de vitesse.
 - MOD_PROFIL_VIT_TAB_DÉLAI_ACC: module d'élaboration de la table de délais variables en accélération, pour le profil de vitesse.
 - MOD_PROFIL_VIT_TAB_DÉLAI_DEC: module d'élaboration de la table de délais variables en décélération, pour le profil de vitesse.
- Comme on le remarque sur la figure 64, la structure du logiciel comprend trois niveaux de décision. Le programme principal intègre aussi des options: soient le positionnement de référence (AUTOAJUSTMODE), et la fin d'opération (PARKMODE).

Organigrammes des différents programmes: Les organigrammes seront présentés sous une forme simplifiée et le lecteur peut consulter la compilation du programme en annexe pour plus de détails. Ces derniers seront présentés par niveau de décision.

Organigramme du programme principal: Le programme du premier niveau de décision intègre certaines opérations de définition et d'initialisation de registres et de variables de commande. Il comporte aussi la table de coordonnées radiales. De plus il performe le test de décision afin de transférer le déroulement du programme vers la routine appropriée. Une fois que les variables et les registres sont

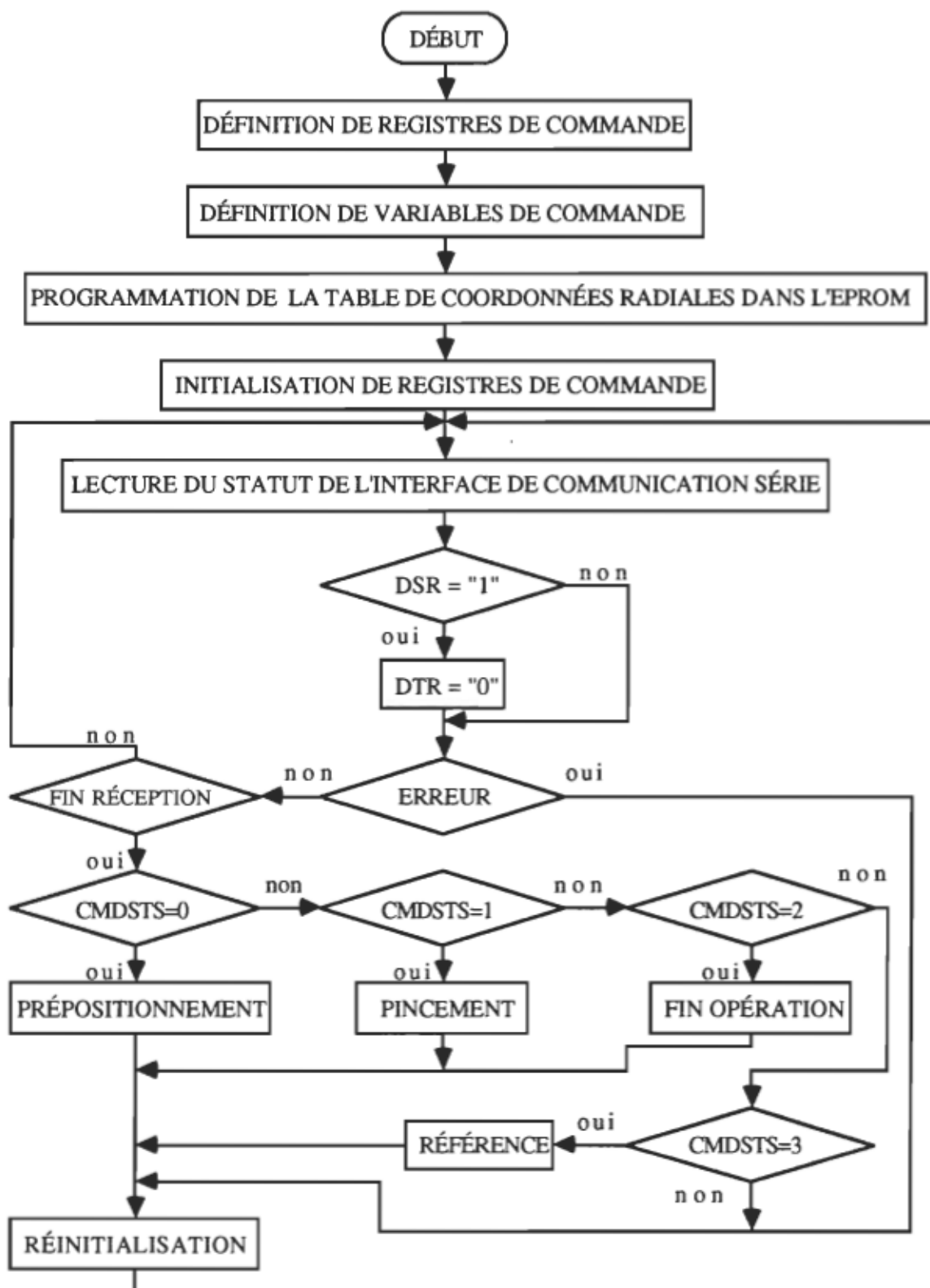


Figure 65. Programme principal.

définis puis initialisés, le programme rentre en mode attente en réception et surveille le statut de l'interface de communication série.

Organigrammes des programmes du deuxième niveau de décision:

Routine de commande de prépositionnement: La méthodologie de cette commande est schématisée sur la figure 66. La variable d'entrée de la routine est constituée par le paramètre de dimension (PARADIM).

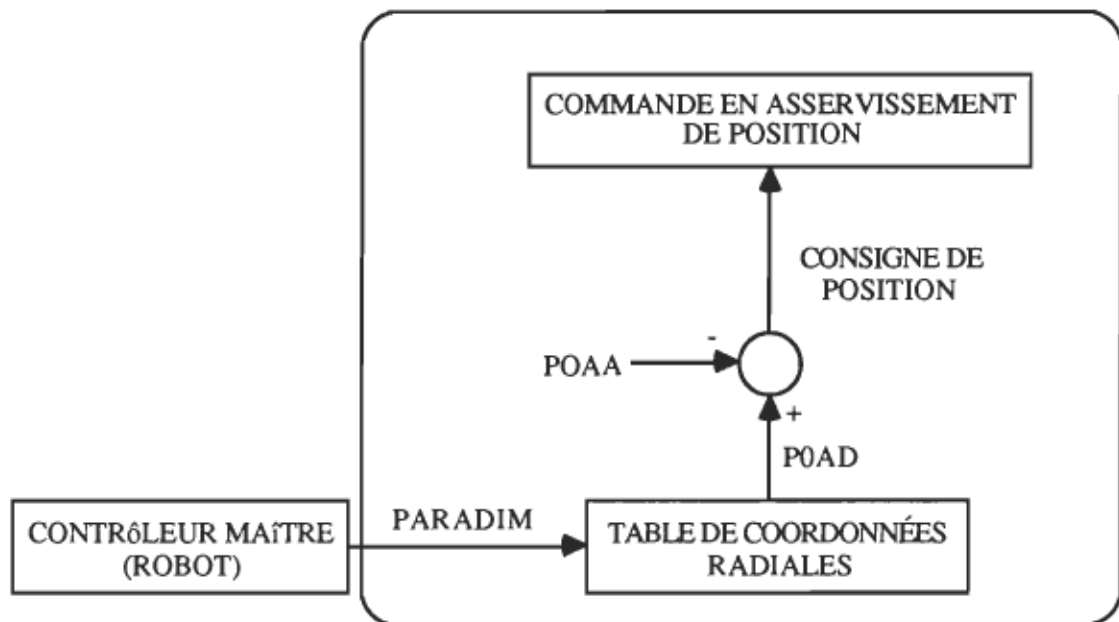


Figure 66. L'approche de commande du prépositionnement.

Comme on le constate sur les figures 66 et 67, la routine de commande de prépositionnement, élabore le positionnement actuel désiré (POAD), à partir du paramètre de dimension (PARADIM) et de la table des coordonnées radiales. En considérant que le positionnement actuel absolu (POAA) est connu, le programme calcul la consigne de position

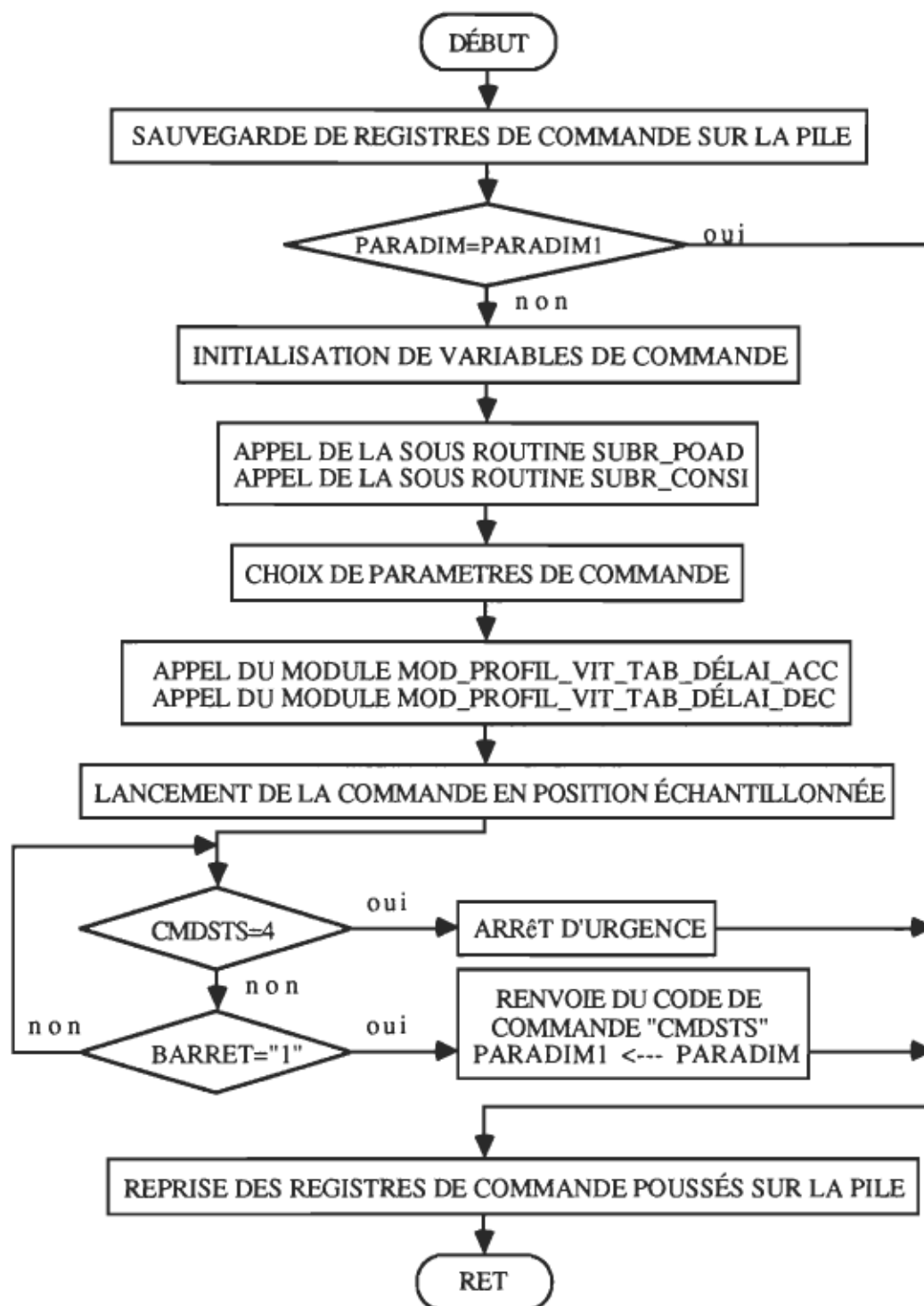


Figure 67. Routine de commande du prépositionnement (R_PRÉPOSI).

à injecter dans la loi de commande pour que l'asservissement se fasse. La commande de prépositionnement peut être interrompue à n'importe quel moment, lorsque le contrôleur maître (robot) envoie un code de commande, $CMDSTS = 4$. À la fin du prépositionnement, la routine sauvegarde la valeur du paramètre de dimension et renvoie au robot le code de commande, soit $CMDSTS$.

Routine de commande de pincement: La principale variable d'entrée est la consigne de force F_{con} . Cette routine intègre trois procédures dont: l'approche, l'application de force et le relachement. Lorsque la consigne de force est atteinte, le programme renvoie, au robot, le code de commande $CMDSTS$.

Nous adopterons les conventions de commande suivantes:

$F_{con} = 0$ -----> Relachement.

$F_{con} \neq 0$ -----> Pincement (approche et application de force).

L'organigramme de la routine de pincement est montré à la figure 68.

Module de communication: La communication se fait sur quatre chiffres codés en ASCII.

- $CMDSTS$: chiffre représentant le code de commande.
- M1: premier chiffre reçu du mot de commande.
- M2: deuxième chiffre reçu du mot de commande.
- M3: troisième chiffre reçu du mot de commande.

L'organigramme du module de communication est exposé à la figure 69. Au niveau de la communication, nous adopterons les conventions de commande suivantes:

$CMDSTS = 0$ -----> Commande de prépositionnement.

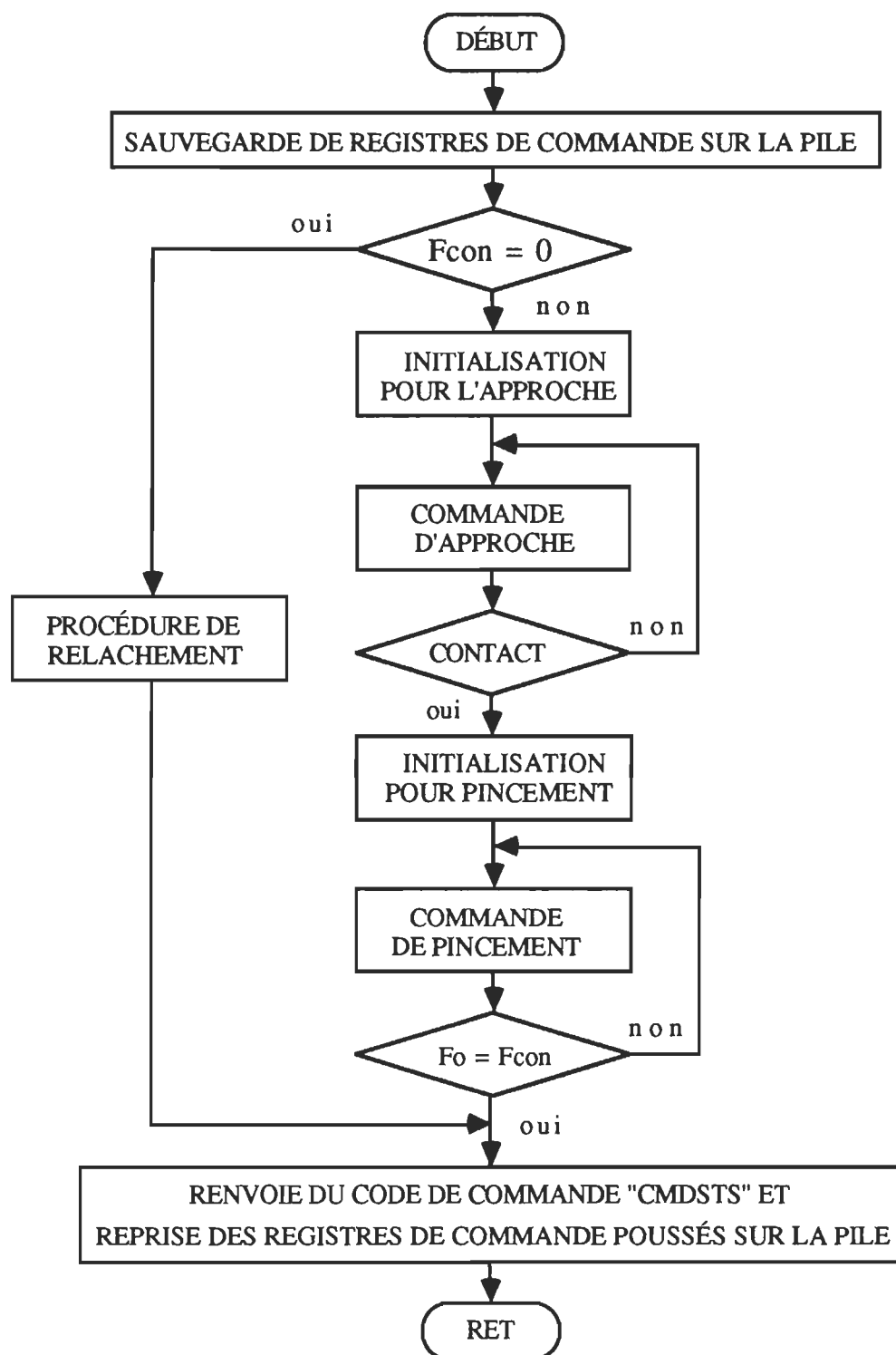


Figure 68. Routine de pincement (R_FORCE).

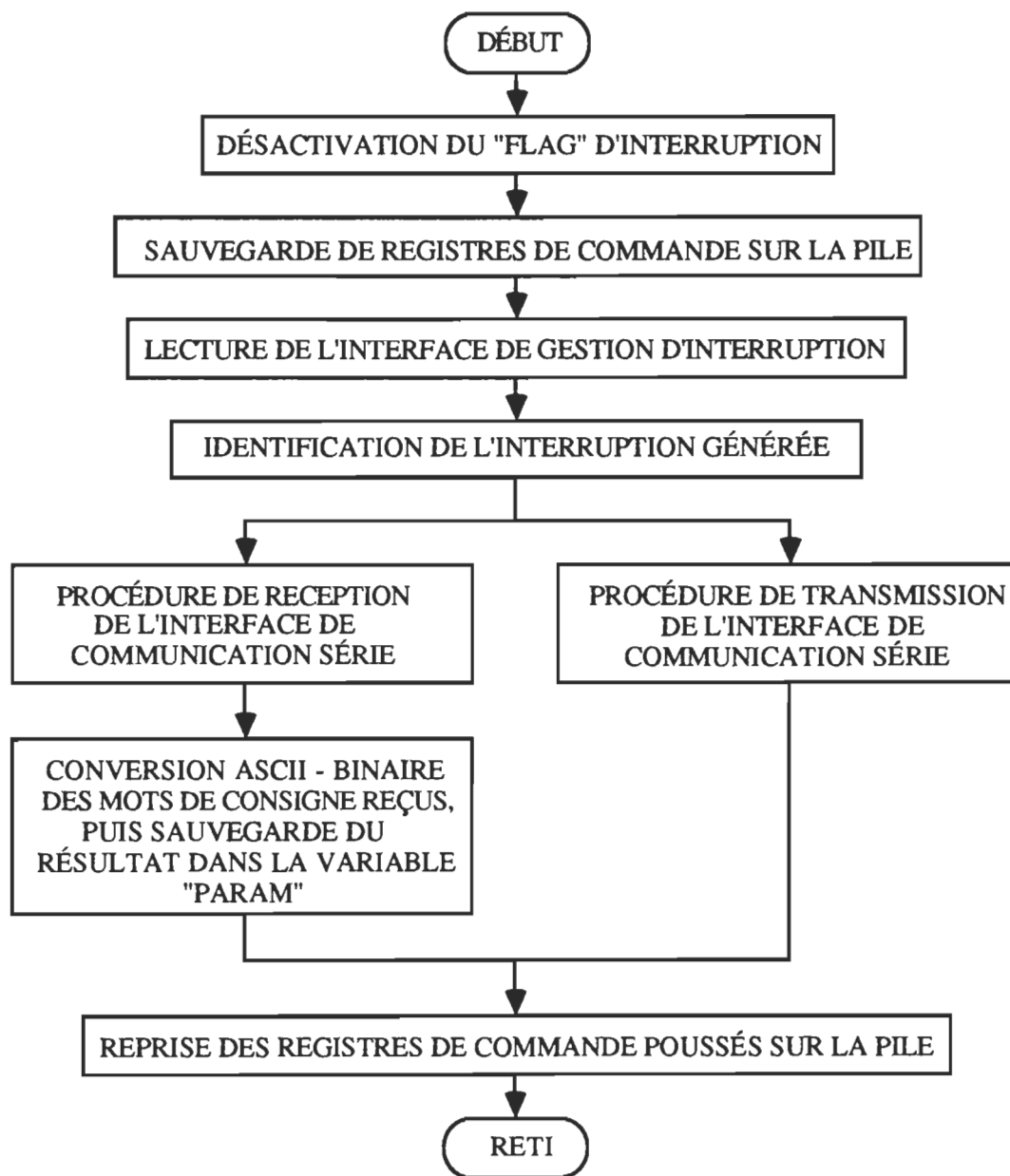


Figure 69. Module de communication(MOD_INT1).

CMDSTS = 1 -----> Commande de pincement.
 CMDSTS = 2 -----> Commande de fin d'opération.
 CMDSTS = 3 -----> Commande de référence.

CMDSTS = 4 -----> Commande d'arrêt d'urgence lors du mouvement de prépositionnement ou de pincement.

Organigrammes des programmes du troisième niveau de décision:

Sous-routine d'élaboration du positionnement actuel désiré:

- Entrée:

PARADIM (paramètre de dimension r_n).

- Sorties:

POADH (byte supérieur du positionnement actuel désiré).

POADL (byte inférieur du positionnement actuel désiré).

