POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Robotisation du jeu de la tour d'Hanoï par rétroaction visuelle
Title:

Auteurs: Phadnakhone Souphandavong, & Romano M. De Santis
Authors:

Date: 1986

Type: Rapport / Report

Référence: Souphandavong, P., & De Santis, R. M. (1986). Robotisation du jeu de la tour d'Hanoï par rétroaction visuelle. (Rapport technique n° EPM-RT-86-45). https://publications.polymtl.ca/10026/
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: https://publications.polymtl.ca/10026/
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation: Tous droits réservés / All rights reserved
Terms of Use:

Document publié chez l'éditeur officiel
Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EPM-RT-86-45
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

0 8 JAN. 1987

EPM/RT-86/45

ROBOTISATION DU JEU DE LA TOUR D'HANOI PAR RETROACTION VISUELLE

par

Phadnakhone Souphandavong, Ing. M.Sc.A.

Projet dirigé par

Romano M. DeSantis

Département de Génie Electrique

Ecole Polytechnique de Montréal

Octobre 1986

Tous droits réservés. On ne peut reproduire ni diffuser aucune partie du présent ouvrage, sous quelque forme que ce soit, sans avoir obtenu au préalable l'autorisation écrite de l'auteur.

Dépôt légal, 2e trimestre 1984
Bibliothèque nationale du Québec
Bibliothèque nationale du Canada

Pour se procurer un copie de ce document, s'adresser au:

Edition de l'Ecole Polytechnique de Montréal
Ecole Polytechnique de Montréal
Case postale 6079, Succursale A
Montréal (Québec) H3C 3A7
(514) 340-4000

Compter 0,10$ par page (arrondir au dollar le plus prèt) et ajouter 3,00$ (Canada) pour la couverture, les frais de poste et la manutention. Régler en dollars canadiens par chèque ou mandat-poste au nom de l'Ecole Polytechnique de Montréal. Nous n'honorerons que les commandes accompagnée d'un paiement, sauf s'il y a eu entente préalable dans le cas d'établissements d'enseignement, de sociétés ou d'organismes canadiens.

SOMMAIRE

Ce mémoire présente l'architecture conceptuelle, les composantes matérielles et logicielles, les modalités d'opération et les caractéristiques de performance d'un système permettant une exécution robotisée du jeu de la tour d'Hanoï.

Les éléments principaux de ce système sont représentés par un robot de révolution avec 5 degrés de liberté et par un système de reconnaissance et guidage basé sur une rétroaction visuelle.

Une attention particulière a été consacrée aux problèmes de contrôle du robot, aux algorithmes de traitement d'image et aux problèmes de communication entre les nombreuses composantes du système.

ABSTRACT

This thesis presents the architechturial concept of the material and software components, the modes of the operation and the characteristics of the performance of a robotic system : automatization of the Hanoi game.

The principal elements of the system are represented by a 5 revolute joint robot and a guidance system based on vision feedback.

A special attention was devoted to the problem of robot control, image processing algorithms and communication problems between the numerous components of the system.

REMERCIEMENT

Ce projet a été développé dans le cadre du projet FCAR-CRP-378-76, "Analyse et Commande des Processus Industriels par Ordinateur: Application au Réseaux Electrique", financé par le Ministère de l'Education du Québec. Il a également bénéficié du support financier de l'octroi A-8244, "Sensibilité, Stabilité et Commande Optimale des Systèmes" du Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada.

Je désire exprimer ma reconnaissance à mon directeur de thèse, monsieur Romano M. DESANTIS, professeur du département de Génie Electrique, pour m'avoir dirigé. Tout au long de mes travaux, par ses précieux conseils, il m'a aidé à m'orienter vers une approche originale du sujet développé.

Un grand remerciement est également dû à monsieur Richard HURTEAU, professeur du département de Génie Electrique, qui m'a beaucoup motivé par sa grande disponibilité.

Je tiens à remercier mon collaborateur du projet, Célestin RATSIMBAZAFY, sans qui une bonne partie du banc d'essai serait impossible à réaliser.

Mes remerciements vont aussi aux techniciens de la section automatique, Richard GRENIER et Yves LEONARD, pour leur support technique.

J'aimerais remercier particulièrement Habib AOUFOUSSI, André TERROUX, Guy CHEVRETTE et Monjy REBEMANANTSOA qui m'ont aidé et encouragé au cours de cette période.

Enfin, je désire exprimer ma vive reconnaissance envers mon épouse Chanthala PHANOUVONG pour sa compréhension et ses encouragements au cours de ce travail.

TABLE DES MATIERES

SOMMAIRE iv

SUBSTRACT v

REMERCIEMENT vi

TABLE DES MATIERES viii

LISTE DES FIGURES xiii

LISTE DES TABLEAUX xvii

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I

PROBLEMATIQUE 4

I-1 OBJECTIFS 4

I-2 DESCRIPTION DU JEU DE LA TOUR D'HANOI 6

I-3 PRINCIPE DE ROBOTISATION DU JEU 7

CHAPITRE II

COMPOSANTS DU SYSTEME DE ROBOTISATION 9

II-1 COMPOSANTES MATERIELLES DU SYSTEME

DE ROBOTISATION 9

II-1.1 Robot 9

II-1.2 Système de vision 11

II-1.3 Système de guidage du robot 14

II-2 COMPOSANTES LOGICIELLES DU SYSTEME
DE ROBOTISATION 17

II-2.1 Composantes logicielles du système de vision ... 18

II-2.2 Composantes logicielles du système de guidage .. 22

CHAPITRE III

ILLUSTRATION DES MODALITES D'OPERATION 24

III-1 CALIBRATION DU SYSTEME DE VISION 24

III-1.1 Ajustement de l'éclairage de la scène 25

III-1.2 Calibration des facteurs d'échelle 27

III-2 LOCALISATION DES DISQUES 30

III-3 EXECUTION DU MODULE DE DECISION 34

III-4 CENTRAGE DES DISQUES 36

CHAPITRE IV

DIFFICULTES RENCONTREES DANS LE PROJET 39

IV-1 DIFFICULTES AU NIVEAU DE LA LOCALISATION
DES DISQUES 39

IV-1.1 Effet de la variation de luminosité 39

IV-1.2 Effet de la perspective 40

IV-2 DIFFICULTES AU NIVEAU DU CENTRAGE DES DISQUES 42

IV-3 DIFFICULTES AU NIVEAU DE LA COMMUNICATION
ENTRE LES MICRO-ORDINATEURS 44

CONCLUSION 45

REFERENCES 48

APPENDICES 52

APPENDICE A

LOGICIEL DE SUPPORT DE BASE. 53

A-1 ILLUSTRATION DES FONCTIONS DU LOGICIEL DE BASE 53

A-2 UTILISATION DU LOGICIEL DE SUPPORT DE BASE PAR PASCAL 55

APPENDICE B

LOGICIEL D'APPLICATION RELATIF AU TRAITEMENT D'IMAGE .. 58

B-1 MODULE DE CALIBRATION DU SYSTEME DE VISION..... 58

B-1.1 Evaluation des coordonnées images des centres des disques 60

B-1.1.1 Méthode de "Projection Optique" 62

B-1.1.2 Analyse mathématique de la méthode proposée ... 62

B-1.2 Evaluation des facteurs d'échelle 65

B-2 MODULE DE LOCALISATION DES DISQUES 69

B-2.1 Procedure de détermination du nombre de disques sur chaque pôle 69

B-2.2 Procédure d'évaluation de grandeur des disques .. 74

B-3 MODULE DE DECISION 75

Exemple d'illustration du principe 80

B-4 MODULE DE CENTRAGE DES DISQUES 82

B-4.1 Méthode de "Lignes de luminosité minimum" 83

B-4.2 Algorithme de détermination du centre des disques 84

B-4.3 Opération de centrage des disques 85

APPENDICE C

LOGICIEL D'APPLICATION RELATIF AU GUIDAGE DE ROBOT 89

C-1 MODELE CINETIQUE DU RHINO XR-1 90

C-2 ALGORITHME DE GUIDAGE DU ROBOT 93

C-2.1 Principe du déplacement POINT-POINT 93

C-2.2 Principe du déplacement de pôle à pôle 96

C-2.3 Contrôle de fermeture et d'ouverture de la pince 97

APPENDICE D

LOGICIEL DE COMMUNICATION 99

D-1 COMMUNICATION ENTRE LE SYSTEME DE GUIDAGE ET LE CONTROLEUR DE RHINO XR-1 99