Cette sous-routine calcule l'adresse de la valeur à choisir dans la table des coordonnées radiales, à partir du paramètre de dimension. Le tableau 6 montre la correspondance entre le paramètre de dimension et son adresse de mémorisation. Chaque coordonnée est mémorisée sur deux bytes. En observant le tableau 6, on peut remarquer que la première adresse des coordonnées est donnée par:

$$ADRESSE1 = 2 \cdot PARADIM - 2$$

La seconde adresse est donc:

$$ADRESSE2 = ADRESSE1 + 1$$

Lorsque l'adresse de base est non nulle, il faut corriger les adresses ci-haut calculées en y ajoutant la valeur de décalage. L'organigramme de la sous-routine du positionnement actuel désiré (SUBR_POAD), est montré à la figure 70.

Tableau 6

Adressage de la table des coordonnées radiales

r	r _n (PARADIM)	ADRESSES (MÉMOIRE)	
0,010"	1	_____	00H
		└──	01H
0,020"	2	_____	02H
		└──	03H
0,030"	3	_____	04H
.	.	└──	05H
.	.		.
.	.		.
1,880"	188	_____	177H
		└──	178H

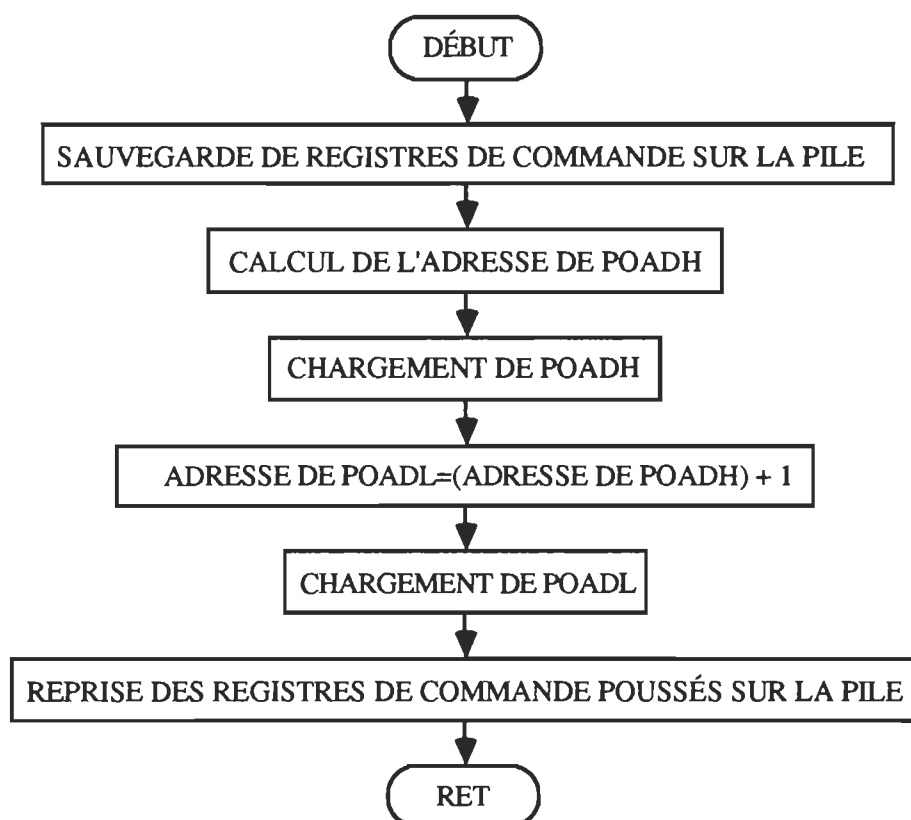


Figure 70. Sous-routine: positionnement désiré (SUBR_POAD).

Sous-routine d'élaboration de la consigne de position:

- Entrées:

POADH (byte supérieur du positionnement actuel désiré).

POADL (byte inférieur du positionnement actuel désiré).

POAAH (byte supérieur du positionnement actuel absolu).

POAAL (byte inférieur du positionnement actuel absolu).

- Sorties:

POC1H (byte supérieur de la consigne de position).

POC1L (byte inférieur de la consigne de position).

BSPOC (bit de signe de la consigne de position).

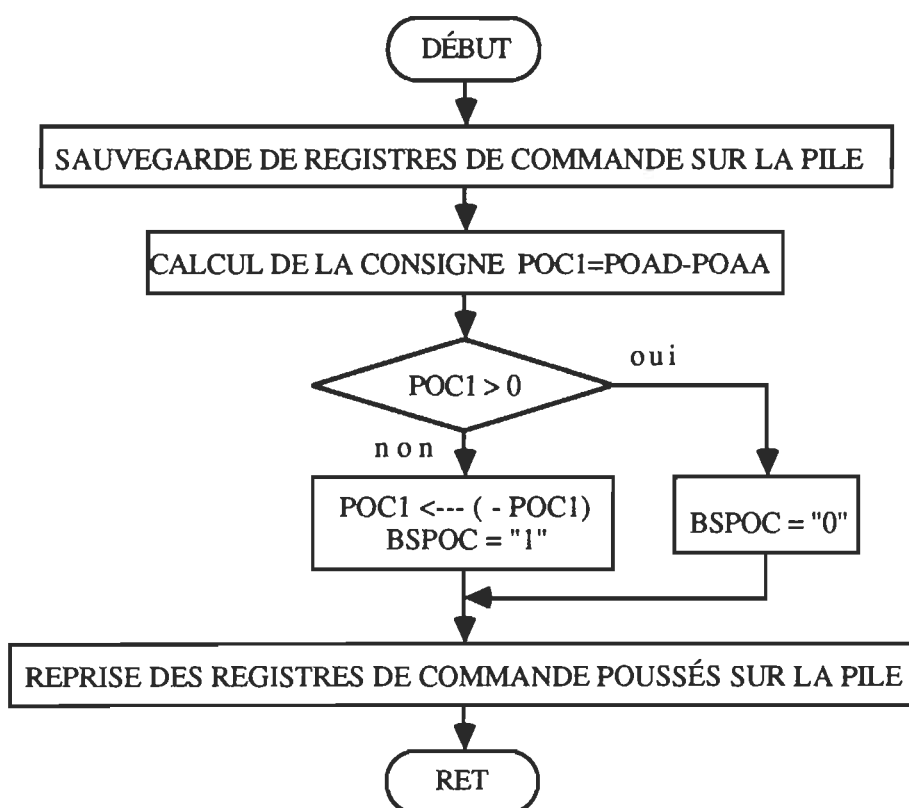


Figure 71. Sous-routine: élaboration de la consigne de position (SUBR_CONSI).

Module de comptage des impulsions du disque codeur:

- Entrées:

PHA (phase A du disque codeur).

PHB (phase B du disque codeur).

- Sorties:

POAAH (byte supérieur du positionnement actuel absolu).

POAAL (byte inférieur du positionnement actuel absolu).

PO0H (byte supérieur de la position lors de la commande).

PO0L (byte inférieur de la position lors de la commande).

L'organigramme de ce module est présenté à la figure 72.

Module de profil de vitesse:

- Entrées:

Tables de délais variables (accélération et décélération).

- Sortie:

POC2 (Consigne de position avec profil de vitesse).

Ce module génère le profil de vitesse, à partir des tables de délais variables, en accélération et en décélération.

L'organigramme de ce module est montré à la figure 73.

Module d'élaboration de la table de délais variables en accélération:

- Entrées:

IACC (intervalle d'accélération en impulsions codeurs).

PAS_ACC (pas de décrémentation du délai).

- Sortie:

Table de délais, programmée dans la mémoire RAM.

Les délais générés étant en décroissance, le temps d'incrémentation de la consigne diminue progressivement; ce qui provoque une accélération. Le début et la fin de la table sont identifiés par une valeur de délai nulle. La table sera exploitée par l'intermédiaire du compteur 16 bits interne au microcontrôleur, "TIMER 1" utilisé en temporisateur. Ce compteur génère une interruption vectorisée, à chaque passage de FFFFH à 0000H. Par conséquent, si on désire générer un délai de durée MO1, il faut charger dans les registres du compteur le nombre $[(2^{16} - 1) - \text{MO1}]$. La période de comptage est de 1µs. On présente l'organigramme à la figure 74.

Module d'élaboration de la table de délais variables en décélération:

- Entrées:

IDEC (intervalle de décélération en impulsions codeurs).

PAS_DEC (pas de d'incrémentation du délai).

MO1 (dernière valeur du délai en accélération).

- Sortie:

Table de délais, programmée dans la mémoire RAM.

Les délais générés étant en croissance, le temps d'incrémentation de la consigne augmente progressivement; ce qui provoque une décélération. D'où l'organigramme de la figure 75.

Module de lecture du convertisseur A/N: La principale sortie de ce module est la valeur lue de la force de préhension aux bouts des doigts, soit F_O . L'organigramme est montré à la figure 76.

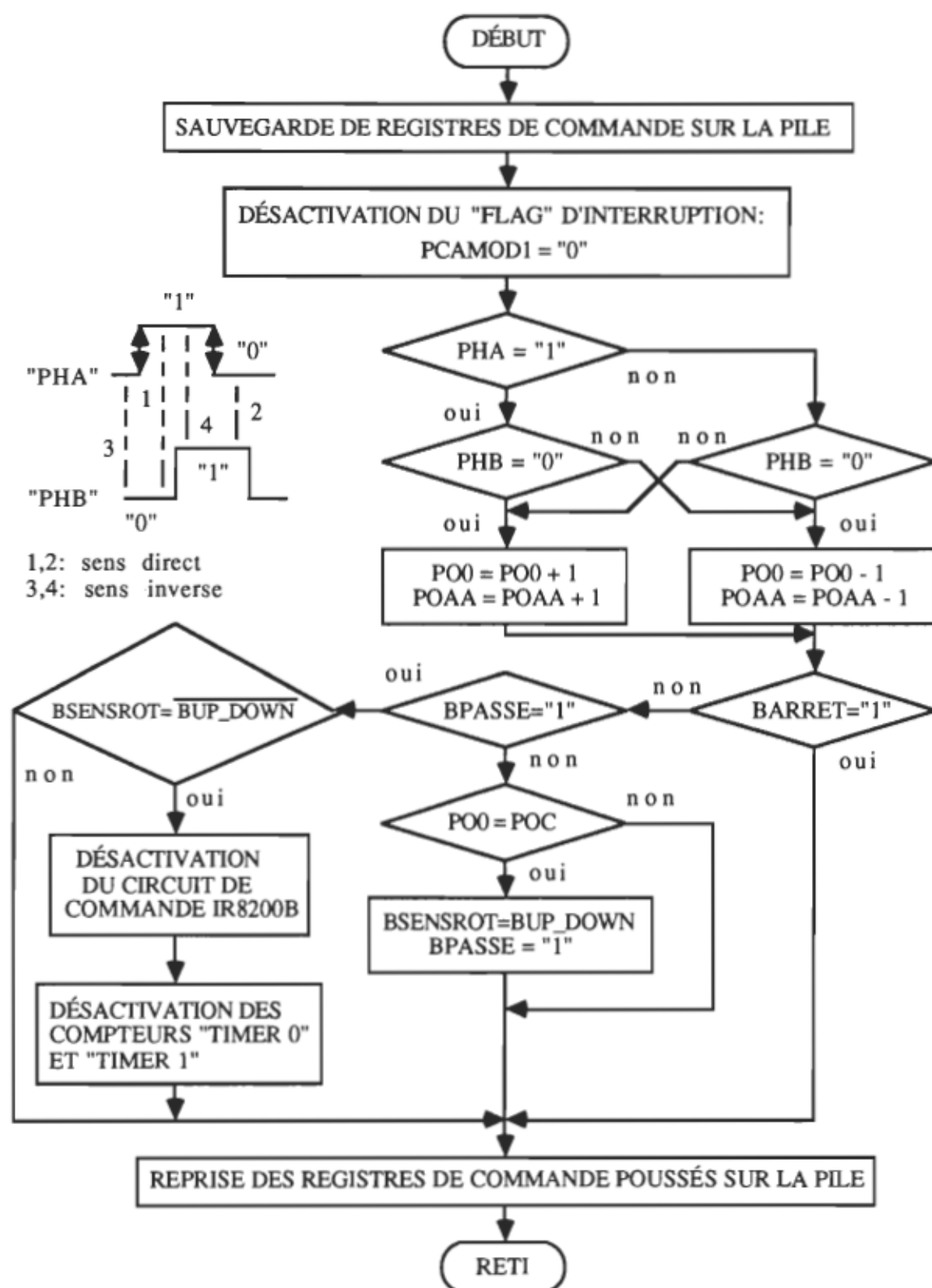
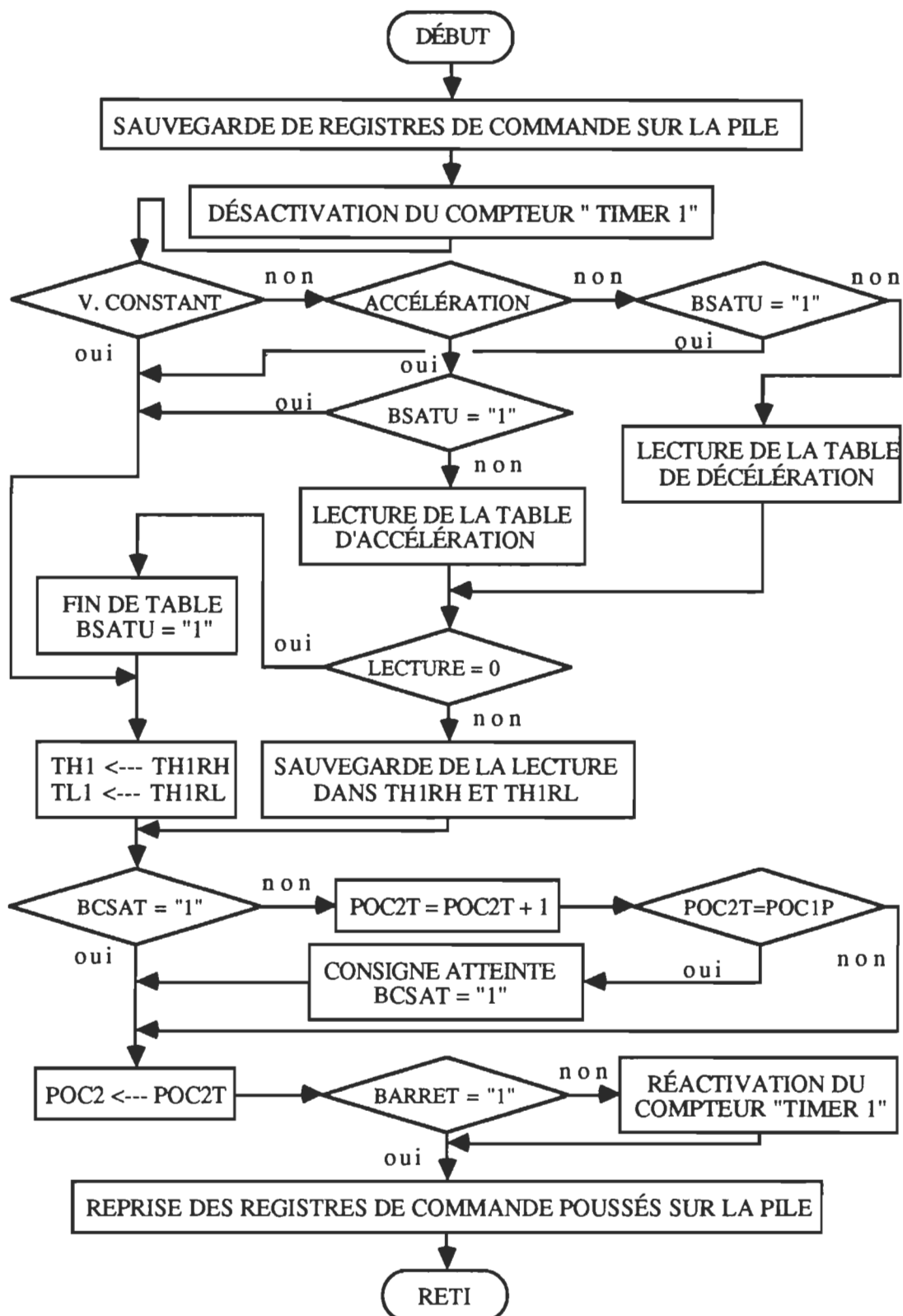


Figure 72. Module de comptage d'impulsions (MOD_IMP_COD).



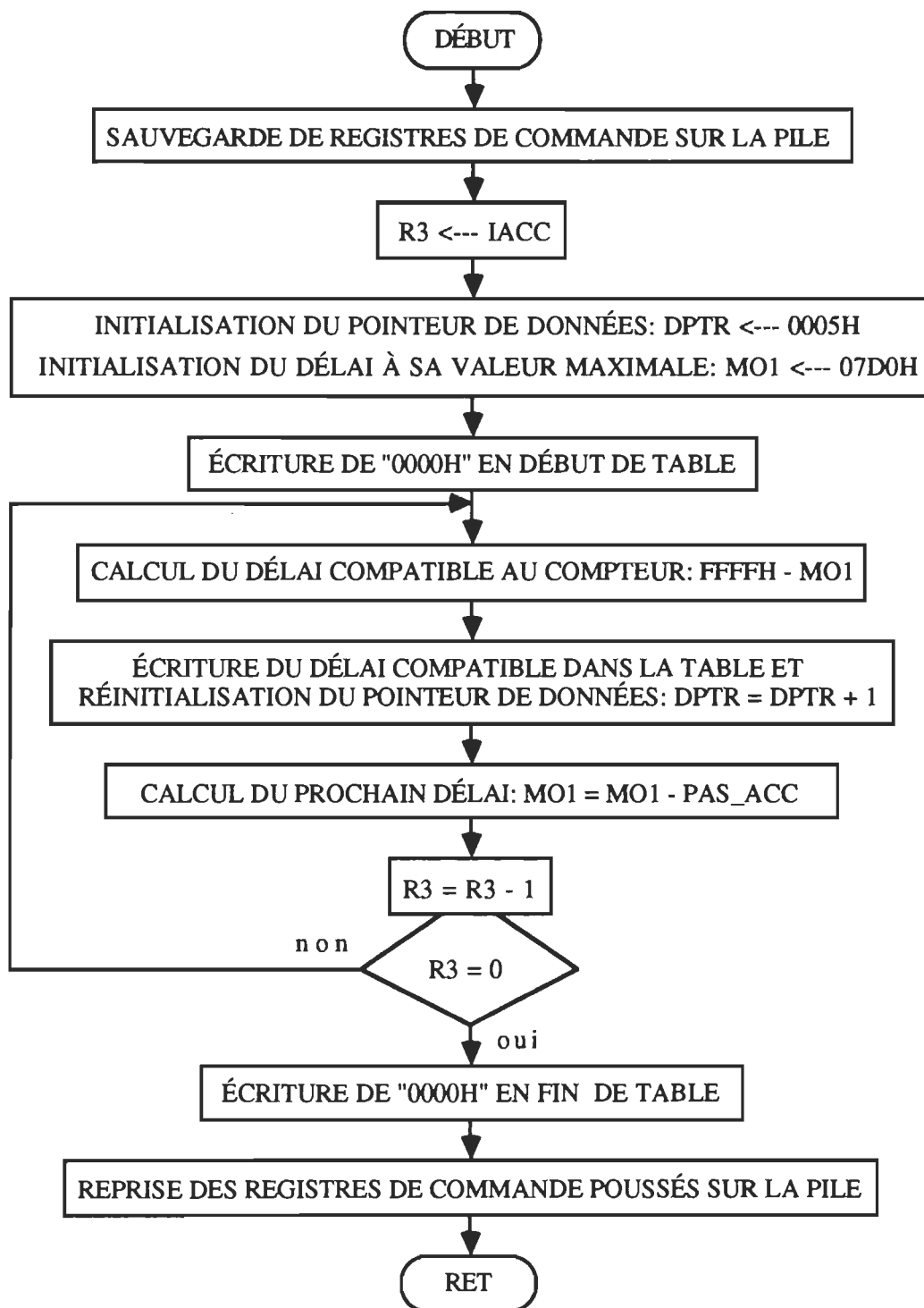


Figure 74. Module de délais variables: profil de vitesse, en accélération (MOD_PROFIL_VIT_TAB_DÉLAI_ACC).

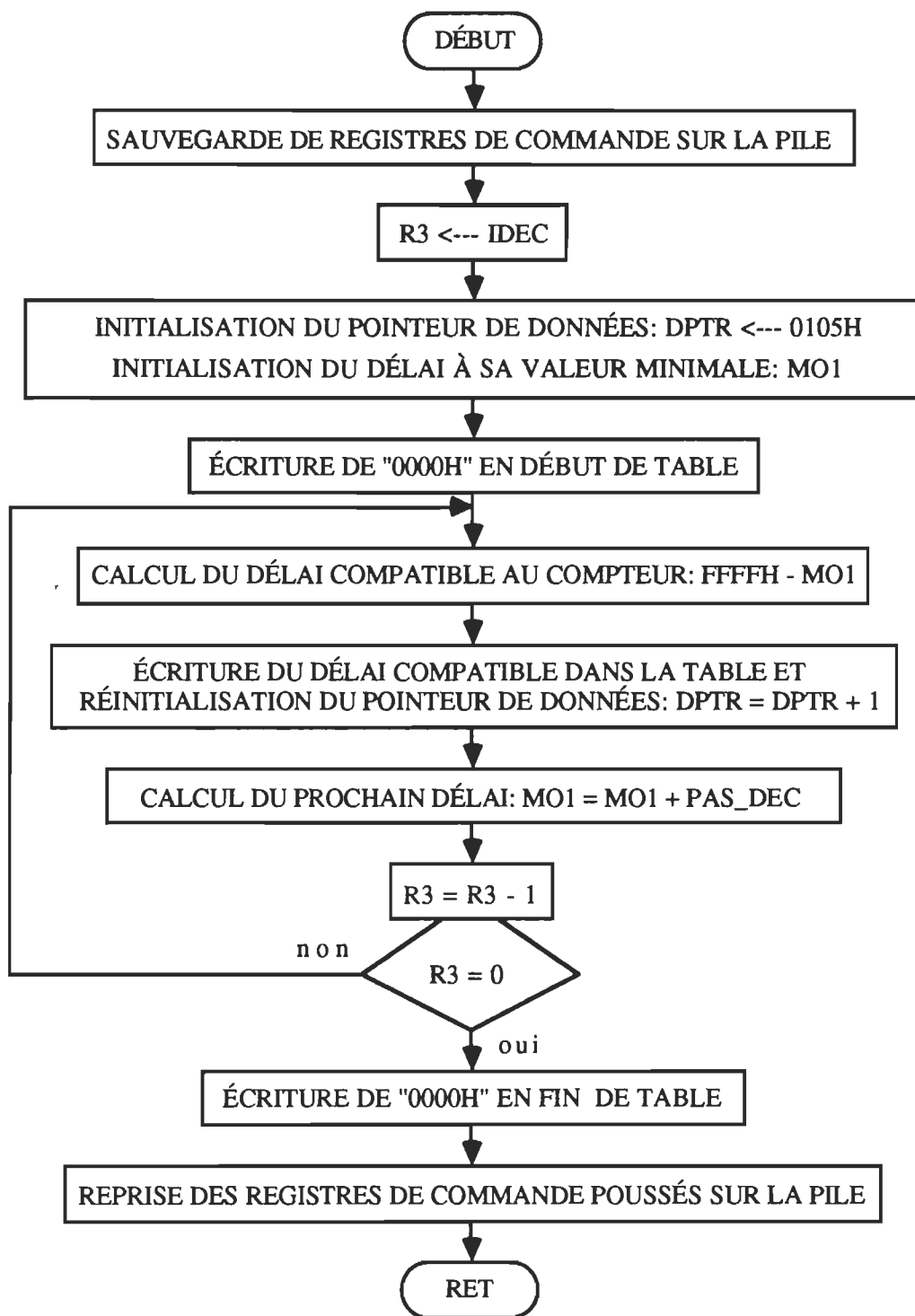


Figure 75. Module de délais variables: profil de vitesse, en décélération (MOD_PROFIL_VIT_TAB_DÉLAI_DEC).

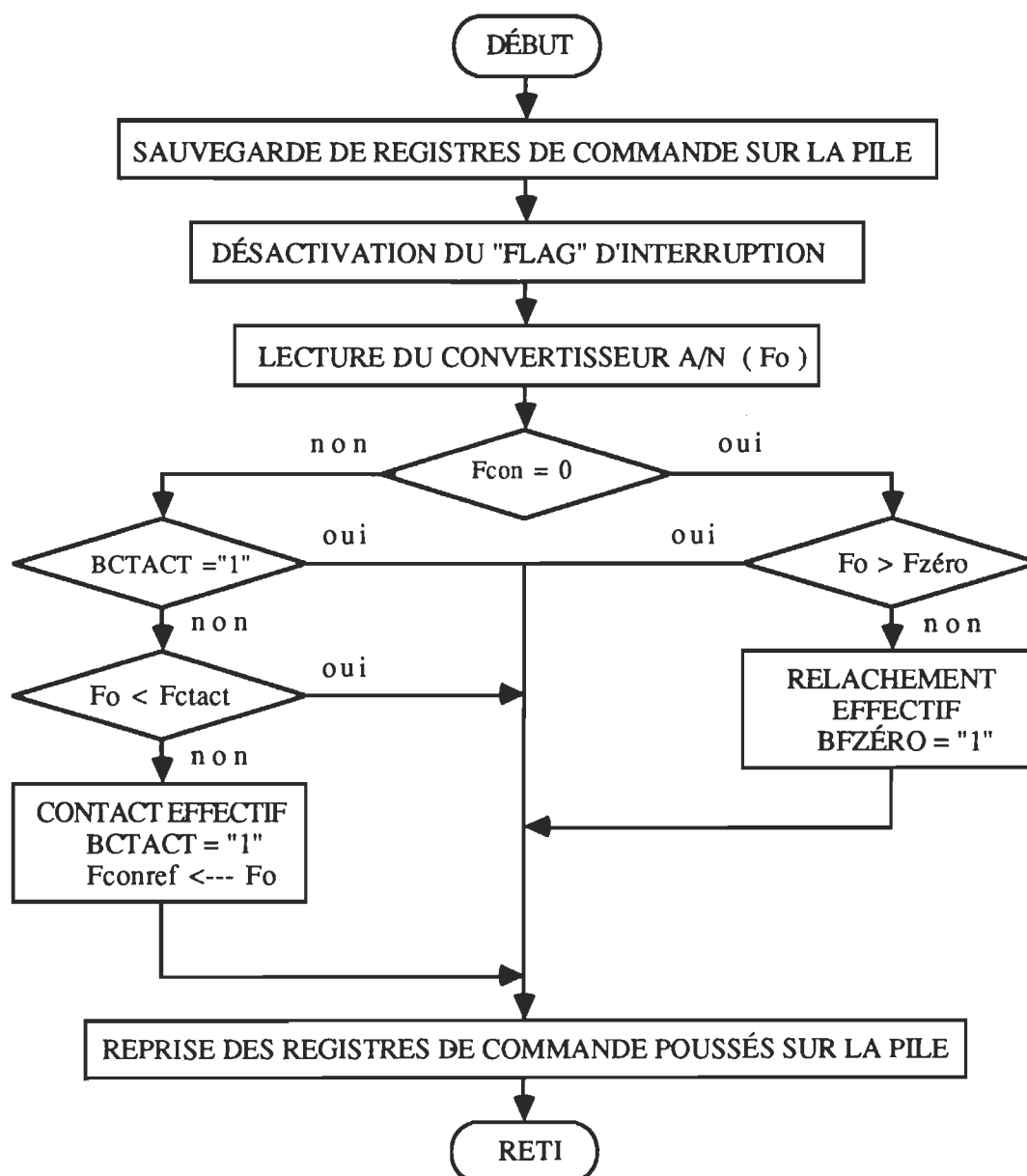


Figure 76. Module de lecture du convertisseur A/N (MOD_INT0).

Module de commande: (Figure 77)

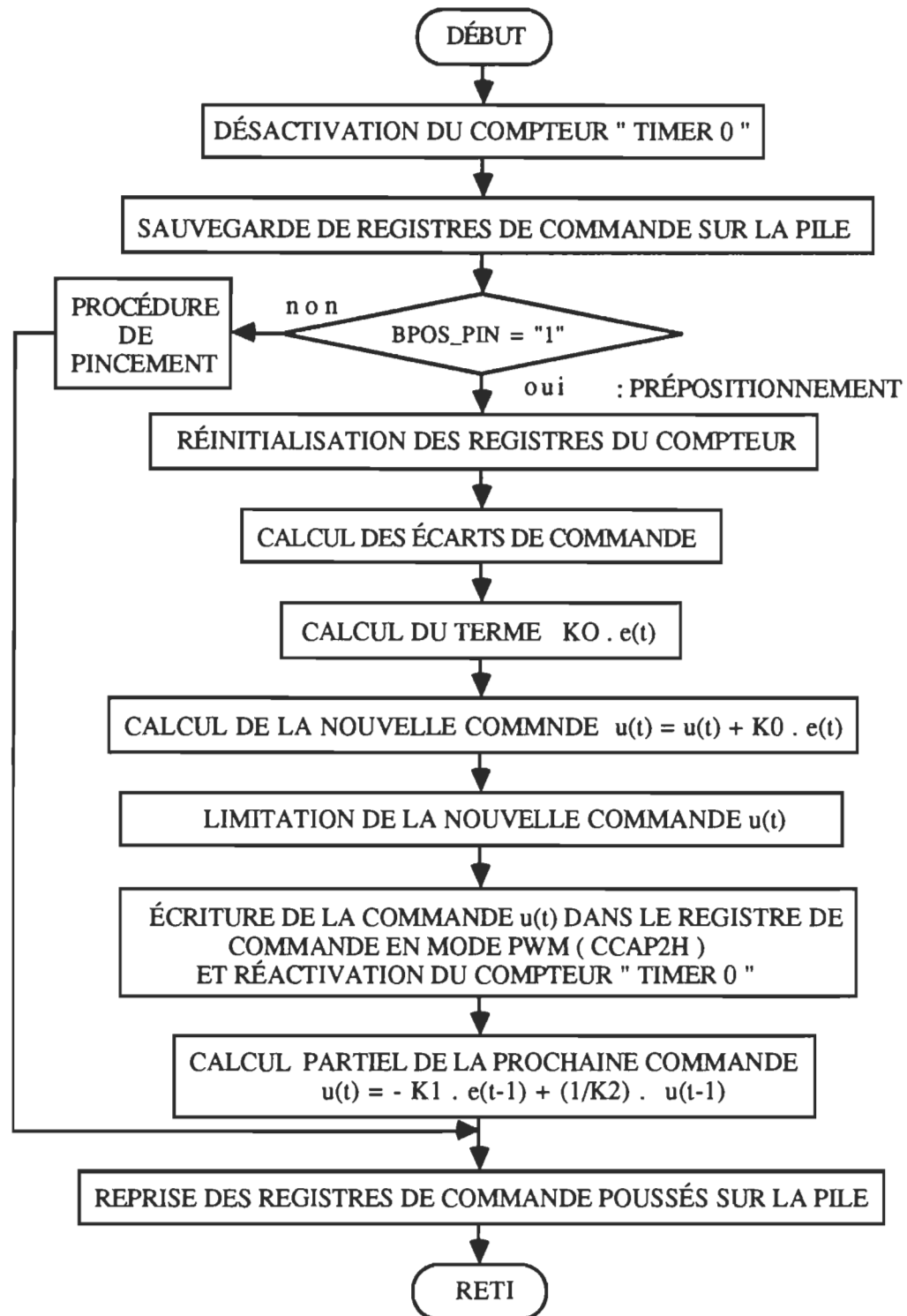


Figure 77. Module de commande (MOD_COM).

En guise de conclusion pour ce chapitre, nous précisons que les organigrammes présentés servent de base de développement pour le logiciel de commande. Néanmoins nous précisons, que certains de ces organigrammes peuvent se retrouver légèrement modifiés lors du développement, compte tenu de certaines considérations pratiques.

CONCLUSION

Nous avons présenté, dans ce rapport, l'étude et le développement d'une pince robotique à trois doigts, à retour de force avec optimisation de la force de saisie. La force maximale aux bouts des doigts est de 100 N. Sa géométrie s'adapte au saisie d'objets à symétrie circulaire dont les isolateurs en porcelaine sur les lignes de distribution d'électricité. La recherche de la structure mécanique optimale a été basée sur les notions de force de saisie et de manipulation [8]. La pince à concevoir étant essentiellement dédiée au saisie, nous avons donc cherché à annuler la force de manipulation dans toute les directions. La structure mécanique que nous proposons exige deux commandes distinctes, soient les commandes de prépositionnement et de pincement. Le prépositionnement permet de positionner les trois doigts, de façon symétrique et parallèle, à presque la dimension de l'objet à saisir; tandis que le pincement est caractérisé par une application de force, avec un mouvement d'approche de très faible amplitude. Nous avons aussi exposé, la détermination de certains paramètres pertinents pour le développement dont, le moment d'inertie et le coefficient de frottement visqueux du système de prépositionnement ainsi que les dimensions du corps d'épreuve en flexion pour la mesure de la force aux bouts des doigts. La modélisation des systèmes nous a conduit à définir deux paramètres de consigne, soient le paramètre de dimension r_n pour le prépositionnement et le paramètre de force F_{con}

pour le pincement tels que: $r_n=0:1:188$, permet un écartement circulaire de rayon 0 à 1,88" avec un pas minimum de 0,010"; alors que $F_{con}=0:1:255$, autorise une force de pincement de 0 à 100 N avec un pas minimum de 0,4 N. Par la suite, nous avons présenté l'étude des deux principales boucles de commande, ayant conduit à la détermination des lois de commande. La structure générale du logiciel de commande ainsi que ses principaux organigrammes ont été aussi exposés. La commande de prépositionnement a été complètement développée et testée avec succès. Quant à la commande de pincement, toute les études de base ont été faites; mais pour des raisons de délai de conception et de réalisations des pièces mécaniques, nous n'avons pas eu le temps d'implanter cette boucle. Ceci fera l'objet de développements futurs en même temps que la simplification de la structure mécanique. Dans l'ensemble nous considérons avoir contribué à la recherche de solutions aux différents problèmes du domaine, énumérés au premier chapitre. Pour finir, nous aimerons souligner que le cheminement et surtout la mise en œuvre de ce projet n'a pas été simple ni facile, comme cela est toujours le cas, lorsque la théorie et la pratique doivent se joindre pour donner un ensemble fonctionnel.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Goldwasser, S.M., "Computer Architecture for Grasping", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, GA: 1984, pp. 320-325.
- [2] Salisbury, J.K. and Craig, J.J., "Articulated Hands: Force Control and Kinematic Issues", The International Journal of Robotics Research, Vol. 1, No. 1, Spring 1982, pp. 4-17.
- [3] Salisbury, J.K., jr., "Design and Control of an Articulated Hand", Massachusetts Institute of Technology, MA 02139, U.S.A., Design and Synthesis, North Holland Pub., 1985, pp. 353-360.
- [4] Crosnier, J.J., "Grasping Systems with Tactile Sense using Optical Fibers", Souriau et Cie, France, 1986, pp. 209-217.
- [5] Krigman, J.D., Siegel, D.M., Narasimhan, S., Hollerbach, J.M. and Gerpheide, G.E., "Computational Architecture for UTAH/MIT Hand", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, St. Louis, March 1985, pp. 918-924.
- [6] Jacobsen, S.C., Mc Cammon, D.I., Bigger, K.B. and Phillips, R.P., "Tactile Sensing System Design Issues in Machine Manipulation", Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, North Carolina, R: March 31-April 3, 1987, pp. 2087-2096.

- [7] Vidéo cassette
titre: "Sarcos Dextrous Arm"
source: "The Center for Engineering Design and Sarcos
Research Corporation", 1990.
- [8] Yoshikawa, T. and Nagai, K., "Manipulating and Grasping Forces
in Manipulation by Multifingered Robot Hands", IEEE
Transactions on Robotics and Automation, Vol.7, No. 1,
February 1991, pp. 67-77.
- [9] Mason, M.T., Salisbury Jr, J.K., "Robot Hands and The Mechanics
of Manipulation", The Massachusetts Institute of Technology,
London, England, 1985.
- [10] André, P., Kauffman, J.M., Lhote, F., Taillard, J.P., "Les robots",
Tome 4: "Constituants technologiques", Hermes Publishing,
France, 1983.
- [11] Franflin, G.F., Powell, J.D., Emami-Naeini, A., "Feedback Control
of Dynamic Systems", Second Edition, Addison-Wesley
Publishing Company, U.S.A., April 1991.
- [12] Crandall, S.H., Dahl, N.C., Lardner, T.J., "An Introduction to the
Mechanics of Solids", Second Edition, McGraw-Hill Book
Company, U.S.A., 1978.
- [13] Asch, G., et collaborateurs, "Les capteurs en instrumentation
industrielle", Dunod, troisième édition, Paris, 1987.
- [14] Documentation (logiciels):
 - "MCS-51 Macro Assembler, User's Guide for DOS Systems"
Intel Corporation, 1986.
 - "ABEL User Manual", Data I/O Corporation, 1990.

- AUTOCAD.
- ORCAD_PCB II User's Guide.
- MATLAB.

[15] Notices techniques de circuits et catalogues spécialisés.

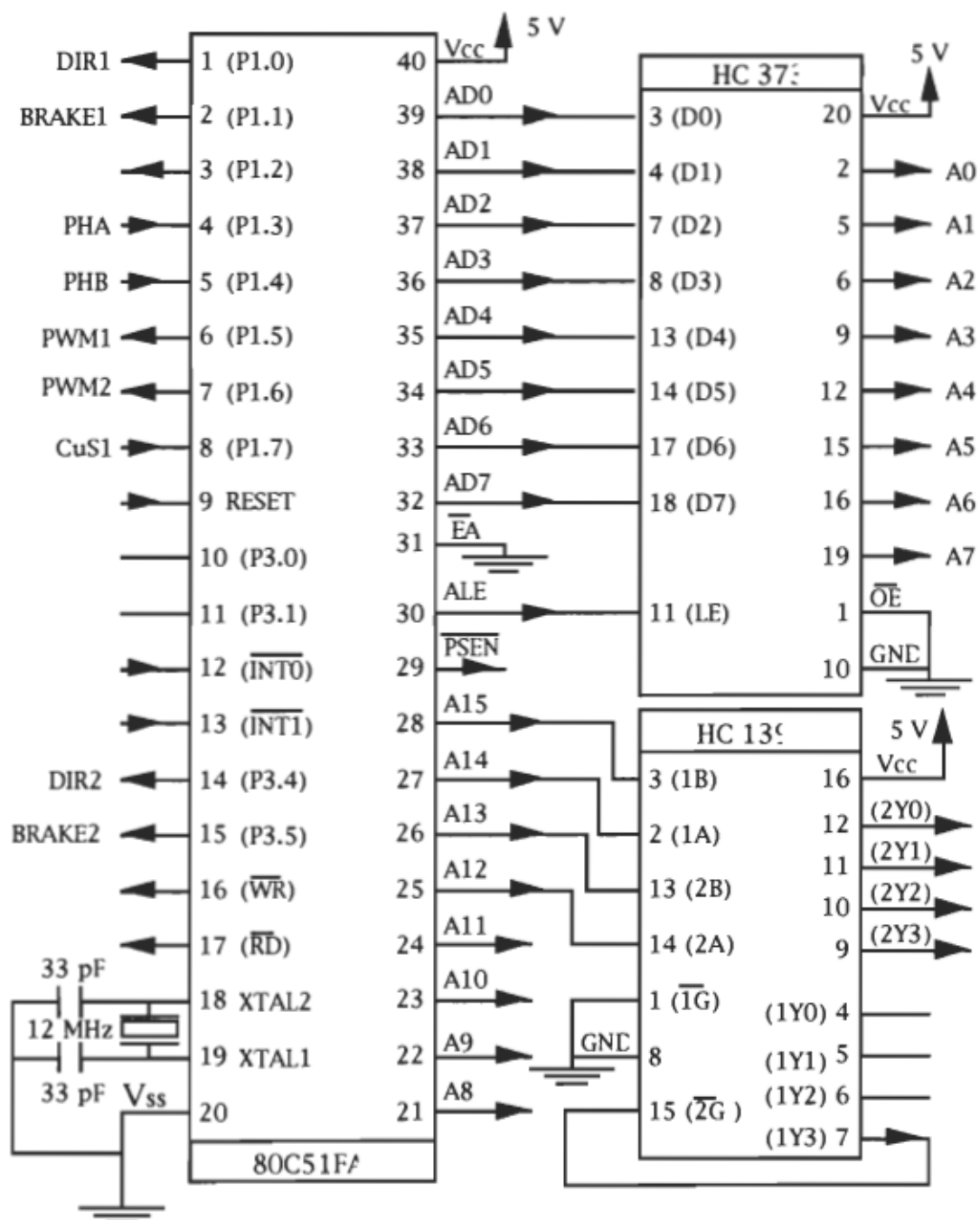
ANNEXE A

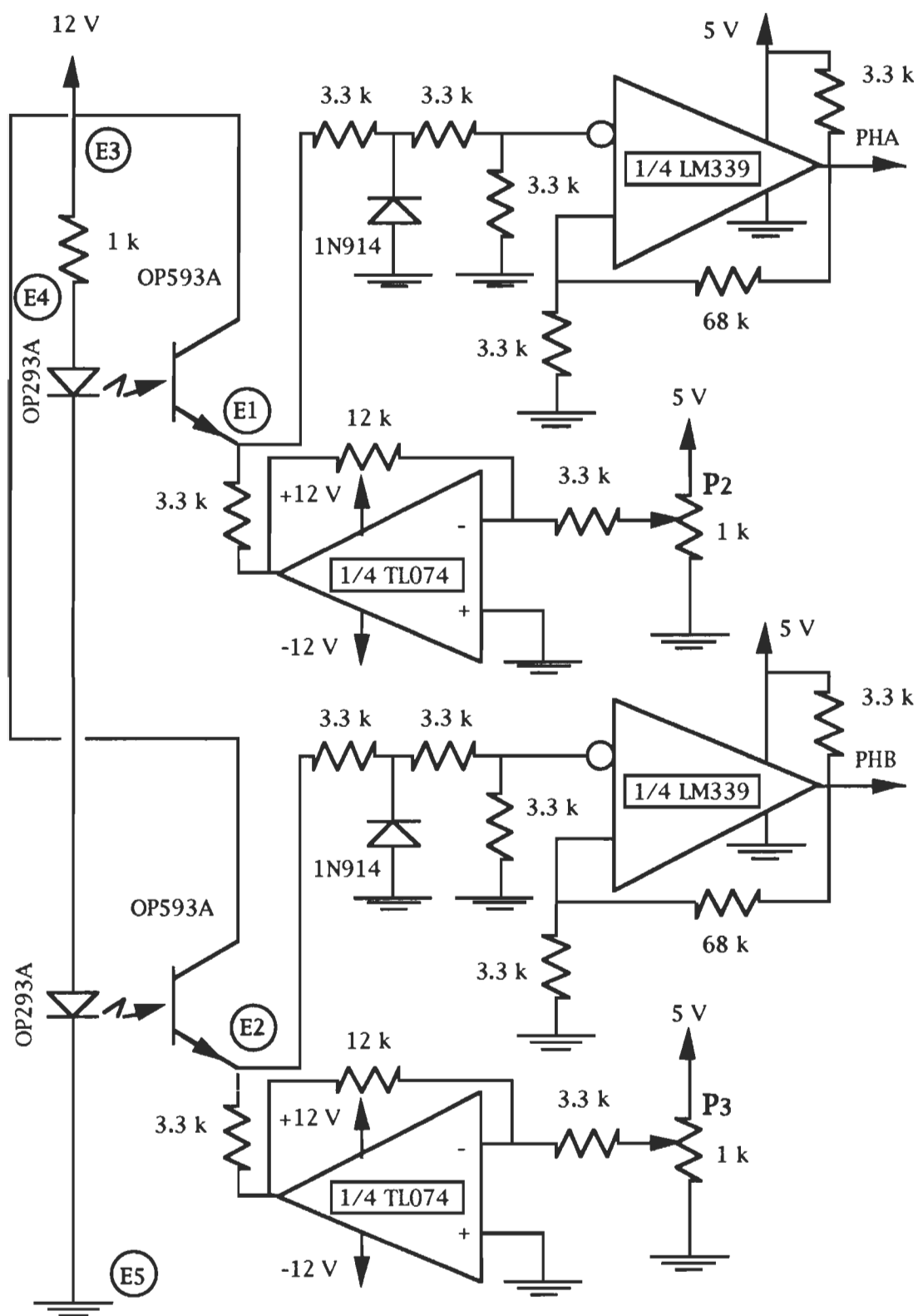
Schémas électriques pertinents *
et dessin du circuit imprimé