D-2 COMMUNICATION ENTRE LE SYSTEME DE GUIDAGE ET LE SYSTEME DE VISION 104

D-2.1 Transmission et réception de données de la solution du problème de la tour d'Hanoï 105

D-2.2 Transmission et réception de données de centrage des disques 107

LISTE DES FIGURES

		PAGE
Figure 1.1	Vue d'ensemble du banc d'essai	4
Figure 1.2	Table de jeu de la tour d'Hanoï	6
Figure 1.3	Diagramme bloc du système de robotisation	7
Figure 2.1	Robot RHINO XR-1	10
Figure 2.2	Diagramme fonctionnel de l'asservissement d'une articulation	11
Figure 2.3	Système de vision	12
Figure 2.4	Schéma bloc du système de vision	13
Figure 2.5	Système de guidage du robot	14
Figure 2.6	Montage des composantes matérielles du système de robotisation	16
Figure 3.1	Histogramme d'une ligne de luminosité dans une condition acceptable de l'éclairage	26
Figure 3.2	Histogramme d'une ligne de luminosité dans une condition inacceptable de l'éclairage	27
Figure 3.3	Points de calibrage	28
Figure 3.4	Illustration des facteurs d'échelle	29
Figure 3.5	Illustration des coordonnées des centres de disques	29

PAGE

Figure 3.6	Scène vue par le système de vision	31
Figure 3.7	Histogramme d'une ligne de luminosité	32
Figure 3.8	Résultat de la localisation de disques	33
Figure 3.9	Configuration initiale	35
Figure 3.10	Etape 1	35
Figure 3.11	Etape 2	36
Figure 3.12	Etape 3	36
Figure 3.13	Centrage et guidage par la vision	38
Figure 4.1	Effet de la perspective	41
Figure 4.2	Effet de parallaxe	43
Figure A-1	Structure de la déclaration des sous programmes en "procedure external"	56
Figure A-2	Structure de la compilation du pascal/z et de l'assembleur 8080	57
Figure B-1	Organigramme de CALIBVIS.PAS/COM	59
Figure B-2	Arrangement de la caméra par rapport à la scène	61
Figure B-3	Orientation du pôle i	65
Figure B-4	Courbes caractéristiques de facteurs d'échelle	66
Figure B-5	Méthode d'évaluation de facteurs d'échelle	68
Figure B-6	Organigramme du module de localisation des disques	70

PAGE

Figure B-7 Méthode de détermination de nombre de disques 71

Figure B-8 Histogramme de la présence de deux disques 71

Figure B-9 Histogramme de la présence d'aucun disque 72

Figure B-10 Algorithme de détermination de nombre de disques sur chaque pôle 73

Figure B-11 Algorithme d'évaluation de grandeur des disques 75

Figure B-12 Algorithme du module de décision 79

Figure B-13 Configuration de départ 80

Figure B-14 Centrage des disques 83

Figure B-15 Algorithme du centrage des disques 83

Figure B-16 Trajectoires des disques 84

Figure B-17 Commande en boucle ouverte 86

Figure B-18 Commande en boucle fermée 88

Figure C-1 Trajectoires de transfert 89

Figure C-2 Modèle géométrique de Rhino XR-1 91

Figure C-3 Assignation de référentiel aux articulations 92

Figure C-4 Organigramme du déplacement POINT-POINT 95

Figure C-5 Déplacement d'un pôle à un autre 97

Figure C-6 Algorithme de contrôle de la pince 99

		PAGE
Figure D-1	Lien RS-232 à fils	99
Figure D-2	Transmission de IBM vers contrôleur de Rhino	102
Figure D-3	Transmission/Réception entre IBM et Rhino	103
Figure D-4	Lien de communication parallèle entre IBM et MATROX	104
Figure D-5	Organigramme de communication entre le système de guidage et le système de vision	107