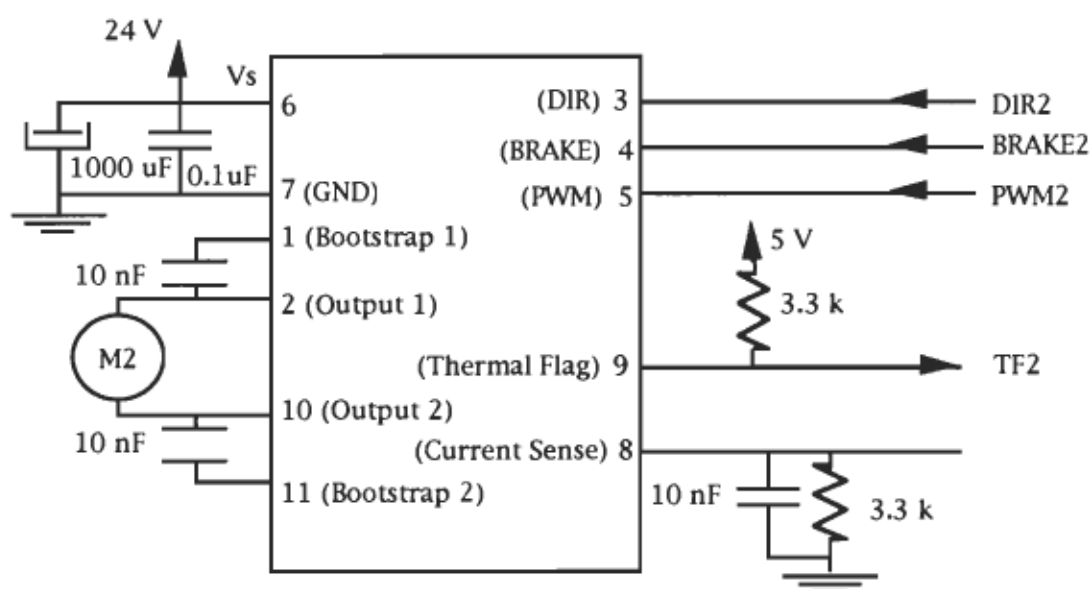
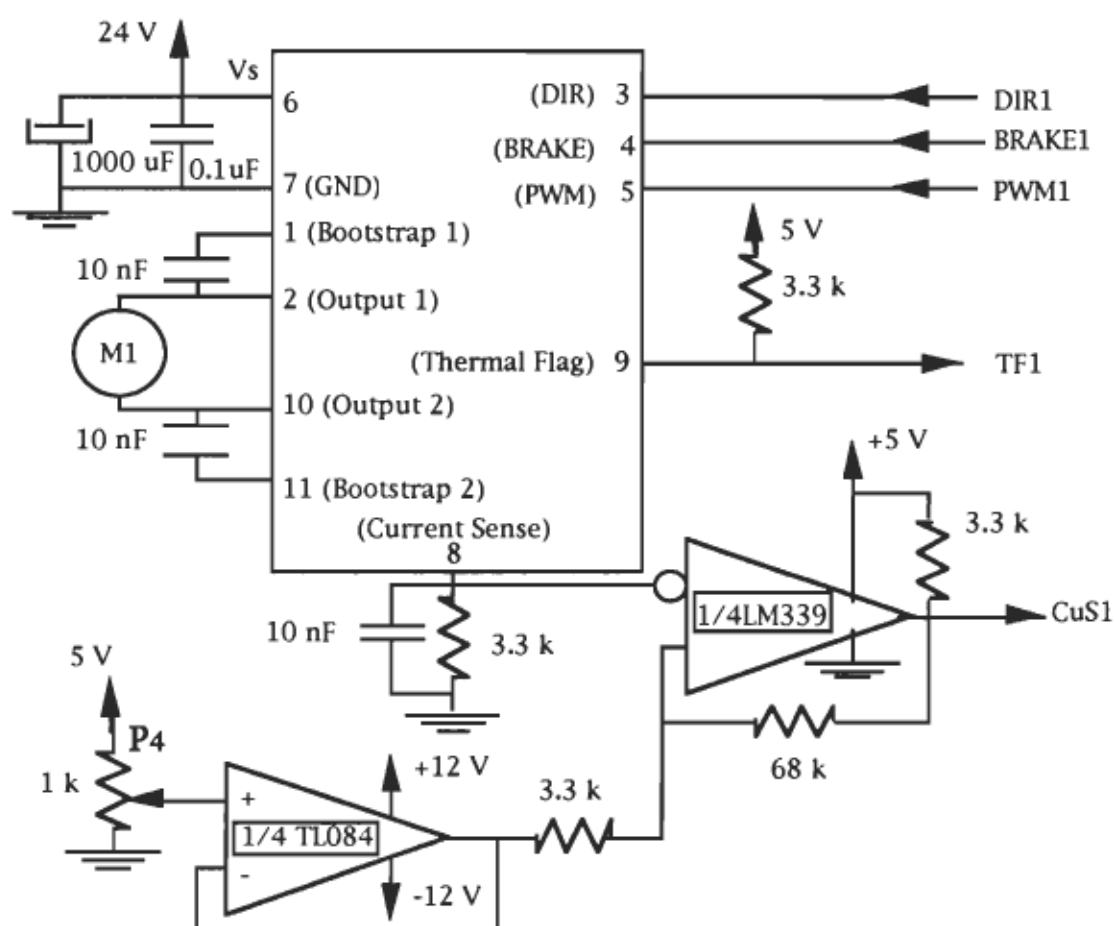
- DIR1: Signal de commande de direction de l'interface de puissance du moteur de prépositionnement.
- BRAKE1: Signal de commande de désactivation de l'interface de puissance du moteur de prépositionnement.
- PWM1: Sortie de commande PWM de l'interface de puissance du moteur de prépositionnement.
- CuS1: Signal de détection de seuil de courant, provenant de l'interface de puissance du moteur de prépositionnement.
- DIR2: Signal de commande de direction de l'interface de puissance du moteur de pincement.
- BRAKE2: Signal de commande de désactivation de l'interface de puissance du moteur de pincement.
- PWM2: Sortie de commande PWM de l'interface de puissance du moteur de pincement.
- PHA **: Signaux d'interruption provenant de l'interface de conditionnement des signaux du disque codeur.
- PHB **: Signaux de sens de rotation provenant de l'interface de conditionnement des signaux du disque codeur.

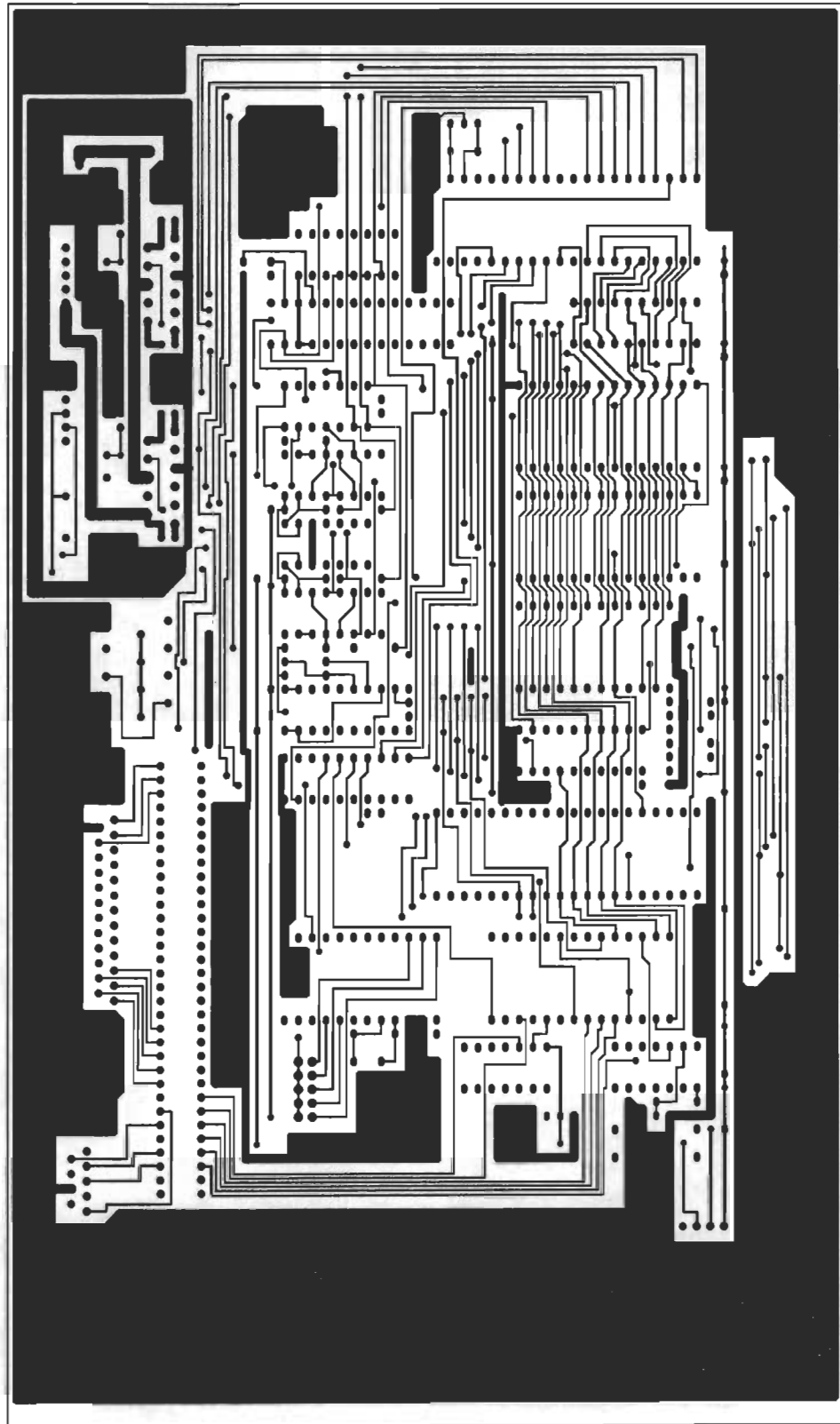
* Certaines interfaces ne sont pas représentées.

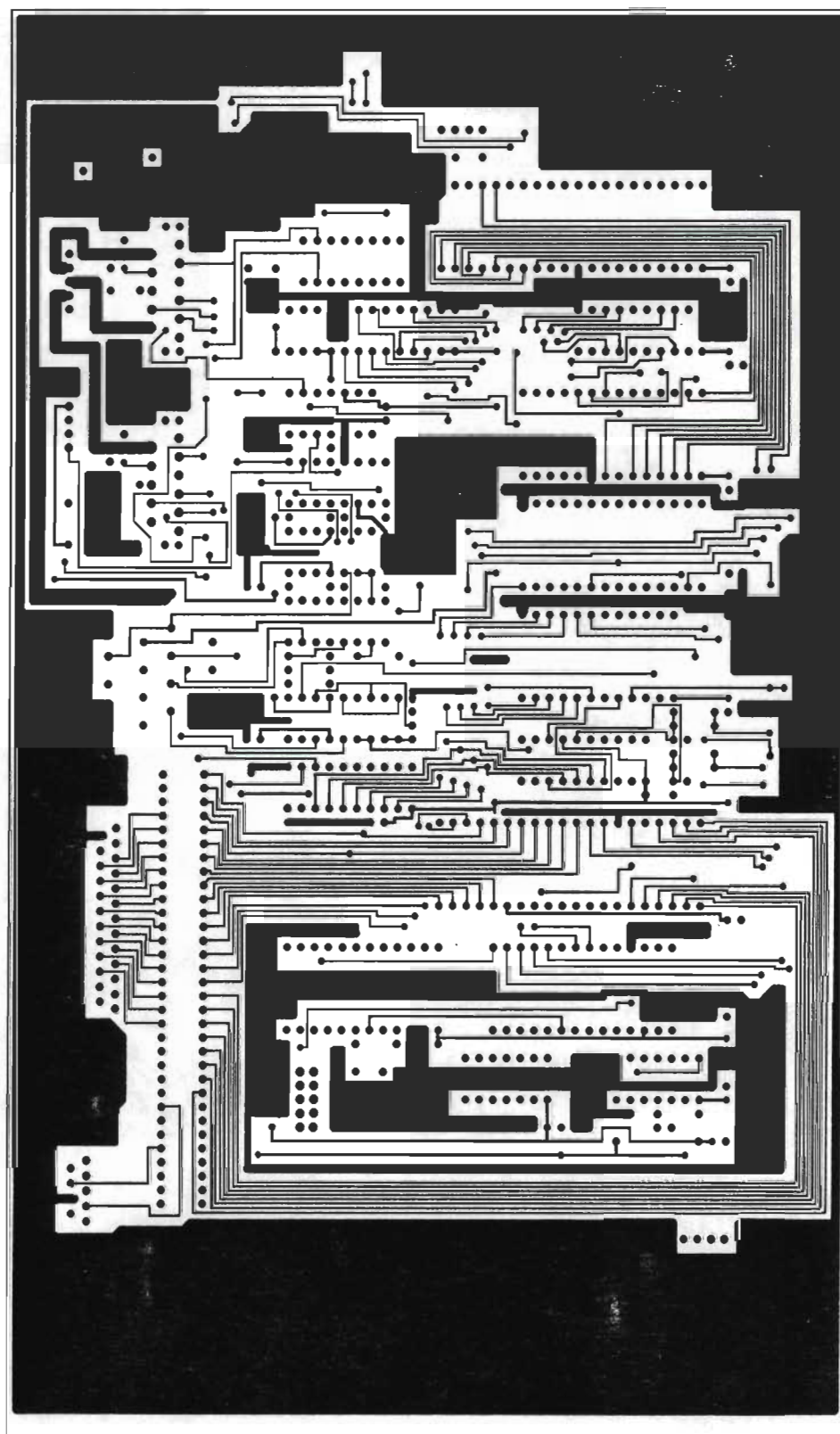
** Les signaux PHA, et PHB, sont traités simultanément (Figure 72).











ANNEXE B

Programmes de simulation

Les programmes qui seront présentés sont essentiellement des programmes de simulation écrits à partir des logiciels MATLAB, version 3.5 et ABEL, version 4.0 . Les deux premiers programmes en MATLAB ont servi à l'étude de l'annulation de la force de manipulation dans le plan de saisie Q ainsi Q qu' à l'étude de déformation des doigts sollicités en flexion. Le reste des programmes en MATLAB ont servi essentiellement à l'étude des boucles de commande. Le dernier programme présenté, écrit à partir du logiciel ABEL, a servi à la programmation de l'interface de gestion d'interruptions. Nous rappelons que les équations et les vecteurs de test de ce dernier programme ont été modifiés adéquatement afin de répondre à nos spécifications. La raison de ces modifications est que le programme pilote disponible (P16L8) au niveau du logiciel est compatible aux "PAL", alors que le boitier que nous utilisons est un "GAL" (GAL16V8A). On précise que les "GAL" ont une polarité programmable, ce qui n'est pas le cas pour les PAL. Ainsi, il a fallu faire une première programmation de test avec les vraies équations, et à partir des résultats des vérifications, nous avons apporté les modifications nécessaires.

```

%=====
%PROGRAMME: SIMULATION POUR VERIFIER L'ANNULATION DE LA
%FORCE DE MANIPULATION DANS LE PLAN DE SAISI.
clear
clc
Hs=[0;0;0];
Hm=[0;0;0;0;0;0];
n=1;
while n <= 8,
    if n == 1,
        k1=0;k2=0;k3=0;
    elseif n == 2,
        k1=0;k2=0;k3=1;
    elseif n == 3,
        k1=0;k2=1;k3=0;
    elseif n == 4,
        k1=0;k2=1;k3=1;
    elseif n == 5,
        k1=1;k2=0;k3=0;
    elseif n == 6,
        k1=1;k2=0;k3=1;
    elseif n == 7,
        k1=1;k2=1;k3=0;
    elseif n == 8,
        k1=1;k2=1;k3=1;
    end

a=1/2;
b=(sqrt(3))/2;

Bs=[ 0 -a  a ; %Matrice de saisi.
     0  b  b ;
     0  0  0 ;
    -1  0 -a ;
     0  0 -b ;
     0  0  0 ;
     1  a  0 ;
     0 -b  0 ;
     0  0  0 ];

Bm=[ 0 -(1-k2)*b k3*b 0 0 0 ; %Matrice de
     0 (1-k2)*a k3*a 0 0 0 ; %manipulation.
     0 0 0 1 0 0 ;
    -k1*b 0 0 0 0 0 ;
    k1*a 0 -(1-k3) 0 0 0 ;
     0 0 0 0 1 0 ;
    (1-k1)*b 0 0 0 0 0 ;
    (1-k1)*a -k2 0 0 0 0 ;
     0 0 0 0 0 1 ];

```

```

B=[Bs Bm];

F=[0;1;0;-b;-a;0;b;-a;0]; %Vecteur force totale
                             %normalisee.

clc
K=[k1 k2 k3];
H=(inv(B))*F;

    for i=1:3,
        Hs(i)=H(i);
    end

    for i=4:9,
        Hm(i-3)=H(i);
    end

Fs=Bs*Hs;
Fm=Bm*Hm;

[H Fs Fm]
pause
n=n+1;
end
%=====

%PROGRAMME D'ETUDE DE L'EVOLUTION DE LA CONTRAINTE SUR LES
%FIBRES EXTREMES DES DOIGTS
clear
clc
FO=100; %Force maximale aux bouts des doigts (en N).
XI=3.032*2.54e-2; %Abscisse: point d'application de la force
                  %de traction du cable sur le doigt mobile.
XI1=2.75*2.54e-2; %Abscisse: reaction sur les doigts semi-
                  %mobiles.
XO=5.375*2.54e-2; %Abscisse: point d'application de la force
                  %de reaction au bout des doigts (en m).
e=0.250*2.54e-2; %Epaisseur des doigts.

x=0:0.001:XO;
for i=1:137,

%CONTRAINTES SUR DOIGT MOBILE
%-----
    if x(i) <= XI,
        h=1.75*2.54e-2; %Hauteur de la section.
        Sigma(i)=(6*FO*((XO/XI)-1)*x(i))/(e*h^2);
    elseif x(i) > XI & x(i) <= 3.5*2.54e-2,
        h=1.75*2.54e-2; %Hauteur de la section.
        Sigma(i)=(6*FO*(XO-XI-(x(i)-XI)))/(e*h^2);
    elseif x(i) > 3.5*2.54e-2,

```

```

        h=-0.5*x(i) + 3.5*2.54e-2; % Hauteur de la section.
        Sigma(i)=(6*FO*(XO-XI-(x(i)-XI)))/(e*h^2);
    end

%CONTRAINTES SUR DOIGTS SEMI-MOBILES
%-----
    if x(i) <= XI1,
        h=1.75*2.54e-2; %Hauteur de la section.
        Sigma1(i)=(6*FO*((XO/XI1)-1)*x(i))/(e*h^2);
    elseif x(i) > XI1 & x(i) <= 3.5*2.54e-2,
        h=1.75*2.54e-2; % Hauteur de la section.
        Sigma1(i)=(6*FO*(XO-XI1-(x(i)-XI1)))/(e*h^2);
    elseif x(i) > 3.5*2.54e-2,
        h=-0.5*x(i) + 3.5*2.54e-2; % Hauteur de la section.
        Sigma1(i)=(6*FO*(XO-XI1-(x(i)-XI1)))/(e*h^2);
    end

end

%COURBES
%-----
plot(x,1e-6*Sigma,x,1e-6*Sigma1)
title('EVOLUTION DE LA CONTRAINTES SUR FIBRES EXTREMES')
xlabel('abscisse de la section en m')
ylabel('contrainte en Mpa')
text(0.01,3.3,'Contrainte maximale = 3.1814 Mpa')
text(0.04,1.0,'_____ Doigt Mobile')
text(0.04,0.5,'----- Doigts semi-mobiles')
grid
%meta sigm %Formattage du graphique.
%!gpp sigm.met/dps/fprn %Sortie du graphique sur Laser.
%=====

%PROGRAMME: COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT, REPONSE
%INDICIELLE DU SECOND ORDRE ET PREMIER ORDRE EQUIVALENT.
clear
clg
i=sqrt(-1);
Vcc=24; %Tension d'alimentation du pont H.
Ra=8.19; %Resistance de l'induit du moteur.
La=5.96e-3; %Inductance de l'induit du moteur.
Kt=0.0388; %Constante de couple du moteur.
Ke=0.0388; %Constante de tension du moteur.
Jm=2.75e-6; %Moment d'inertie du moteur.
Dm=0.76e-6; %Coefficient de frottement visqueux
%du moteur.
Jl=0.8832e-6; %Moment d'inertie de la charge.
Dl=69.24e-6; %Coefficient de frottement visqueux
%de la charge.
Kc=30/pi; %Gain du disque codeur.