LISTE DES TABLEAUX

		PAGE
Tableau 2.1	Liste des sous programmes de logiciel de support de base: LOGAP.SRC	19
Tableau 2.2	Menu général de CALIBVIS.PAS/COM	21
Tableau 2.3	Menu général de POLYVIS.PAS/COM	21
Tableau 2.4	Menu général de RETROIMA.PAS/COM	22
Tableau D-1	Codes spéciaux de communication	105

INTRODUCTION

Ce projet concerne la conception, l'implantation et la mise en opération d'un système permettant une exécution robotisée du jeu de la Tour d'Hanoi. L'importance d'un tel système est dans son potentiel d'illustration, d'analyse et d'expérimentation, dans un cadre de laboratoire bien défini et contrôlé, d'une grande variété des problèmes qui se posent lors de la robotisation des opérations d'assemblage en milieu industriel. Nous mentionnons entre autres: la reconnaissance des pièces à assembler, la détermination de l'agencement des opérations nécessaires, le guidage du robot, l'architecture conceptuelle, matérielle et logicielle du système, les problèmes des interconnexions informatiques etc...

Une solution de ces problèmes requiert souvent l'emploi de plusieurs élements technologiques avancés: vision par ordinateur, robot, liens télématiques complexes, capteurs etc... Elle requiert aussi l'utilisation d'un nombre de techniques d'une grande actualité et au niveau de l'état de l'art: description cinétique de la scène, contrôle sous rétroaction visuelle d'un manipulateur articulé, algorithmes de reconnaissance

de forme, algorithmes de prise de décision, modalités d'interfaçage, etc... Tous ces élements peuvent être retrouvés d'une façon naturelle dans le développement d'un système permettant une exécution robotisée du jeu de la Tour d'Hanoi. D'où l'intérêt de notre projet.

Un projet d'une telle envergure peut difficilement être réalisé par une seule personne. Ainsi dans le cadre spécifique qui nous concerne, la réalisation de notre système de robotisation a bénéficié des efforts de plusieurs étudiants. Il nous est agréable de mentionner entre autres: Vincent Lacasse (mise au point des sous routines permettant une opération en Pascal/z du système d'opération Matrox) [21]; Daniel Chiasson, François Valérien [28], Haig Terzian [27] et André Blanchet [16] (développement des sous routines pour le contrôle du manipulateur robotique); Célestin Ratzimbazafy [23] (Oeuvre de coordination du travail des étudiants ci-haut mentionnés; programmation du jeu de la Tour d'Hanoi; participation avec l'auteur de ce mémoire à l'amélioration et à la mise au point de plusieurs logiciels); André Terroux [26] (développement d'un progiciel CAO pour la simulation infographique du système); Anh Tu Nguyen [29] (étude de sensibilité du comportement dynamique d'un manipulateur robotique); Jean

Claude Piedboeuf [30] (commande de poutre flexible par rétroaction visuelle).

Le travail présenté dans ce memoire complète ces nombreux efforts jusqu'à l'obtention d'un système global opérationnel. Pour ce faire il a été nécessaire de: concevoir et mettre au point un système de guidage du robot sous rétroaction visuelle; mettre au point le système de communication entre les differents micro-ordinateurs qui font partie du système; concevoir et mettre au point le logiciel d'application relatif au traitement d'image (calibration, localisation des disques, centrage des disques); intégrer dans un tout cohérent et opérationnel les contributions offertes par les étudiants ci-haut mentionnés.

CHAPITRE I

PROBLEMATIQUE

I-1 OBJECTIFS

Ce document a pour but de présenter les matériels et les logiciels pour exécuter le jeu de la tour d'Hanoï.