```

```

Ka=Vcc/256;      %Gain de l'amplificateur PWM.
J=Jm+Jl;
D=Dm+Dl;

t1=0:0.001:0.15;
num=[Kt];
den=[La*J Ra*J+La*D Kt*Ke+Ra*D];
y=step(num,den,t1);
K=max(y);          %Valeur maximale.
ymax63=(1-exp(-1))*K; %Valeur correspondant a taueq.

% RECHERCHE DE LA CONSTANCE DE TEMPS EQUIVALENT
%-----
n=0;
for i=1:31,
    if y(i) >= 11 & y(i) <= 13
        n=n+1;
        matrice(n,1)=t1(i);
        matrice(n,2)=y(i);
    end
end
matrice;
taueq=0.01455;
a=1/taueq;

% VERIFICATION PAR LE PREMIER ORDRE EQUIVALENT
%-----
num1=[K*a];
den1=[1 a];
y1=step(num1,den1,t1);

%COURBES
%-----
plot(t1,y,t1,y1)
title('ECHELON: 2eme ordre et 1er ordre equivalent')
xlabel('TEMPS EN sec.')
ylabel('g2(t) et g2s(t)')
text(0.02,8,'_____ 2eme ordre G2(S)')
text(0.02,6,'----- 1er ordre equivalent G2s(s)')
text(0.02,4,'          K = 18.6648')
text(0.02,2,'          a = 1/taueq')
grid
%meta gtetasi
%!gpp gtetasi.met/dps/fprn
%=====

%PROGRAMME: COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT, COURBES DE
%BODE EN BOUCLE OUVERTE SANS COMPENSATEUR ET AVEC UN
%COMPENSATEUR DE GAIN Kpid.
clear

```

```

clg
i=sqrt(-1);
Vcc=24;
Ra=8.19;
La=5.96e-3;
Kt=0.0388;
Ke=0.0388;
Jm=2.75e-6;
Dm=0.76e-6;
Jl=0.8832e-6;
Dl=69.24e-6;
Kc=30/pi;
Ka=Vcc/256;
K=18.6648;           %Gain du premier ordre equivalent.
a=1/0.01455;
Kpid=1;%30;          %Gain du compensateur PID.
J=Jm+Jl;
D=Dm+Dl;

w=1:1:900;
tauamax=85e-6;
for n=1:900;
    s=i*w(n);

% COURBE DE BODE POUR taua=0
%-----
    G0=(Ka*Kc*K*Kpid*a)/(s*(s+a));
    Preel(n)=real(G0);
    Pimag(n)=imag(G0);
    Modul0(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi0(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase0(n)=Phi0(n)-180;
    else
        Phase0(n)=Phi0(n);
    end

% COURBE DE BODE POUR taua=tauamax
%-----
    G85=(Ka*Kc*K*Kpid*a)/(s*(tauamax*s+1)*(s+a));
    Preel(n)=real(G85);
    Pimag(n)=imag(G85);
    Modul85(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi85(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase85(n)=Phi85(n)-180;
    else
        Phase85(n)=Phi85(n);
    end
end

```



```

%COURBES
%-----
loglog(w,Modul0,w,Modul85)
title('BODE:AMPLITUDE ET PHASE EN BOUCLE OUVERTE')
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('GAIN ABSOLU')
%text(4,6,'|GB01(s)|')
text(4,6,'|Kpid.GB01(s)|')
%text(1.5,0.03,'Avec un gain Kpid=30')
grid
%meta gbof
semilogx(w,Phase0,w,Phase85)
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('PHASE EN DEGRE')
text(2,-130,'_____ Retard nul')
text(2,-140,'----- Retard maximal: 85e-6 sec.')
%text(7,-120,'MP=77')
text(80,-170,'MP=20')
grid
%meta gbof
%!gpp gbof.met/dps/fprn
%=====

%PROGRAMME: COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT, COURBES DE
%BODE EN BOUCLE OUVERTE AVEC COMPENSATEUR.
clear
clg
i=sqrt(-1);
Vcc=24;
Ra=8.19;
La=5.96e-3;
Kt=0.0388;
Ke=0.0388;
Jm=2.75e-6;
Dm=0.76e-6;
Jl=0.8832e-6;
Dl=69.24e-6;
Kc=30/pi;
Ka=Vcc/256;
K=18.6648;
a=1/0.01455;

Kpid=30;           %PARAMETRES DU COMPENSATEUR
b=200;
c=400;

J=Jm+Jl;
D=Dm+Dl;
w=1:1:900;
tauamax=85e-6;

```

```

for n=1:900;
    s=i*w(n);

% COURBE DE BODE POUR taua=0
%-----
    G0=(Kpid*(s+b)/(s+c))*((Ka*Kc*K*a)/(s*(s+a)));
    Preel(n)=real(G0);
    Pimag(n)=imag(G0);
    Modul0(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi0(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase0(n)=Phi0(n)-180;
    else
        Phase0(n)=Phi0(n);
    end

% COURBE DE BODE POUR taua=tauamax
%-----

G85=(Kpid*(s+b)/(s+c))*((Ka*Kc*K*a)/(s*(tauamax*s+1)*(s+a)));
    Preel(n)=real(G85);
    Pimag(n)=imag(G85);
    Modul85(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi85(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase85(n)=Phi85(n)-180;
    else
        Phase85(n)=Phi85(n);
    end

end

%COURBES
%-----
loglog(w,Modul0,w,Modul85)
title('BODE:AMPLITUDE ET PHASE EN BOUCLE OUVERTE')
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('GAIN ABSOLU')
text(10,50,'|GBO2(s)|')
grid
%meta gbof
semilogx(w,Phase0,w,Phase85)
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('PHASE EN DEGRE')
text(2,-120,'_____ Retard nul')
text(2,-130,'----- Retard maximal: 85e-6 sec.')
text(40,-160,'MP=43')
grid
%meta gbof
%!gpp gbof.met/dps/fprn
%=====

```

```
%PROGRAMME: COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT, COURBES DE BODE
%EN BOUCLE FERMEE AVEC ET SANS COMPENSATEUR.
```

```
clear
clg
i=sqrt(-1);
Vcc=24;
Ra=8.19;
La=5.96e-3;
Kt=0.0388;
Ke=0.0388;
Jm=2.75e-6;
Dm=0.76e-6;
Jl=0.8832e-6;
Dl=69.24e-6;
Kc=30/pi;
Ka=Vcc/256;
K=18.6648;
a=1/0.01455;

Kpid=1;%30;
b=0;%200;
c=0;%400;

J=Jm+Jl;
D=Dm+Dl;
w=1:1:900;
tauamax=85e-6;
for n=1:900;
    s=i*w(n);

% COURBE DE BODE POUR taua=0
%-----
    G =(Kpid*(s+b)/(s+c))*((Ka*K*a)/(s*(s+a)));
    G0=G/(1+Kc*G);
    Preel(n)=real(G0);
    Pimag(n)=imag(G0);
    Modul0(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi0(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase0(n)=Phi0(n)-180;
    else
        Phase0(n)=Phi0(n);
    end

% COURBE DE BODE POUR taua=tauamax
%-----
    G
    =(Kpid*(s+b)/(s+c))*((Ka*K*a)/(s*(tauamax*s+1)*(s+a)));
    G85=G/(1+Kc*G);
    Preel(n)=real(G85);
    Pimag(n)=imag(G85);
```

```

        Modul85(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
        Phi85(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase85(n)=Phi85(n)-180;
    else
        Phase85(n)=Phi85(n);
    end
end

%COURBES
%-----
loglog(w,Modul0,w,Modul85)
title('BODE:AMPLITUDE ET PHASE EN BOUCLE FERMEE')
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('GAIN ABSOLU')
grid
%meta gbof
semilogx(w,Phase0,w,Phase85)
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('PHASE EN DEGRE')
text(2,-120,'_____ Retard nul')
text(2,-140,'----- Retard maximal: 85e-6 sec.')
grid
%meta gbof
%!gpp gbof.met/dps/fprn
%=====

%PROGRAMME: COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT, EVOLUTION DES
%POLES EN BOUCLE FERMEE AVEC T (PERIODE D'ECHANTILLONNAGE)
%COMME PARAMETRE.
clear
clg
x=0:0.1:2*pi; %Angle pour la trace du cercle de rayon=1.
Vcc=24;          %Tension d'alimentation du pont H.
Kc=30/pi;        %Gain du disque codeur.
Ka=Vcc/256;      %Gain du bloc amplificateur.
K=18.6648;       %Gain du premier ordre equivalent.
a=1/0.01455;     %Pole du premier ordre equivalent.
Kpid=30;         %Gain du compensateur.
b=200;          %Zero du compensateur.
c=400;          %Pole du compensateur.

T=1e-3; %Initialisation de la periode d'echantillonnage T.
pas=0.125e-3;   %Pas d'incrementation de T.
n=0;            %Initialisation de l'indexe n.
while T <= 10e-3,

    z1=exp(-b*T);
    z2=exp(-c*T);
    z3=exp(-a*T);

```

```

C0=1-z3-a*T*z3;
C1=a*T-1+z3;

Kdz=Kpid*(b/c)*((1-z2)/(1-z1));
Kbo=Kdz*Ka*Kc*K;

% COEFFICIENTS DE LA LOI DE COMMANDE
%-----
COEF=[Kdz;-Kdz*z1;z2] %Coefficient de la loi de commande.

A3=a;
A2=a*(-1-z2-z3)+Kbo*C1;
A1=a*(z3*(1+z2)+z2)+Kbo*(C0-C1*z1);
A0=-a*z2*z3-Kbo*C0*z1;

A=[A3 A2 A1 A0]; %Equation caracteristique.
PBFZ=roots(A); %Zeros de l'equation caracteristique.

reel=[real(PBFZ(1));real(PBFZ(2));real(PBFZ(3))];
imagi=[imag(PBFZ(1));imag(PBFZ(2));imag(PBFZ(3))];

    for i=1:3,
        n=n+1;
        preel(n)=reel(i);
        pimag(n)=imagi(i);
    end
T=T+pas;
end

%COURBES
%-----
axis('square')
plot(sin(x),cos(x),preel,pimag,'*')
title('LIEU DES POLES: PARAMETRE = T ')
text(0.75,0,'T=1ms')
text(-0.2,0,'T=10ms')
text(0,0.9,'T=10ms')
text(0,-0.95,'T=10ms')
grid
%meta pole
%!gpp pole.met/dps/fprn
%=====

%PROGRAMME: COMMANDE DE PINCEMENT,COURBES DE BODE EN BOUCLE
%OUVERTE.
clear
clg
i=sqrt(-1);
Vcc=24; %Tension d'alimentation du pont H.
Ra=10.8; %Resistance d'induit du moteur.

```

```

La=5.40e-3;           %Inductance d'induit du moteur.
Kt=0.0217;           %Constante de couple du moteur.

N=187;               %Rapport de reduction.
re= 0.59;            %Rendement du reducteur.
rp=0.500*2.54e-2;    %Rayon de la poulie de traction.

L=1.782*2.54e-2;     %Longueur du corps d'epreuve en acier.
a=0.500*2.54e-2;     %Position des jauges sur le corps
                    %d'epreuve.
e=0.250*2.54e-2;     %Epaisseur du corps d'epreuve.
h=0.380*2.54e-2;     %Hauteur du corps d'epreuve.
E=205e9;             %Module d'elasticite de l'acier.

Ad=390;              %Gain de l'amplificateur differentiel.
GF=2;                %Facteur de sensibilite de la jauge.
Ka=Vcc/256;          %Gain du pont H de commande.
KFi=(6*GF*5*(L-a))/(E*e*h*h);
Kp=1;                %Gain du compensateur.
Kbo5=(Kp*Kt*N*re*Ad*KFi*Ka)/(La*rp); %gain en boucle ouverte.

w=10:10:8000;
tauamax=85e-6;
for n=1:800;
    s=i*w(n);

% COURBE DE BODE POUR taua=0
%-----
    G0=Kbo5/(s+Ra/La);
    Preel(n)=real(G0);
    Pimag(n)=imag(G0);
    Modul0(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi0(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase0(n)=Phi0(n)-180;
    else
        Phase0(n)=Phi0(n);
    end

% COURBE DE BODE POUR taua=tauamax
%-----
    G85=Kbo5/((1+tauamax*s)*(s+Ra/La));
    Preel(n)=real(G85);
    Pimag(n)=imag(G85);
    Modul85(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi85(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase85(n)=Phi85(n)-180;
    else
        Phase85(n)=Phi85(n);
    end
end

```

```

end

%COURBES
%-----
loglog(w,Modul0,w,Modul85)
title('BODE:AMPLITUDE ET PHASE EN BOUCLE OUVERTE')
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('GAIN ABSOLU')
%text(1000,0.011,'|GBO5(s)|')
%text(20,0.011,'0.0103')
%text(20,0.005,'_____ Retard nul')
%text(20,0.003,'----- Retard maximal: 85e-6 sec.')
grid
pause
%meta gbof
semilogx(w,Phase0,w,Phase85)
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('PHASE EN DEGRE')
%text(20,-60,'_____ Retard nul')
%text(20,-80,'----- Retard maximal: 85e-6 sec.')
grid
%meta gbof
%!gpp gbof.met/dps/fprn
%=====

%PROGRAMME: COMMANDE DE PINCEMENT,COURBES DE BODE EN BOUCLE
%FERMEE.
clear
clg
i=sqrt(-1);
Vcc=24;
Ra=10.8;
La=5.40e-3;
Kt=0.0217;
N=187;
re= 0.59;
rp=0.500*2.54e-2;
L=1.782*2.54e-2;
a=0.500*2.54e-2;
e=0.250*2.54e-2;
h=0.380*2.54e-2;
E=205e9;
Ad=390;
GF=2;
Kp=1;
Ka=Vcc/256;
KFi=(6*GF*5*(L-a))/(E*e*h*h);
Kbo5p=(Kp*Kt*N*re*Ka)/(La*rp); %gain de la chaine directe

w=10:10:8000;

```

```

tauamax=85e-6;
for n=1:800;
    s=i*w(n);

% COURBE DE BODE POUR taua=0
%-----
    G =Kbo5p/(s+Ra/La);
    G0=G/(1+Ad*KFi*G);
    Preel(n)=real(G0);
    Pimag(n)=imag(G0);
    Modul0(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi0(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase0(n)=Phi0(n)-180;
    else
        Phase0(n)=Phi0(n);
    end

% COURBE DE BODE POUR taua=tauamax
%-----
    G =Kbo5p/((tauamax*s+1)*(s+Ra/La));
    G85=G/(1+Ad*KFi*G);
    Preel(n)=real(G85);
    Pimag(n)=imag(G85);
    Modul85(n)=sqrt(Preel(n)^2 + Pimag(n)^2);
    Phi85(n)=(180/pi)*(atan(Pimag(n)/Preel(n)));
    if Preel(n) < 0,
        Phase85(n)=Phi85(n)-180;
    else
        Phase85(n)=Phi85(n);
    end

end

%COURBES
%-----
loglog(w,Modul0,w,Modul85)
title('BODE:AMPLITUDE ET PHASE EN BOUCLE FERMEE')
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('GAIN ABSOLU')
text(20,1.8,'1.6198')
text(20,0.3,'_____ Retard nul')
text(20,0.2,'----- Retard maximal: 85e-6 sec.')
grid
pause
%meta gbof
semilogx(w,Phase0,w,Phase85)
xlabel('PULSATION w EN rad/s')
ylabel('PHASE EN DEGRE')
text(20,-60,'_____ Retard nul')
text(20,-80,'----- Retard maximal: 85e-6 sec.')

```



```

grid
%meta gbof
%!gpp gbof.met/dps/fprn
%=====

%PROGRAMME: COMMANDE DE PINCEMENT, EVOLUTION DES POLES
%EN BOUCLE FERMEE, AVEC T (PERIODE D'ECHANTILLONNAGE)
%COMME PARAMETRE.
clear
clg
x=0:0.1:2*pi;
Vcc=24;
Ra=10.8;
La=5.40e-3;
Kt=0.0217;
N=187;
re= 0.59;
rp=0.500*2.54e-2;
L=1.782*2.54e-2;
a=0.500*2.54e-2;
e=0.250*2.54e-2;
h=0.380*2.54e-2;
E=205e9;
Ad=390;
GF=2;
Ka=Vcc/256;
KFi=(6*GF*5*(L-a))/(E*e*h*h);
KGF=(Kt*N*re)/(La*rp);
K6=Ka*KGF*KFi*Ad;

n=0;
Kp=1;
for T1=20e-6:1e-6:48e-6,
    n=n+1;
    z5=exp((-Ra/La)*T1);
    z61=z5*(1+Kp*K6)-Kp*K6;
    preel1(n)=real(z61);
    pimagl(n)=imag(z61);
end

m=0;
Kp=1/4;
for T2=20e-6:1e-6:190e-6,
    m=m+1;
    z5=exp((-Ra/La)*T2);
    z62=z5*(1+Kp*K6)-Kp*K6;
    preel2(m)=real(z62);
    pimagl2(m)=imag(z62);
end

```

```

%COURBES
%-----
axis('square')
plot(sin(x),cos(x),preel1,pimag1,'*')
title('LIEU DES POLES AVEC Kp=1: PARAMETRE = T ')
text(-0.9,0.05,'T=48   s')
text(0.2,0.05,'T=20   s')
grid
pause
%meta pole
axis('square')
plot(sin(x),cos(x),preel2,pimag2,'*')
title('LIEU DES POLES AVEC Kp=1/4: PARAMETRE = T ')
text(-0.9,0.05,'T=190   s')
text(0.7,0.05,'T=20   s')
grid
%meta pole
%!gpp pole.met/dps/fprn
%=====

```

```

Module  GALINT
Title   'PROGRAMMATION DE L'INTERFACE DE GESTION DES
        INTERRUPTION PROVENANT DES INTERFACES DE
        COMMUNICATION ET DE PUISSANCE.
        PAR MESSAN AFANDE, U.Q.T.R., '
Declarations
    @Message 'Type de GAL a programmer'
                GALINT device      'P16L8';

    @Message 'Variables_Entrees'

    PI12,CS,RD,INTRA,INTB,TxRDY,RxRDY  pin 1,2,3,4,5,6,7;
    TF1,TF2,EMUS                      pin 8,9,11      ;

    @Message 'Variables_Sorties'
    INTRG,D0,D1,D2                    pin 12,19,18,17;
    D3,D4,D5,D6                      pin 16,15,14,13;

    @Message 'Constantes'
    H,L,X,Z      = 1,0,.X.,.Z.;

    @Message 'Equations modifiees'
Equations

    INTRG.OE =PI12;
    INTRG     =INTRA#INTB#TxRDY#RxRDY#(!TF1)#(!TF2);

    D0.OE     = (!RD)&(!CS);
    D0        = !INTRA;

    D1.OE     = (!RD)&(!CS);
    D1        = !INTB;

    D2.OE     = (!RD)&(!CS);
    D2        = !TxRDY;

    D3.OE     = (!RD)&(!CS);
    D3        = !RxRDY;

    D4.OE     = (!RD)&(!CS);
    D4        = TF1;

    D5.OE     = (!RD)&(!CS);
    D5        = TF2;

    D6.OE     = (!RD)&(!CS);
    D6        = !EMUS;

Test_Vectors  'SORTIE D"INTERRUPTION INTRG'

```

```

([PI12, INTRA, INTB, TxRDY, RxRDY, TF1, TF2] -> [INTRG])
[ 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 1 , 1 ] -> [ Z ];
[ 0 , 1 , 0 , 0 , 0 , 1 , 1 ] -> [ Z ];
[ 0 , 0 , 1 , 0 , 0 , 1 , 1 ] -> [ Z ];
[ 0 , 0 , 0 , 1 , 0 , 1 , 1 ] -> [ Z ];
[ 0 , 0 , 0 , 0 , 1 , 1 , 1 ] -> [ Z ];
[ 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 1 ] -> [ Z ];
[ 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 1 , 0 ] -> [ Z ];
[ 1 , 0 , 0 , 0 , 0 , 1 , 1 ] -> [ 0 ];
[ 1 , 1 , 0 , 0 , 0 , 1 , 1 ] -> [ 1 ];
[ 1 , 0 , 1 , 0 , 0 , 1 , 1 ] -> [ 1 ];
[ 1 , 0 , 0 , 1 , 0 , 1 , 1 ] -> [ 1 ];
[ 1 , 0 , 0 , 0 , 1 , 1 , 1 ] -> [ 1 ];
[ 1 , 0 , 0 , 0 , 0 , 0 , 1 ] -> [ 1 ];
[ 1 , 0 , 0 , 0 , 0 , 1 , 0 ] -> [ 1 ];

```

Test_Vectors 'SORTIE D0 '

```

([CS, RD, INTRA] -> [D0 ])
[ 0, 0, 0 ] -> [ 1 ];
[ 0, 0, 1 ] -> [ 0 ];
[ 0, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 0, 1, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 1 ] -> [ Z ];

```

Test_Vectors 'SORTIE D2 '

```

([CS, RD, TxRDY] -> [D2 ])
[ 0, 0, 0 ] -> [ 1 ];
[ 0, 0, 1 ] -> [ 0 ];
[ 0, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 0, 1, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 1 ] -> [ Z ];

```

Test_Vectors 'SORTIE D3 '

```

([CS, RD, RxRDY] -> [D3 ])
[ 0, 0, 0 ] -> [ 1 ];
[ 0, 0, 1 ] -> [ 0 ];

```

```

[ 0, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 0, 1, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 1 ] -> [ Z ];

```

Test_Vectors 'SORTIE D1 '

([CS,RD,INTB] -> [D1])

```

[ 0, 0, 0 ] -> [ 1 ];
[ 0, 0, 1 ] -> [ 0 ];
[ 0, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 0, 1, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 1 ] -> [ Z ];

```

Test_Vectors 'SORTIE D4 '

([CS,RD, TF1] -> [D4])

```

[ 0, 0, 0 ] -> [ 0 ];
[ 0, 0, 1 ] -> [ 1 ];
[ 0, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 0, 1, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 1 ] -> [ Z ];

```

Test_Vectors 'SORTIE D5 '

([CS,RD, TF2] -> [D5])

```

[ 0, 0, 0 ] -> [ 0 ];
[ 0, 0, 1 ] -> [ 1 ];
[ 0, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 0, 1, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 1 ] -> [ Z ];

```

Test_Vectors 'SORTIE D6 '

```
( [CS, RD, EMUS ] -> [D6 ] )
```

```

[ 0, 0, 0 ] -> [ 1 ];
[ 0, 0, 1 ] -> [ 0 ];
[ 0, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 0, 1, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 0, 1 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 0 ] -> [ Z ];
[ 1, 1, 1 ] -> [ Z ];

```

```
End GALINT
```

ANNEXE C

Fichier source du logiciel de commande

Le logiciel de commande à été développé en assembleur, ASM51. L'ordre de présentation des programmes ne suit pas la hiérarchie par niveau établie au chapitre 7. Comme nous l'avons déjà mentionné, on notera que la plupart des programmes ne sont pas scrupuleusement conformes aux organigrammes déjà établis; ceci à cause de certaines considérations pratiques qui surgissent lors de la programmation. On rappelle que les organigrammes R_FORCE et MOD_INT0 n'ont pas été traduits en assembleur.

```
;=====
$TITLE(LOGICIEL DE COMMANDE:PREPOSITIONNEMENT, PAR M. AFANDE)
;=====
```

```
;DEBUT DE LA DEFINITION DE REGISTRES,
;DE VARIABLES ET DE BIT.
```

```
CCON      DATA 0D8H
CMOD      DATA 0D9H
CCAPM0    DATA 0DAH
CCAPM1    DATA 0DBH
CCAPM2    DATA 0DCH
CCAPM3    DATA 0DDH
CCAPM4    DATA 0DEH
CCAP2L    DATA 0ECH
CCAP2H    DATA 0FCH
CCAP3L    DATA 0EDH
CCAP3H    DATA 0FDH
```

```
;DEFINITION DES REGISTRES
;NON RECONNUS PAR
;L'ASSEMBLEUR.
```

```
MC        EQU    R7      ;COMPTEUR DE CARACTERES RECUS.
                        ;PENDANT LA COMMUNICATION.
U0H       DATA 32      ;VARIABLE DE COMMANDE: MSB ET LSB.
U0L       DATA 50
E0VH     DATA 33      ;ECART DE COMMANDE (POC2 - PO0),
E0VL     DATA 51      ;MSB ET LSB.
POC1H    DATA 34      ;POSITION CONSIGNE REELLE,
POC1L    DATA 52      ;MSB ET LSB.
RESUPH   DATA 35      ;VARAIBLE DE CALCUL: RESULTAT PARTIEL
RESUPL   DATA 53      ;MSB ET LSB.
MBIT1    DATA 36      ;BYTES DEFINIS DANS L'ESPACE BIT
MBIT2    DATA 37      ;ADRESSABLE DU MICROCONTROLEUR
MBIT3    DATA 38      ;80C51FA.
MORINT1  DATA 39      ;MOT D'IDENTIFICATION:INTERRUPTION 1.
E0RH     DATA 40      ;ECART REEL (POC1 - PO0),
E0RL     DATA 54      ;MSB ET LSB.
PO0L     DATA 55      ;POSITION RELATIVE ACTUELLE PENDANT
PO0H     DATA 56      ;LA COMMANDE: MSB ET LSB.
POAAH    DATA 57      ;POSITION ABSOLUE ACTUELLE: MSB ET LSB
POAAL    DATA 58
POADH    DATA 59      ;POSITION DESIREE: MSB ET LSB
POADL    DATA 60
MO1H     DATA 61      ;VARIABLE DE CALCUL: MSB ET LSB
MO1L     DATA 62
TH1RH    DATA 63      ;VARIABLE DE SAUVEGARDE DU CONTENU
TH1RL    DATA 64      ;DU TIMER 1 POUR LE PROFIL DE VITESSE.
POC2H    DATA 65      ;POSITION CONSIGNE DE COMMANDE PROVENANT
POC2L    DATA 66      ;DU PROFIL DE VITESSE: MSB ET LSB.
POC2TH   DATA 67      ;POSITION CONSIGNE TEMPORAIRE DANS
POC2TL   DATA 68      ;MOD_PROFIL_VITESSE": MSB ET LSB.
POC1PH   DATA 69      ;POSITION CONSIGNE SOUS FORME DE
POC1PL   DATA 70      ;VARIABLE POSITIVE: MSB ET LSB.
PARADIM  DATA 71      ;PARAMETRE DE DIMENSION.
```



```

PARADIM1  DATA    72 ;VARIABLE DE SAUVEGARDE DE PARADIM.
IACC      DATA    73 ;INTERVALLE D'ACCELERATION.
PAS_ACC   DATA    74 ;PAS DU DELAI VARIABLE: ACCELERATION
PAS_DEC   DATA    75 ;PAS DU DELAI VARIABLE: DECELERATION
IDEC      DATA    76 ;INTERVALLE DE DECELERATION.
PARAM     DATA    77 ;BYTE DE RECEPTION:(COMMUNICATION).
EFR       DATA    78
UFR       DATA    79
FCON      DATA    80 ;CONSIGNE DE FORCE.

CMDSTS    XDATA 0000H ;ADRESSE DU CODE DE COMMANDE.
M1        XDATA 0001H ;PREMIER CARACTERE ASCII RECU.
M2        XDATA 0002H ;DEUXIEME CARACTERE ASCII RECU.
M3        XDATA 0003H ;TROISIEME CARACTERE ASCII RECU.

PPICONTR  XDATA 0D003H;ADRESSE DU MOT DE CONTROLE DU
           ;PORT PARALLELE (PPI).
PPIPORTA  XDATA 0D000H;ADRESSE DU PORT A DU PPI.
PPIPORTB  XDATA 0D001H;ADRESSE DU PORT B DU PPI.
PPIPORTC  XDATA 0D002H;ADRESSE DU PORT C DU PPI.
USARTCONT XDATA 0E001H;ADRESSE DU MOT DE CONTROLE DU
           ;PORT DE COMMUNICATION SERIE.
USARTDSTS XDATA 0E000H;ADRESSE DE DONNEE DU PORT DE
           ;DE COMMUNICATION SERIE.
GAL16V8A  XDATA 0F000H;ADRESSE DE BASE DE L'INTERFACE
           ;DE GESTION D'INTERRUPTION.

BARRET    BIT      MBIT1.0 ;BIT DE FIN DE PREPOSITIONNEMENT.
BSU0      BIT      MBIT1.1 ;BIT DE SIGNE: VARIABLE DE COMMANDE.
BSE0V     BIT      MBIT1.2 ;BIT DE SIGNE: ECART DE COMMANDE.
BSPOC     BIT      MBIT1.3 ;BIT DE SIGNE: POSITION CONSIGNE.
BPASSE    BIT      MBIT1.4 ;BIT DE DETECTION LORSQUE LA CONSINE,
           ;EST ATTEINTE POUR LA PREMIERE FOIS.
BUP_DOWN  BIT      MBIT1.5 ;BIT DE DETECTION DU SENS DE ROTATION,
           ;DU MOTEUR DE PREPOSITIONNEMENT.
BSENSROT  BIT      MBIT1.6 ;BIT DE MEMORISATION DU SENS DE ROTA-
           ;TION DU MOTEUR DE PREPOSITIONNEMENT.
BFREINAGE BIT      MBIT1.7

BACC      BIT      MBIT2.0 ;BIT D'ACCELERATION POUR LA COMMANDE
           ;DE PREPOSITIONNEMENT.
BCSAT     BIT      MBIT2.1 ;BIT DE SATURATION DE LA CONSIGNE
           ;PENDANT LE PROFIL DE VITESSE.
BSATU     BIT      MBIT2.2 ;BIT DE DETECTION DE ZERO: FIN DE LA
           ;TABLE DE DELAI.
BPOS_PIN  BIT      MBIT2.3 ;BIT D'ACTIVATION EXCLUSIVE DU PREPO-
           ;SITIONNEMENT OU DU PINCEMENT.
BVCONST   BIT      MBIT2.4 ;BIT DE MARCHE A VITESSE CONSTANTE.
BTRANSMIT BIT      MBIT2.5 ;BIT D'AUTORISATION DE TRANSMISSION.

BFINRECEP BIT      MBIT3.0 ;BIT DE FIN DE RECEPTION.

```

```

BAUTOAJUS BIT MBIT3.1 ;BIT DE COMMANDE DE REFERENCE.
BPASSE1   BIT MBIT3.2
BERREUR   BIT MBIT3.3 ;BIT D'ERREUR EN RECEPTION.
BFCOM     BIT MBIT3.4 ;BIT DE COMMANDE DE FORCE.

BRAKE1     BIT P1.1      ;BIT DE DESACTIVATION DE
                        ;L'INTERFACE DE PUISSANCE DU MOTEUR DE
                        ;PREPOSITIONNEMENT.
DIR1       BIT P1.0      ;BIT DE DIRECTION DU MOTEUR DE
                        ;DE PREPOSITIONNEMENT.
BRAKE2     BIT P3.5      ;BIT DE DESACTIVATION DE
                        ;L'INTERFACE DE PUISSANCE DU MOTEUR DE
                        ;PINCEMENT.
DIR2       BIT P3.4      ;BIT DE DIRECTION DU MOTEUR DE
                        ;PINCEMENT.
PHB        BIT P1.3      ;PHASE A DU DISQUE CODEUR.
PHA        BIT P1.4      ;PHASE B DU DISQUE CODEUR.

PCAMOD1    BIT CCON.1    ;FLAG D'INT. DU MODULE1 PCA.
PCAMOD4    BIT CCON.4    ;FLAG D'INT. DU MODULE4 PCA.
T0RUNBIT   BIT TCON.4    ;BIT DE CONTROLE DU "TIMER 0".
T1RUNBIT   BIT TCON.6    ;BIT DE CONTROLE DU "TIMER 1".
INT0_FLAG  BIT TCON.1    ;FLAG: INTERRUPTION INT0.
INT0_ENB   BIT IE.0      ;BIT D'ACTIVATION: INT0.
INT1_FLAG  BIT TCON.3    ;FLAG: INTERRUPTION INT1.
INT1_ENB   BIT IE.2      ;BIT D'ACTIVATION: INT1
T0_INTENB  BIT IE.1      ;BITS D'ACTIVATION: INTERRUPTION,
T1_INTENB  BIT IE.3      ;DU "TIMER 0" ET "TIMER 1".

RxRDY      BIT MORINT1.0 ;BIT DE RECEPTION USART
TxRDY      BIT MORINT1.2 ;BIT DE TRANSMISSION USART
;RxRDY     BIT MORINT1.3
TFL2       BIT MORINT1.4 ;BIT DE FLAG DE TEMPERATURE
                        ;DE L'INTERFACE DE PUISSANCE 2.
;TFL2      BIT MORINT1.5 ;FIN DE LA DEFINITION DE REGISTRES,
                        ;DE VARIABLES ET DE BITS.

```

```

CSEG ;''CODE SEGMENT''

```

```

ORG 00H
LJMP DEBUT_COM
ORG 0BH
LJMP MOD_COM
ORG 1BH
LJMP MOD_PROFIL_VITESSE
;ORG 03H
;LJMP MOD_INT0
ORG 13H
LJMP MOD_INT1

```

```
ORG 33H
LJMP MOD_IMP_COD
```

```
ORG 64H
```

```
;-----
;TABLE DE COORDONNEES RADIALES
;-----
```

```
CORAD:
```

```
DW 70H,9EH,0C2H,0E0H,0FAH,112H,129H,13DH,151H
DW 164H,175H,186H,197H,1A6H,1B6H,1C4H,1D3H,1E1H
DW 1EEH,1FCH,209H,215H,222H,22EH,23AH,246H,252H
DW 25DH,269H,274H,27FH,28AH,295H,29FH,2AAH,2B4H
DW 2BEH,2C8H,2D3H,2DDH,2E6H,2F0H,2FAH,304H,30DH
DW 317H,320H,329H,333H,33CH,345H,34EH,357H,360H
DW 369H,372H,37BH,384H,38DH,395H,39EH,3A7H,3AFH
DW 3B8H,3C0H,3C9H,3D1H,3DAH,3E2H,3EBH,3F3H,3FCH
DW 404H,40CH,415H,41DH,425H,42DH,436H,43EH,446H
DW 44EH,456H,45FH,467H,46FH,477H,47FH,487H,48FH
DW 498H,4A0H,4A8H,4B0H,4B8H,4C0H,4C8H,4D1H,4D9H
DW 4E1H,4E9H,4F1H,4F9H,501H,50AH,512H,51AH,522H
DW 52AH,533H,53BH,543H,54BH,554H,55CH,564H,56DH
DW 575H,57EH,586H,58FH,597H,5A0H,5A8H,5B1H,5B9H
DW 5C2H,5CBH,5D3H,5DCH,5E5H,5EEH,5F7H,600H,609H
DW 612H,61BH,624H,62DH,637H,640H,649H,653H,65CH
DW 666H,670H,67AH,683H,68DH,698H,6A2H,6ACH,6B6H
DW 6C1H,6CBH,6D6H,6E1H,6ECH,6F7H,703H,70EH,71AH
DW 726H,732H,73EH,74BH,757H,764H,772H,77FH,78DH
DW 79CH,7AAH,7BAH,7C9H,7DAH,7EBH,7FCH,80FH,823H
DW 837H,84EH,866H,880H,89EH,8C2H,8F0H,960H
```

```
;-----
DEBUT_COM:
;-----
```

```
MOV SP,#90      ;INITIALISATION DU STACK A 91.
CLR TCON.0      ;INT0 SUR NIVEAU BAS.
CLR TCON.2      ;INT1 SUR NIVEAU BAS.
MOV IE,#0CAH    ;AUTORISATION DES INTERRUPTIONS
                ;PCA, TIMER0, TIMER1.
MOV IP,#40H     ;PRIORITE D'INTERRUPTION AU PCA.

MOV TMOD,#11H   ;TIMER0 ET TIMER1 CONFIGURES 16 BITS.
MOV CMOD,#02H   ;FONCTIONNEMENT PWM A F=Fosc/4

MOV CCAPM1,#31H;CONFIGURATION MODULE 1: ENTREE CAPTURE
                ;SUR FRONT MONTANT ET DESCENDANT (PHA)

MOV CCAPM2,#42H;CONFIGURATION: P1.5 EN SORTIE PWM
```

```

MOV  CCAP2L,#255;INITIALISATION DES REGISTRES
MOV  CCAP2H,#255;DE COMMANDE PWM DU MODULE 2.

MOV  CCAPM3,#42H;CONFIGURATION: P1.6 EN SORTIE PWM
MOV  CCAP3L,#255;INITIALISATION DES REGISTRES
MOV  CCAP3H,#255;DE COMMANDE PWM DU MODULE 3.

SETB CCON.6      ;MISE EN MARCHÉ: "PCA TIMER" POUR LA
                  ;COMMANDE PWM.

MOV  P2,#0D0H      ;MOT DE COMMANDE DU PPI 82C55A
MOV  R0,#03H      ;PORT A EN ENTREE, B EN ENTREE
MOV  A,#10110110B  ;(MODE 1).
MOVX @R0,A        ;PC6(AKN) ET PC7 EN SORTIE.

MOV  A,#00000000B  ;BIT RESET: PC0  (INTR B).
MOVX @R0,A

MOV  A,#00000010B  ;BIT RESET: PC1  (IBF B).
MOVX @R0,A

MOV  A,#00000101B  ;BIT SET:   PC2  (INTE B).
MOVX @R0,A

MOV  A,#00001101B  ;BIT SET:   PC6  (AKN).
MOVX @R0,A

MOV  P2,#0D0H      ;REINITIALISATION DU PORTB (PPI)
MOV  R0,#01H      ;PAR UNE LECTURE.
MOVX A,@R0

MOV  P2,#0E0H      ;ADRESSE DE COMMANDE USART:0E001H
MOV  A,#4DH      ;"MODE INSTRUCTION": ASYNCHRONE.
MOV  R0,#01H
NOP
MOVX @R0,A

MOV  A,#14H      ;"COMMAND INSTRUCTION": RECEPTION
MOVX @R0,A      ;(USART).

MOV  MC,#00      ;INITIALISATION: COMPTEUR DE MOTS.
MOV  PARADIM1,#00 ;INITIALISATION: VARIABLE DE
                  ;MEMORISATION DU PARAMETRE DE
                  ;DIMENSION (PARADIM).

MOV  DPTR,#CMDSTS ;INITIALISATION DU POINTEUR
                  ;PAR L'ADRESSE DU CODE DE
                  ;COMMANDE.

CLR  BFCOM
CLR  BERREUR      ;INITIALISATION: BIT D'ERREUR.
CLR  BFINRECEP    ;INITIALISATION: BIT DE FIN DE

```

```

;RECEPTION.
MOV POAAL,#00H ;INITIALISATION DE LA POSITION
MOV POAAH,#00H ;ACTUELLE: REFERENCE ABSOLUE.

SETB INT1_ENB ;AUTORISATION DE L'INTERRUPTION
;EXTERNE INT1.

ATTEND: ;ETIQUETTE D'ATTENTE D'INTERRUPTION.
MOV P2,#0E0H ;ADRESSE DE COMMANDE USART:0E001H.
MOV R0,#01H
NOP
NOP
MOVX A,@R0 ;LECTURE DU STATUT (USART).
ANL A,#10000000B
JZ CONTINUE1 ;DSR = "0" ?

DTR_0:
MOV P2,#0E0H ;ADRESSE DE COMMANDE USART:0E001H.
MOV R0,#01H
NOP
MOV A,#16H ;"COMMAND INSTRUCTION": RECEPTION
MOVX @R0,A ;DTR = "0" (USART).

CONTINUE1:
JNB BERREUR,TEST_RECEP
JMP REINITIALISATION

TEST_RECEP:
JNB BFINRECEP,ATTEND ;ATTENTE D'INTERRUPTION.

DECISION: ;IDENTIFICATION DU SERVICE.
;-----

MOV DPTR,#CMDSTS ;LECTURE DU CODE DE COMMANDE.
MOVX A,@DPTR
JZ PREPOSITIONNEMENT;CMDSTS=0->PREPOSITIONNEMENT
CJNE A,#1,DECI1
JMP PINCEMENT ;CMDSTS=1->PINCEMENT.

DECI1:
CJNE A,#2,DECI2
JMP PARKMODE ;CMDSTS=2->FIN OPERATION.

DECI2:
CJNE A,#3,DECI3
JMP AUTOAJUSTMODE ;CMDSTS=3->AUTOAJUSTMODE.

DECI3:
JMP REINITIALISATION

PREPOSITIONNEMENT: ;DEBUT: COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT.
;-----