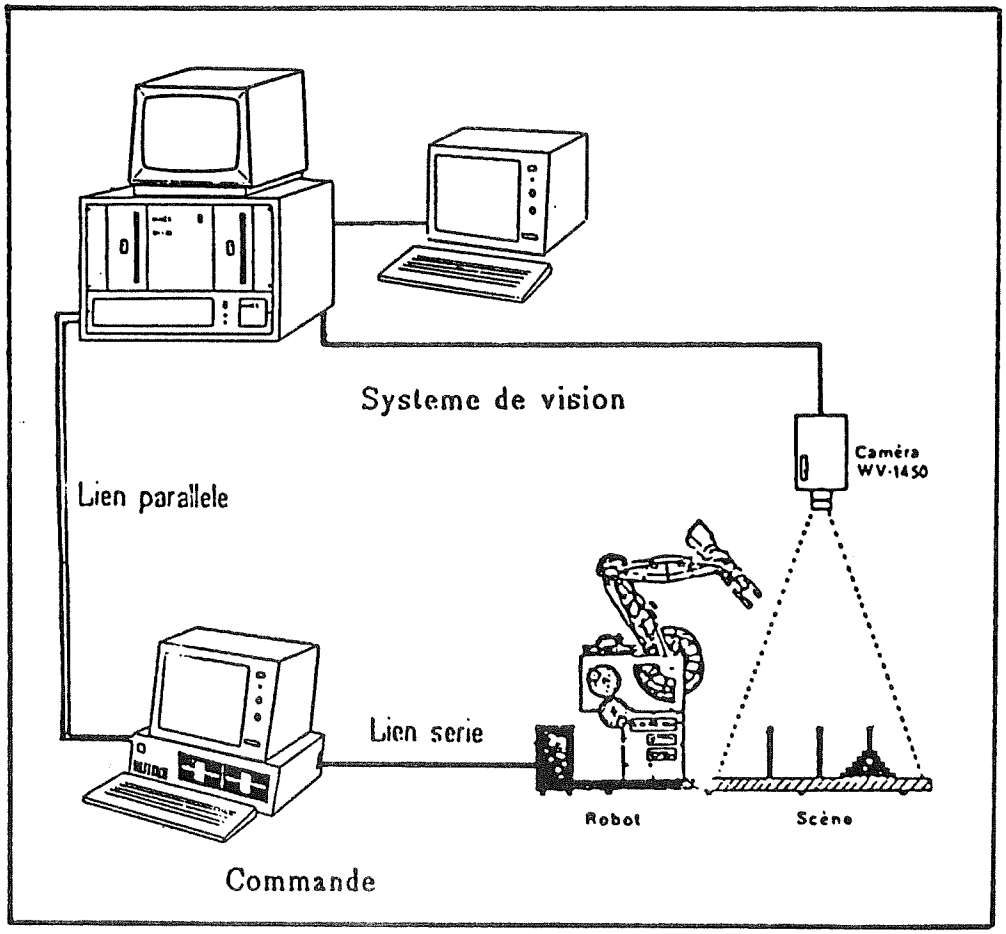

Figure 1.1: Vue d'ensemble du banc d'essai.

L'utilisation de la rétroaction d'image pour guider un robot de performance limitée, l'intégration d'un nombre de micro-ordinateurs appartenant à des classes différentes et l'utilisation de plusieurs types et niveaux de langages, illustrent les aspects particuliers de ce projet.

I-2 DESCRIPTION DU JEU DE LA TOUR D'HANOI

Le jeu de la tour d'Hanoï est constitué de trois pôles verticaux installés sur une plate-forme horizontale, et de N disques de diamètres différents avec un trou central (Figure 1.2).

Au départ les disques sont empilés d'une façon aléatoire autour des trois pôles. Les piles sont formées par ordre décroissant de diamètre des disques [23] (un disque plus petit est placé au dessus d'un disque plus grand).

L'exécution du jeu implique le déplacement des disques dans un pôle, appelé pôle de destination (disons P3), en respectant les règles suivantes:

1.- un seul disque à la fois est déplacé d'un pôle à un autre.

2.- un disque ne peut pas être placé au-dessus d'un disque plus petit.