```

```

MOV A,PARAM ;LIMITATION ET PRECAUTION
JZ PREPO2 ; 1 <= PARADIM <= 188
CJNE A,#189,PREPO1
PREPO1:
JNC PREPO2
MOV PARADIM,PARAM
LCALL R_PREPOSI ;APPEL DE LA ROUTINE DE COMMANDE
;DU PREPOSITIONNEMENT.
MOV CCAP2L,#255 ;REINITIALISATION DES REGISTRES
MOV CCAP2H,#255 ;DE COMMANDES PWM DU MOTEUR 1.
PREPO2:
JMP REINITIALISATION ;FIN DU PREPOSITIONNEMENT.

PINCEMENT: ;DEBUT DE LA COMMANDE DE PINCEMENT.
;-----

MOV FCON,PARAM
LCALL R_FORCE ;APPEL DE LA COMMANDE DE
;PINCEMENT_RELACHEMENT.
MOV CCAP3L,#255 ;REINITIALISATION DES REGISTRES
MOV CCAP3H,#255 ;DE COMMANDE PWM DU MOTEUR 2.
JMP REINITIALISATION;FIN:PINCEMENT OU RELACHEMENT.

PARKMODE: ;POSITIONNEMENT EN FIN D'OPERATION.
;-----
MOV PARADIM,#80
LCALL R_PREPOSI
MOV CCAP2H,#255
MOV CCAP2L,#255
JMP REINITIALISATION

AUTOAJUSTMODE: ;POSITIONNEMENT DE LA REFERENCE ABSOLUE.
;-----

MOV CCAPM4,#11H ;CONFIGURATION MODULE 4: ENTRE
;CAPTURE SUR FRONT DESCENDANT.
MOV CCAPM1,#00H ;DESACTIVATION TEMPORAIRE DU
; COMPTEUR D'IMPULSIONS.
CLR BPASSE1
CLR BAUTOAJUS ;REINITIALISATION DU BIT D'AUTO-
;CALIBRAGE EN POSITION.
CLR BRAKE1
SETB DIR1
MOV CCAP2H,#150
AJUSTENCOURS:
JNB BAUTOAJUS,AJUSTENCOURS

MOV CCAPM4,#00H ;DESACTIVATION TEMPORAIRE DE

```

;L'INTERRUPTION DU MODULE 4.

```
MOV  CCAPM1,#31H ;REACTIVATION DU MODULE 1 EN MODE
      ;CAPTURE
MOV  PARADIM1,#00H

MOV  POAAL,#00H  ;INITIALISATION DE LA POSITION
MOV  POAAH,#00H  ;ABSOLUE.
MOV  CCAP2H,#255
MOV  CCAP2L,#255 ;FIN DE LA COMMANDE AUTOAJUST
```

```
REINITIALISATION: ;RETOUR EN MODE ATTENTE
;-----
```

```
CLR  BFINRECEP
CLR  BERREUR
MOV  MC,#00
MOV  DPTR,#CMDSTS
JMP  ATTEND
```

```
;=====
MOD_PROFIL_VIT_TAB_DELAI_ACC: ;TABLE DE DELAI POUR LE PROFIL
;===== ;DE VITESSE EN ACCELERATION.
```

```
PUSH  ACC
PUSH  PSW
PUSH  DPL
PUSH  DPH

MOV  R3,IACC
MOV  DPTR,#0005H ;INITIALISATION DU DEBUT DE LA
      ;TABLE A L'ADRESSE 0005H(RAM).

MOV  A,#00H
MOVX @DPTR,A;ECRITURE DE ZERO EN DEBUT DE TABLE.
INC  DPTR
MOVX @DPTR,A
INC  DPTR
MOV  MO1L,#0D0H;DELAIMAX=2 ms(VITESSE MINIMALE).
MOV  MO1H,#07H
```

TABLE_DELAI_ACC:

```
CLR  C
MOV  A,#0FFH ;CALCUL DU DELAI FFFFH - MO1.
SUBB A,MO1L
MOVX @DPTR,A
INC  DPTR
MOV  A,#0FFH
```

```

SUBB  A,MO1H
MOVX  @DPTR,A ; ECRITURE DU DELAI DANS LA TABLE.
INC   DPTR

CLR   C
MOV   A,MO1L
SUBB  A,PAS_ACC ; CALCUL DU PROCHAIN DELAI, MO1.
MOV   MO1L,A
MOV   A,MO1H
SUBB  A,#0
MOV   MO1H,A

DJNZ  R3, TABLE_DELAI_ACC
MOV   A,#0
MOVX  @DPTR,A ; ECRITURE DE ZERO EN FIN DE TABLE.
INC   DPTR
MOVX  @DPTR,A

POP   DPH
POP   DPL
POP   PSW
POP   ACC
RET

```

```

;=====
MOD_PROFIL_VIT_TAB_DELAI_DEC: ;TABLE DE DELAI POUR LE PROFIL
;===== ;DE VITESSE EN DECELERATION.

```

```

PUSH  ACC
PUSH  PSW
PUSH  DPL
PUSH  DPH

MOV   R3, IDEC
MOV   DPTR, #0105H ; ADRESSE DE DEBUT DE LA TABLE.
MOV   A, #00H
MOVX  @DPTR,A      ; ZERO EN DEBUT DE TABLE.
INC   DPTR
MOVX  @DPTR,A
INC   DPTR

CLR   C
MOV   A,MO1L
ADD   A,PAS_ACC ; DELAIMIN ACC.=DELAIMIN DEC.
MOV   MO1L,A    ; VIT. MAX ACC. =VIT. MAX DEC.
MOV   A,MO1H
ADDC  A,#0
MOV   MO1H,A

```


TABLE_DELAI_DEC:

```

        CLR    C
        MOV    A,#0FFH    ;CALCUL ET ECRITUE DU DELAI
                           ;FFFFH - MO1.
        SUBB   A,MO1L
        MOVX   @DPTR,A
        INC    DPTR
        MOV    A,#0FFH
        SUBB   A,MO1H
        MOVX   @DPTR,A
        INC    DPTR

        CLR    C
        MOV    A,MO1L      ;CALCUL DU PROCHAIN DELAI.
        ADD    A,PAS_DEC
        MOV    MO1L,A
        MOV    A,MO1H
        ADDC   A,#0
        MOV    MO1H,A

        MOV    A,R3
        DJNZ   R3,TABLE_DELAI_DEC
        MOV    A,#0
        MOVX   @DPTR,A    ;ZERO EN FIN DE TABLE.
        INC    DPTR
        MOVX   @DPTR,A

        POP    DPH
        POP    DPL
        POP    PSW
        POP    ACC
        RET

```

```

;=====
MOD_PROFIL_VITESSE:                ;PROFIL DE VITESSE.
;=====

```

```

        PUSH   ACC
        PUSH   PSW
        PUSH   DPL
        PUSH   DPH

        CLR    T1RUNBIT

        JB     BVCONST,VIT_CONST
        JB     BACC,ACCELERATION

```

DECELERATION:

```

        JB     BSATU,VIT_CONST
        MOV     P2,#01H
        MOV     R0,MO1L;LECTURE DE TABLE DE DELAIS VARIABLES.
        MOVX    A,@R0
        MOV     TL1,A
        INC     R0
        MOVX    A,@R0
        MOV     TH1,A
        INC     R0
        MOV     MO1L,R0
        JMP     TEST_THTL

ACCELERATION:
        JB     BSATU,VIT_CONST
        MOV     P2,#00H
        MOV     R0,MO1L;LECTURE DE TABLE DE DELAIS VARIABLES.
        MOVX    A,@R0
        MOV     TL1,A
        INC     R0
        MOVX    A,@R0
        MOV     TH1,A
        INC     R0
        MOV     MO1L,R0

TEST_THTL:                ;TEST DEBUT OU DE FIN DE TABLE.
        MOV     A,TH1
        JNZ     THTLSAVE
        MOV     A,TL1
        JNZ     THTLSAVE

        SETB    BSATU
VIT_CONST:                ;MARCHE A VITESSE CONSTANTE.
        MOV     TL1,TH1RL ;REPRISE DE LA DERNIERE VALEUR
        MOV     TH1,TH1RH ;DE DELAI SAUVEGARDEE.
        JMP     INC_POC2T
THTLSAVE:                ;SAUVEGARDE DU DELAI LU.
        MOV     TH1RL,TL1
        MOV     TH1RH,TH1
INC_POC2T:
        JB     BCSAT,LOADPOC2
        INC     POC2TL ;INCREMENTATION DE LA CONSIGNE
        MOV     A,POC2TL;TEMPORAIRE.
        JNZ     TESTPOC2T
        INC     POC2TH
TESTPOC2T:
        MOV     A,POC2TH                ;TEST DE SATURATION DE LA
        CJNE    A,POC1PH,LOADPOC2;CONSIGNE
        MOV     A,POC2TL
        CJNE    A,POC1PL,LOADPOC2
        SETB    BCSAT
LOADPOC2:                ;CHARGEMENT DE LA NOUVELLE CONSIGNE

```

```

MOV   POC2L,POC2TL
MOV   POC2H,POC2TH

JB     BARRET, SORTIEVIT_VAR
SETB  T1RUNBIT

```

SORTIEVIT_VAR:

```

POP    DPH
POP    DPL
POP    PSW
POP    ACC
RETI

```

```

;=====
R_PREPOSI:      ;ROUTINE DE COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT
;=====

```

```

PUSH ACC
PUSH B
PUSH PSW
PUSH DPL
PUSH DPH
PUSH CCON

```

```

MOV   A,PARADIM1
CJNE  A,PARADIM,PREPOSI1
JMP   SORTIEPREPOSI

```

```

PREPOSI1:
MOV   MBIT1,#00H      ;INITIALISATION DE BITS.
MOV   MBIT2,#00H
MOV   U0L,#00H        ;INITIALISATION DE LA
MOV   U0H,#00H        ;VARIABLE DE COMMANDE.
MOV   P00L,#00H
MOV   P00H,#00H
MOV   POC2L,#00H
MOV   POC2H,#00H
MOV   POC2TL,#00H
MOV   POC2TH,#00H

```

```

LCALL SUBR_POAD      ;APPEL DE LA SOUS ROUTINE:
                    ;POSITIONNEMENT ACTUEL DESIRE.
LCALL SUBR_CONSI     ;APPEL DE LA SOUS ROUTINE:
                    ;ELABORATION DE LA CONSIGNE.

```

```

MOV   A,POC1PH      ;CHOIX DE PARAMETRES POUR
                    ;L'ELABORATION DU PROFIL DE
JNZ   C120_2400     ;DE VITESSE.
MOV   A,POC1PL

```

```

        CJNE A,#120,PREPOSI2
PREPOSI2:
        JNC  C120_2400
        CJNE A,#50,PREPOSI3
PREPOSI3:
        JNC  C50_119
        C0_49:
        MOV  TH1RL,#60H          ;MARCHE A VITESSE CONSTANTE
        MOV  TH1RH,#0F0H        ;VMAX ---> 4 ms.
        MOV  EFR,#3
        SETB BVCONST
        JMP  PREPOSI5
        C50_119:
        MOV  IACC,#10
        MOV  IDEC,#30
        MOV  PAS_ACC,#60        ;VMAX ---> 1.4 ms
        MOV  PAS_DEC,#45
        MOV  EFR,#3
        JMP  PREPOSI4
        C120_2400:
        MOV  IACC,#30
        MOV  IDEC,#90
        MOV  PAS_ACC,#50        ;VMAX ---> 0.5 ms
        MOV  PAS_DEC,#45
        MOV  EFR,#3
        PREPOSI4:
        LCALL MOD_PROFIL_VIT_TAB_DELAI_ACC;
        LCALL MOD_PROFIL_VIT_TAB_DELAI_DEC;

        MOV  MO1L,#7          ;INITIALISATION DU POINTEUR DE LA
                                ;TABLE DE DELAIS VARIABLES.
        SETB BACC ;PROFIL DE VITESSE: MODE ACCELERATION.
        PREPOSI5:
        MOV  TL1,#78H          ;INITIALISATION DU TIMER.
        MOV  TH1,#0ECH
        SETB T1RUNBIT ;DEMARRAGE DE TIMER 1 POUR LE PROFIL
                                ;DE VITESSE.

        MOV  TL0,#78H ;DEBUT DE LA COMMANDE
                                ;D'ASSERVISSEMENT.
        MOV  TH0,#0ECH;TEMPS D'ECHANTILLONNAGE = 5 ms.
        SETB BPOS_PIN ;COMMANDE DE PREPOSITIONNEMENT.
        CLR  BRAKE1 ;BOITIER DE COMMANDE,IR8200B, ACTIF
        SETB T0RUNBIT ;LANCEMENT DU COMPTEUR TIMER 0.

ATTEND_FIN_PREPO:      ;ATTENTE DE FIN DU PREPOSITIONNEMENT.

        MOV  DPTR,#CMDSTS
        MOVX A,@DPTR
        CJNE A,#4,PREPOSI6

```

```
ARRET_URG:                ;ARRET D'URGENCE PENDANT LA COMMANDE.
;-----
```

```
SETB BRAKE1
SETB DIR1
MOV  CCAP2H,#00H
SETB BARRET
CLR  T0RUNBIT
CLR  T1RUNBIT
SETB BPASSE
JMP  SORTIEPREPOSI
```

```
PREPOSI6:
JNB  BARRET,ATTEND_FIN_PREPO ;TEST DE FIN DU
                                ;PREPOSITIONNEMENT.
MOV  PARADIM1,PARADIM ;SAUVEGARDE DE L'ECARTEMENT
                                ;ACTUEL.
```

```
RENVOIE_CODE_CMDSTS:
;-----
MOV  P2,#0E0H ;ADRESSE DE COMMANDE USART: E000H.
MOV  R0,#01H
NOP
MOV  A,#31H   ;''COMMAND INSTRUCTION'' EN
                ;TRANSMISSION AVEC RTS = ''1'' ET
                ;TxEN = ''1'' (USART).
MOVX @R0,A
```

```
ATTEND_CTS:
JNB  BTRANSMIT,ATTEND_CTS
```

```
SORTIEPREPOSI:
POP  CCON
POP  DPH
POP  DPL
POP  PSW
POP  B
POP  ACC
RET
```

```
;=====
SUBR_POAD:                ;SOUS ROUTINE D'ELABORATION DU
;=====                  ;POSITIONNEMENT ACTUEL DESIRE.
```

```
PUSH  ACC
PUSH  PSW
PUSH  DPH
PUSH  DPL
```

```
CLR  C                ;DEBUT DU CALCUL DE L'ADRESSE
MOV  A,PARADIM        ;DE LA CONSIGNE DE POSITIONNEMENT.
```

```

RLC    A                ;2*PARADIM
MOV    MO1L,A
MOV    A,#00H
RLC    A
MOV    MO1H,A
CLR    C
MOV    A,MO1L           ;2*PARADIM - 2
SUBB   A,#02
MOV    DPL,A
MOV    A,MO1H
SUBB   A,#00
MOV    DPH,A
MOV    A,#64H           ;OFFSET: TABLE CORAD DANS L'EPROM.
MOVC   A,@A+DPTR
MOV    POADH,A          ;CHARGEMENT DONNEE: BYTE SUPERIEUR.
INC    DPTR
MOV    A,#64H
MOVC   A,@A+DPTR
MOV    POADL,A          ;CHARGEMENT DONNEE: BYTE INFERIEUR.

```

SORTIEPOAD:

```

POP    DPL
POP    DPH
POP    PSW
POP    ACC
RET

```

;=====

SUBR_CONSI: ;SOUS ROUTINE D'ELABORATION DE LA CONSIGNE

;===== ;DE POSITION POUR FIN D'ASSERVISSEMENT.

```

PUSH   ACC
PUSH   PSW

```

```

CLR    C                ;CALCUL DE LA CONSIGNE,
MOV    A,POADL           ;POC1 = POAD - POAA.
SUBB   A,POAAL
MOV    POC1L,A
MOV    A,POADH
SUBB   A,POAAH
MOV    POC1H,A

```

```

JB     POC1H.7,CONSI1    ;DEBUT DE LA MISE EN FORME DE
MOV    POC1PL,POC1L      ;LA CONSIGNE POC1, SOUS FORME
MOV    POC1PH,POC1H      ;DE VARIABLE POSITIVE AVEC BIT
CLR    BSPOC             DE SIGNE POC1P, BSPOC.
JMP    SORTIECONSI

```

CONSI1:

```

CLR    C

```

```

MOV    A,POC1L
CPL    A
ADD    A,#1
MOV    POC1PL,A
MOV    A,POC1H
CPL    A
ADDC   A,#00
MOV    POC1PH,A
SETB   BSPOC                ;FIN DE LA MISE EN FORME.

```

SORTIECONSI:

```

POP    PSW
POP    ACC
RET

```

```

;=====
MOD_IMP_COD:      ;MODULE DE COMPTAGE DES IMPULSIONS DU
;=====          ;DISQUE CODEUR.

```

```

JB     BAUTOAJUS,COMPT ;DEBUT DE COMMANDE EN MODE DE REGLAGE
                        ;DE LA REFERENCE RADIALE.
CLR    PCAMOD4         ;REINITIALISATION DU FLAG D'INTERRUPTION
                        ;DU MODULE 4 (PCA TIMER).
JB     BPASSE1,REF_0_ATTEINT
SETB   BPASSE1
JMP    RETOUR

```

REF_0_ATTEINT:

```

SETB   BRAKE1          ;ARRET DU MOTEUR A LA 2e INTERRUPTION.
MOV    CCAP2H,#00H
SETB   BAUTOAJUS
JMP    RETOUR          ;FIN DE COMMANDE DU REGLAGE DE REFERENCE.

```

```

COMPT:      ;DEBUT DU MODULE DE COMPTAGE D'IMPULSIONS
            ;EN MODE DE COMMANDE NORMALE.

```

```

CLR    PCAMOD1         ;REINITIALISATION: FLAG D'INT.
                        ;DU MODULE 1 (PCA TIMER)
CPL    P3.1

```

```

PUSH   ACC
PUSH   PSW
PUSH   DPL
PUSH   DPH

```

```

JNB    PHA,COD3
JB     PHB,COD4

```

COD1:

```

        INC    POAAL    ;INCREMENTATION DE POAAL
        MOV    A,POAAL
        JNZ    COD2
        INC    POAAH    ;INCREMENTATION DE POAAH LORSQUE
COD2:    ;PASSE DE 255 A 0.
        JMP    COD5
COD3:    JB     PHB,COD1
COD4:    DEC    POAAL    ;DECREMENTATION DE POAAL
        MOV    A,POAAL
        CJNE   A,#255,COD5
        DEC    POAAH    ;DECREMENTATION DE POAAH LORSQUE
COD5:    ;PASSE DE 0 A 255.
        JNB    PHA,COD33
        JB     PHB,COD44
COD11:   SETB   BUP_DOWN
        INC    PO0L    ;INCREMENTATION DE PO0L
        MOV    A,PO0L
        JNZ    COD22    ;INCREMENTATION DE PO0H LORSQUE
        INC    PO0H    ;PO0L PASSE DE 255 A 0.
COD22:   JMP    COD55
COD33:   JB     PHB,COD11
COD44:   CLR    BUP_DOWN
        DEC    PO0L    ;DECREMENTATION DE PO0L
        MOV    A,PO0L
        CJNE   A,#255,COD55 ;DECREMENTATION DE PO0H LORSQUE
        DEC    PO0H    ;PO0L PASSE DE 0 A 255.
COD55:   ARRETE:
        JB     BARRET,SORTIEIMP
        JB     BPASSE,FREINAGE
        MOV    A,PO0H ;TEST DE DETECTION LORSQUE LA POSITION
        CJNE   A,POC1H,SORTIEIMP;CROISE LA CONSIGNE POUR LA
        MOV    A,PO0L    ;PREMIERE FOIS.
        CJNE   A,POC1L,SORTIEIMP
        SETB   BPASSE
        JB     BUP_DOWN,COD7 ;DEBUT DE LA SAUVEGARDE DU SENS
COD6:    ;DE ROTATION LORS DU PREMIER
        CLR    BSENSROT ;CROISEMENT.
        JMP    SORTIEIMP
COD7:    SETB   BSENSROT
        JMP    SORTIEIMP    ;FIN DE LA SAUVEGARDE.
FREINAGE:    ;DEBUT DE LA COMMANDE D'ARRET
        JNB    BSENSROT,COD8 ;AU 2e CROISEMENT.
        JNB    BUP_DOWN,BLOQUE;ON DETECTE LE CHANGEMENT DU

```



```

        JMP  SORTIEIMP          ;SENS DE ROTATION.
COD8:   JB   BUP_DOWN,BLOQUE
        JMP  SORTIEIMP
BLOQUE: SETB BRAKE1
        SETB DIR1
        MOV  CCAP2H,#00H
        SETB BARRET
        CLR  T0RUNBIT
        CLR  T1RUNBIT          ;FIN DE LA COMMANDE D'ARRET.

SORTIEIMP:
        POP  DPH
        POP  DPL
        POP  PSW
        POP  ACC
RETOUR: RETI

;=====
MOD_COM:          ;MODULE DE COMMANDE A CHAQUE
;=====          ;INTERRUPTION DU TIMER0 DEFINISSANT
                  ;LA PERIODE D'ECHANTILLONNAGE

        CLR  T0RUNBIT
        CPL  P3.0

        PUSH ACC
        PUSH B
        PUSH PSW
        PUSH DPH
        PUSH DPL

        JB   BPOS_PIN,COM_PREPOSI
        JMP  COM_PINCEMENT

COM_PREPOSI:

        MOV  TL0,#78H  ;PERIODE D'ECHANTILLONNAGE DE
        MOV  TH0,#0ECH ;5 ms.

ECART_CIBLE_DEC:
                  ;DEBUT DU CALCUL DE LA VALEUR
        CLR  C          ;DE L'ECART CIBLE POUR FIN DE
        MOV  A,POC1L;DECELERATION (E0R).
        SUBB A,PO0L
        MOV  E0RL,A

```

```

MOV    A,POC1H
SUBB   A,PO0H
MOV    E0RH,A

JNB    E0RH.7,ECART_COM
CLR    C
MOV    A,E0RL
CPL    A
ADD    A,#1
MOV    E0RL,A
MOV    A,E0RH
CPL    A
ADDC   A,#00
MOV    E0RH,A          ;FIN DU CALCUL DE L'ECART E0R.

ECART_COM:              ;CALCUL DE L'ECART DE COMMANDE.

JNB    BSPOC,ECART_COM1

CLR    C
MOV    A,POC2L
CPL    A
ADD    A,#1
MOV    POC2L,A
MOV    A,POC2H
CPL    A
ADDC   A,#00
MOV    POC2H,A

ECART_COM1:
CLR    C
MOV    A,POC2L
SUBB   A,PO0L
MOV    E0VL,A
MOV    A,POC2H
SUBB   A,PO0H
MOV    E0VH,A

JB     E0VH.7,COMPL1
CLR    BSE0V
JMP    COM0

COMPL1:
CLR    C
MOV    A,E0VL
CPL    A
ADD    A,#1
MOV    E0VL,A
MOV    A,E0VH
CPL    A
ADDC   A,#00
MOV    E0VH,A
SETB   BSE0V

```

```

COM0:
    JB     BVCONST,COM1
    JNB    BACC,COM1
    MOV    A,E0RH
    JNZ    COM1
    MOV    A,E0RL
    CJNE   A,IDEC,TEST_DEC
TEST_DEC:
    JNC    COM1
    CLR    BACC                      ;REINITIALISATION DE BITS
    CLR    BCSAT
    CLR    BSATU
    MOV    MO1L,#7                  ;INITIALISATION DU POINTEUR DE LA
                                    ;TABLE DE DELAI POUR LE PROFIL DE
                                    ;VITESSE.
COM1:
    MOV    B,#21                    ;CONSTANTE K0: LOI DE COMMANDE.
    MOV    A,E0VL                    ;CALCUL DU TERME CONSTANT
    MUL    AB                        ;K0*e(t) DANS LA LOI DE
    MOV    RESUPL,A                  ;COMMANDE.
    MOV    RESUPH,B
    MOV    B,#21                    ;CONSTANTE K0.
    MOV    A,E0VH
    MUL    AB
    JB     OV,SAT1
    CLR    C
    ADD    A,RESUPH
    JC     SAT1
    JB     RESUPH.7,SAT1
    MOV    RESUPH,A
    JMP    NSAT1
SAT1:
    MOV    RESUPL,#00H
    MOV    RESUPH,#7DH
NSAT1:
COM2:
    JB     BSE0V,SOUS1              ;CALCUL DE LA COMMANDE
ADDI1:
    CLR    C                        ;DEBUT DU QUATRIEME CUMUL
    MOV    A,U0L                    ;U0= U0 + K0*e(t).
    ADD    A,RESUPL
    MOV    U0L,A
    MOV    A,U0H
    ADDC   A,RESUPH
    MOV    U0H,A
    JMP    COM3
SOUS1:
    CLR    C
    MOV    A,U0L
    SUBB   A,RESUPL
    MOV    U0L,A

```

```

        MOV  A,U0H
        SUBB A,RESUPH
        MOV  U0H,A                ;FIN DU QUATRIEME CUMUL
COM3:   JB   U0H.7,COMPL2        ;ELABORATION DE LA COMMANDE U0
        CLR  BSU0                ;AVEC SON BIT DE SIGNE QUI
        JMP  COM4                ;DEFINIT LE SENS DE ROTATION
COMPL2: CLR  C
        MOV  A,U0L
        CPL  A
        ADD  A,#01
        MOV  U0L,A
        MOV  A,U0H
        CPL  A
        ADDC A,#00
        MOV  U0H,A
        SETB BSU0                ;FIN DU CALCUL DE LA COMMANDE.
COM4:   MOV  A,U0H                ;DEBUT DE LIMITATION DE LA COMMANDE.
        JNZ  COM6
        MOV  A,U0L
        CJNE A,#200,COM5
COM5:   JC   COM7
COM6:   MOV  U0L,#200
        MOV  U0H,#00H
        JMP  COM10
COM7:   CJNE A,#70,COM8
COM8:   JNC  COM10
        MOV  A,E0RH
        JNZ  COM10
        MOV  A,E0RL
        CJNE A,EFR,COM9
COM9:   JNC  COM10
        MOV  U0L,#70            ;FIN DE LIMITATION DE LA COMMANDE.
COM10:  CLR  C                    ;PREPARATION DE L'OCTET DE COMMANDE.
        MOV  A,#255
        SUBB A,U0L

        JNB  BARRET,CONTINUE2
        JMP  SORTIECOM
CONTINUE2:
        JB   BSU0,FERMETURE      ;ECRITURE DE L'OCTET DE
OUVERTURE:                                ;COMMANDE DANS CCAP2H.
        CLR  DIR1

```

```

        MOV    CCAP2H,A
        JMP    COM11
FERMETURE:
        SETB   DIR1
        MOV    CCAP2H,A
COM11:
        SETB   T0RUNBIT                ;FIN DE L'ACTION DE COMMANDE

CALCUL:                                ;DEBUT DU CALCUL DE LA PROCHAINE
                                        ;COMMANDE.
        MOV    B,#8                    ;CONSTANTE K2: LOI DE COMMANDE.
        MOV    A,U0L
        DIV    AB
        MOV    U0L,A

        JNB    BSU0,COM12 ;DEBUT DU PREMIER CUMUL  $U0=u(t-1)$ .
        CLR    C
        MOV    A,U0L
        CPL    A
        ADD    A,#1
        MOV    U0L,A
        MOV    A,U0H
        CPL    A
        ADDC   A,#00
        MOV    U0H,A                ;FIN DU PREMIER CUMUL
COM12:
        MOV    B,#7                    ;CONSTANTE K1: LOI DE COMMANDE.
        MOV    A,E0VL                ;CALCUL DU TERME  $K1*e(t-1)$ .
        MUL    AB
        MOV    RESUPL,A
        MOV    RESUPH,B
        MOV    B,#7                    ;CONSTANTE K1: LOI DE COMMANDE.
        MOV    A,E0VH
        MUL    AB
        JB     OV,SAT2
        CLR    C
        ADD    A,RESUPH
        JC     SAT2
        JB     RESUPH.7,SAT2
        MOV    RESUPH,A
        JMP    NSAT2
SAT2:
        MOV    RESUPL,#00H
        MOV    RESUPH,#7DH;FIN DU CALCUL DU TERME  $K1*e(t-1)$ .
NSAT2:
        JB     BSE0V,ADDI2            ;CALCUL DE LA COMMANDE U0
SOUS2:                                ;DEBUT DU DEUXIEME CUMUL
        CLR    C                      ; $U0 = U0 - K1*e(t-1)$ .
        MOV    A,U0L
        SUBB   A,RESUPL
        MOV    U0L,A

```

```

        MOV    A,U0H
        SUBB   A,RESUPH
        MOV    U0H,A
        JMP    SORTIECOM
ADDI2:
        CLR    C
        MOV    A,U0L
        ADD    A,RESUPL
        MOV    U0L,A
        MOV    A,U0H
        ADDC   A,RESUPH
        MOV    U0H,A                ;FIN DU DEUXIEME CUMUL

        JMP    SORTIECOM

COM_PINCEMENT:

        SETB   BFCOM                ;BIT DE  COMMANDE D'APPLICATION DE
                                   ;FORCE.
;        MOV    TL0,#XX              ;PERIODE D'ECHANTILLONNAGE.
;        MOV    TH0,#XX

SORTIECOM:
        POP    DPL
        POP    DPH
        POP    PSW
        POP    B
        POP    ACC

RETOURCOM:
        RETI

;=====
MOD_INT1:                                ;MODULE DE COMMUNICATION.
;=====

        CLR    INT1_FLAG            ;REINITIALISATION DU FLAG D'INT.
                                   ;(DECLenchement PAR NIVEAU).

        PUSH   ACC
        PUSH   B
        PUSH   PSW
        PUSH   RESUPL

        MOV    P2,#0F0H              ;ADRESSE DE BASE: GAL16V8A
        NOP
        MOV    R0,#00H
        MOVX   A,@R0                ;IDENTIFICATION D'INTERRUPTIONS.
        ANL    A,#00111111B
        MOV    MORINT1,A
        JB     RxDY,RXUSART          ;RECEPTION DE DONNEE: USART.

```

```

JNB  TxRDY,EXITSEC ;TRANSMISSION DE DONNEE: USART.
JMP  TXUSART

```

```

RXUSART:
;-----

```

```

DTR_1:
MOV  P2,#0E0H ;ADRESSE DE COMMANDE USART:0E001H.
MOV  R0,#01H
NOP
MOV  A,#14H ;"COMMAND INSTRUCTION": RECEPTION
MOVX @R0,A ; DTR = "1"(USART).

```

```

MOV  P2,#0E0H
MOV  R0,#00H
NOP
MOVX A,@R0 ;LECTURE DE DONNEE: USART
ANL  A,#01111111B

```

```

CJNE A,#20H,G1 ;LES CHIFFRES CODES EN ASCII
G1: JC CRETURN ;SONT COMPRIS ENTRE 30H ET 39H.

```

```

JC CRETURN

```

```

G2: CJNE A,#30H,G3

```

```

G3: JC EXITSEC

```

```

G4: CJNE A,#3AH,G5

```

```

G5: JNC EXITSEC

```

```

CHIFFRE:
ANL  A,#0FH
MOVX @DPTR,A ;ECriture DU CHIFFRE RECU EN MEMOIRE.
INC  DPTR ;DPTR POINTE LA MEMOIRE DE RECEPTION
INC  MC ;SUIVANTE ET INCREMENTATION DU
;COMPTEUR DE MOTS EN RECEPTION.

```

```

EXITSEC:
JMP  SORTIEINT1

```

```

CRETURN:
CJNE A,#13,EXITSEC ;TEST:'' CARRIAGE RETURN''.

```

```

ASC_BIN: ;CONVERSION ASCII-BINAIRE.
;-----

```

```

CJNE MC,#2,M2M3 ;FORMAT: UNITE
MOV  DPTR,#M1
MOVX A,@DPTR
MOV  PARAM,A
SETB BFINRECEP
JMP  SORTIEINT1

```

```

M2M3:
    CJNE MC,#3,M1M2M3      ;FORMAT: DIZAIN-UNITE
    MOV  B,#10
    MOV  DPTR,#M1
    MOVX A,@DPTR
    MUL  AB
    MOV  RESUPL,A
    INC  DPTR
    MOVX A,@DPTR
    ADD  A,RESUPL
    MOV  PARAM,A
    SETB BFINRECEP
    JMP  SORTIEINT1

M1M2M3:
    CJNE MC,#4,ERREUR      ;FORMAT: CENTAIN-DIZAIN-UNITE
    MOV  B,#100
    MOV  DPTR,#M1
    MOVX A,@DPTR
    MUL  AB
    JB   OV,ERREUR          ;PROTECTION CONTRE DEPASSEMENT.
    MOV  RESUPL,A
    MOV  B,#10
    INC  DPTR
    MOVX A,@DPTR
    MUL  AB
    CLR  C
    ADD  A,RESUPL
    JC   ERREUR              ;PROTECTION CONTRE DEPASSEMENT.
    MOV  RESUPL,A
    INC  DPTR
    MOVX A,@DPTR
    CLR  C
    ADD  A,RESUPL
    JC   ERREUR              ;PROTECTION CONTRE DEPASSEMENT.
    MOV  PARAM,A
    SETB BFINRECEP
    JMP  SORTIEINT1

ERREUR:
    SETB BERREUR
    JMP  SORTIEINT1

TXUSART:
;-----

    SETB BTRANSMIT

    PUSH DPH
    PUSH DPL

    MOV  DPTR,#CMDSTS      ;LECTURE DU CODE DE COMMANDE.
    MOVX A,@DPTR

```



```
POP DPL
POP DPH
```

```
MOV P2,#0E0H ;ADRESSE DE DONNEE USART:0E000H.
MOV R0,#00H
NOP
NOP
MOVX @R0,A ;ENVOIE DU CMDSTS VIA L'USART.
```

ATTEND_FINTx:

```
MOV P2,#0E0H ;ADRESSE DE COMMANDE USART:0E001H.
MOV R0,#01H
NOP
NOP
MOVX A,@R0 ;LECTURE DU STATUT (USART).
ANL A,#00000001B
JZ ATTEND_FINTx ;TxRDY = "1" ?
```

```
MOV P2,#0E0H ;ADRESSE DE COMMANDE USART:0E001H.
MOV R0,#01H
NOP
MOV A,#14H ;RECONFIGURATION DU PORT SERIE EN
MOVX @R0,A ;RECEPTION.
```

SORTIEINT1:

```
POP RESUPL
POP PSW
POP B
POP ACC
RETI
```

END

;=====

ANNEXE D

Résultats expérimentaux

Nous présenterons la photo du montage expérimental ainsi que les données expérimentales concernant les variables suivantes:

- tension moyenne aux bornes du moteur de prépositionnement pour une consigne d'écartement de 0,030 " de rayon correspondant à: PARADIM = 3;

- consigne de position provenant de la commande par profil de vitesse;

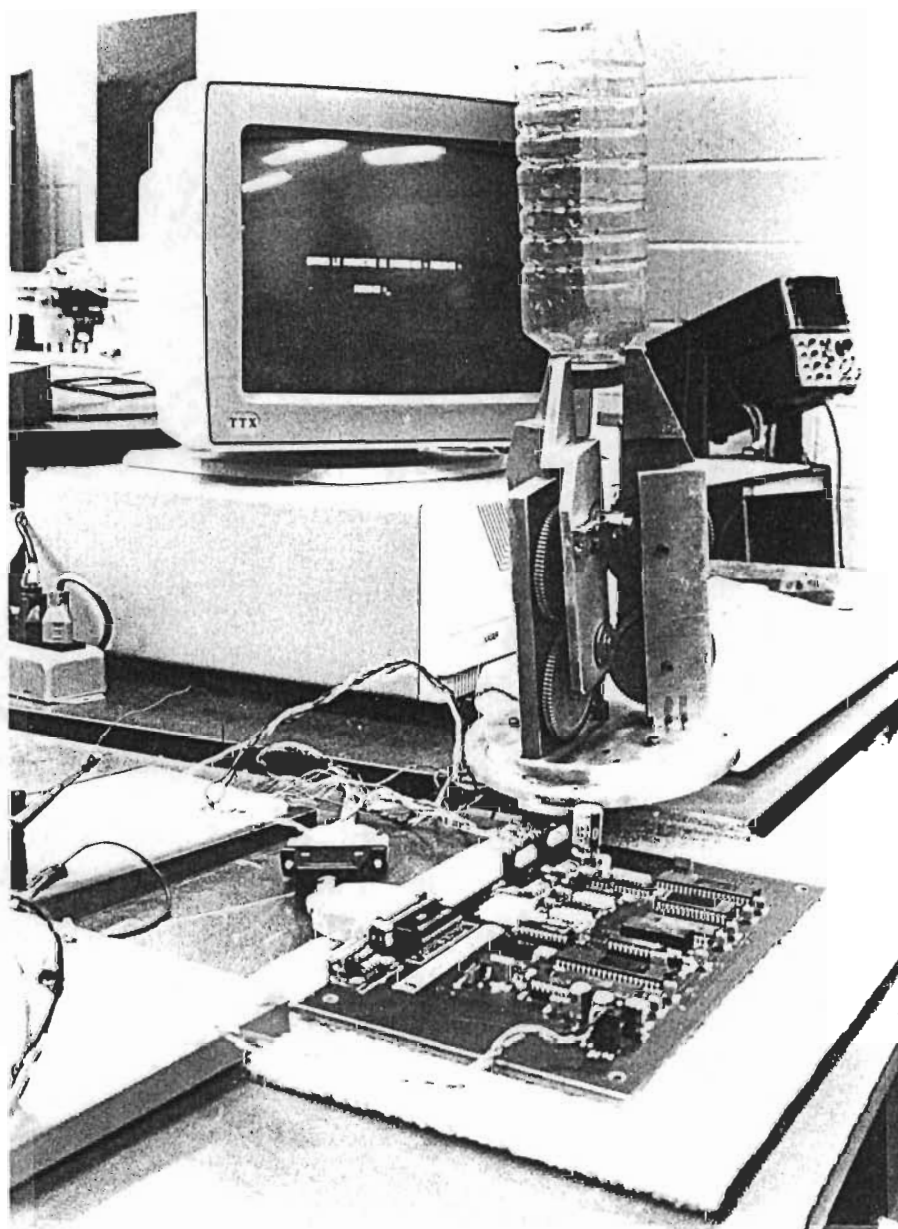
- évolution réelle de l'écartement des doigts.

Ces données expérimentales ont été recueillies à partir de la démarche suivante.

- entrée du paramètre de dimension à partir d'un ordinateur par le port de communication série de la carte électronique de commande de la pince;

- mémorisation des variables concernées dans la mémoire RAM pendant la commande;

- sortie des données sur imprimante à partir du port de communication parallèle de la carte électronique de commande.



```

%=====
%PROGRAMME: COURBES EXPERIMENTALES; COMMANDE ET POSITION
%=====
clear
clc

Vcc=24;           %Tension d'alimentation du pont H.
Ka=Vcc/256;       %Gain de l'amplificateur PWM.
Kc=30/pi;         %Gain du disque codeur.
Np=80;           %Rapport de reduction de la vis sans fin.
R=0.94;          %Rayon en pouce.
T=0.005;         %Periode d'echantillonnage = 5 ms.

%VECTEUR DE COMMANDE DU RAPPORT CYCLIQUE.
%-----
U0=[21;58;112;161;188;177;176;155;180;197;171;175;133;121;
    85;73;58;84;80;101;96;54;20;-12;-22;-37;-11;48;55;111;
    118;133;107;69;36;4;-7;0;-21;26;59;49;90;102;117;91;74;
    37;46;5;-7;21;70;70;70;70;-70;-70;-70];

%VECTEUR DE LA CONSIGNE DE POSITION PAR LE PROFIL DE VITESSE
%EN NOMBRE D'IMPULSIONS CODEURS.
%-----
POC2=[1;3;6;9;12;16;20;25;32;40;48;57;65;74;82;91;99;108;
    116;125;132;137;141;145;148;151;154;157;159;162;164;
    166;168;170;172;174;176;178;179;181;183;184;186;187;
    189;190;192;193;195;196;197;199;200;201;201;201;201;
    201;201];

%VECTEUR: EVOLUTION REELLE DE LA POSITION EN NOMBRE
%D'IMPULSIONS CODEURS.
%-----
PO0=[0;0;0;0;1;5;9;15;21;28;37;46;56;66;76;86;95;103;111;
    118;126;132;139;145;149;153;155;155;156;156;157;158;
    161;165;169;173;176;178;180;180;180;181;181;181;182;
    184;187;190;192;195;197;198;199;199;200;201;202;202;
    202];

tp=0:T:58*T;
tt=[0;0];
U00=[0;0];
m=1;
n=1;
while m < 60

    ti=(m-1)*T; % origine du temps de simulation
    tf=m*T;     % fin du temps de simulation
    x0=[U0(m)]; % condition initiales
    [t,x]=ode23('tcom',ti,tf,x0,1e-3);

    npoint=size(t);

```

```

np=npoint(1,1);

    tt(n)=t(1);
    tt(n+1)=t(np);
    U00(n)=x(1);
    U00(n+1)=x(np);

m=m+1
n=n+2;
end

Vamoy =Ka*U00; %Tension moyenne aux bornes du moteur.
rconsi=R*(1-cos(POC2/(Kc*Np)));%Position consigne en pouce.
rreel =R*(1-cos(PO0/(Kc*Np)));%Position reel en pouce.

plot(tt,Vamoy)
title('EVOLUTION DE LA TENSION MOYENNE AUX BORNES DU MOTEUR')
xlabel('TEMPS EN s')
ylabel('TENSION EN V')
grid
pause
%meta vexp
plot(tp,rconsi,tp,rreel)
title('ECARTEMENT CONSIGNE ET ECARTEMENT REEL')
xlabel('TEMPS EN s')
ylabel('RAYON EQUIVALENT EN pouce')
text(0.15,0.01,'_____ Ecartement consigne')
text(0.15,0.005,'----- Ecartemant reel')
grid
pause
%meta vexp
%!gpp vexp.met/dps/fprn
%=====

function xdot=tcom(t,x)

xdot(1)=0; %dU0/dt = 0.
%=====

```