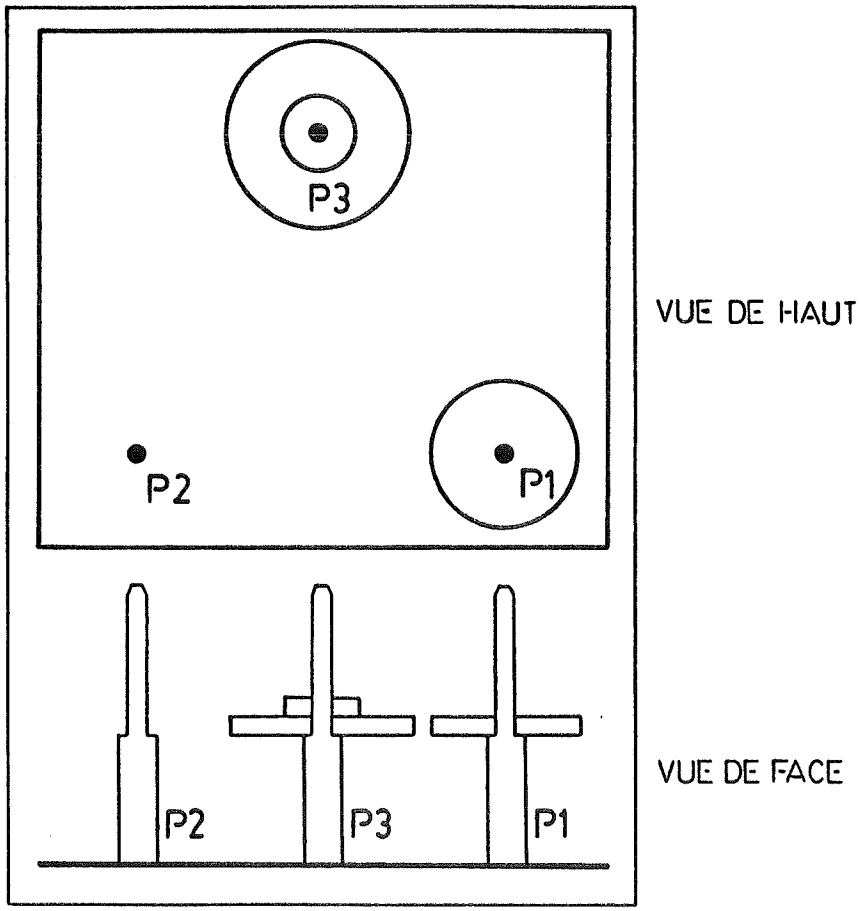

Figure 1.2: Table de jeu de la tour d'Hanoï.

I-3 PRINCIPE DE ROBOTISATION DU JEU

La robotisation du jeu de la tour d'Hanoï se réalise en utilisant les composantes matérielles et logicielles illustrées aux figures 1.1 et 1.3.

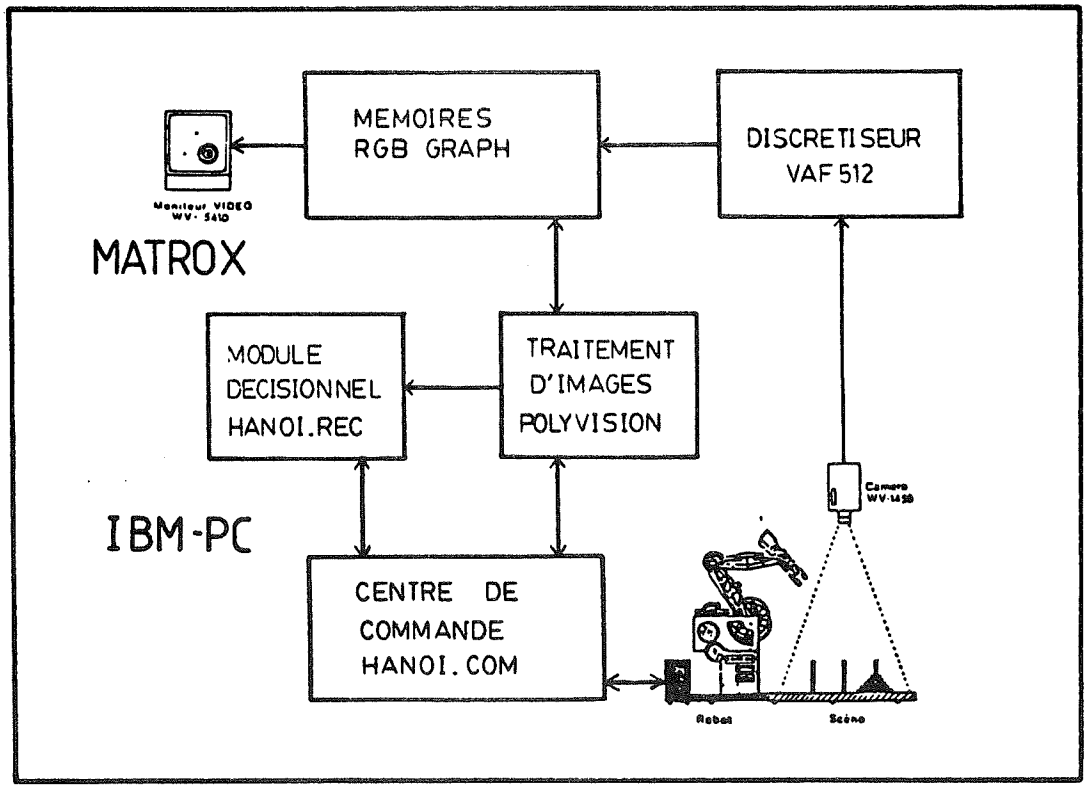

Figure 1.3: Diagramme bloc du système de robotisation.

Le principe de robotisation du système est le suivant :

1.- L'image de la scène du jeu est captée par la caméra.

2.- Le signal vidéo correspondant à la scène est discrétisé par un discrétiseur VAF-512 ; il est placé ensuite en mémoires RGB-GRAPH.

3.- L'image discrétisée est traitée numériquement par le module de traitement d'image; le résultat de ce traitement est représenté par la détermination de la localisation des disques dans les piles.

4.- Le module décisionnel reçoit comme entrées, la localisation de disques dans les piles et le numéro du pôle de destination ; il donne comme sortie, au centre de commande, la stratégie optimale qui est nécessaire pour le déplacement des disques.

5.- Le centre de commande génère les séquences d'instructions élémentaires qui sont nécessaires pour effectuer les déplacements et qui sont compatibles avec l'opération du contrôleur de Rhino.

6.- Le contrôleur s'occupe de faire exécuter les instructions adressées aux divers moteurs de Rhino.

7.- L'opération de déplacement des disques est en partie supervisée par l'action du système de vision.

CHAPITRE II

COMPOSANTS DU SYSTEME DE ROBOTISATION

Le banc d'essai utilisé pour la robotisation du jeu de la tour d'Hanoï nécessite autant de composantes matérielles que de composantes logicielles. Ce chapitre se compose de deux parties. Dans une première partie de ce chapitre nous décrivons les composantes matérielles. Les composantes logicielles ainsi que la structure de l'ensemble sont discutées dans la seconde partie.

II-1 COMPOSANTES MATERIELLES DU SYSTEME DE ROBOTISATION

Tel qu'indiqué à la figure 1.3, le système de robotisation est constitué de trois sous systèmes :

1.- un robot,

2.- un système de vision

3.- et un système de guidage de robot

II-1.1 Robot RHINO XR-1

Le RHINO XR-1 représenté à la figure 2.1 est un robot à caractère éducationnel possédant cinq degrés de liberté [25]. Il pèse 11,25 Kg et peut soulever une charge maximale de 2,25 Kg. Les portées horizontales et

verticales sont respectivement de 57.15 cm. et 81.28 cm. Les cinq articulations ainsi que la pince sont actionnées par des moteurs à courant continu de 12 volts munis d'encodeurs optiques intégrés. Les moteurs en question sont commandés par un contrôleur de type tout ou rien (Bang-Bang; voir Figure 2.2).

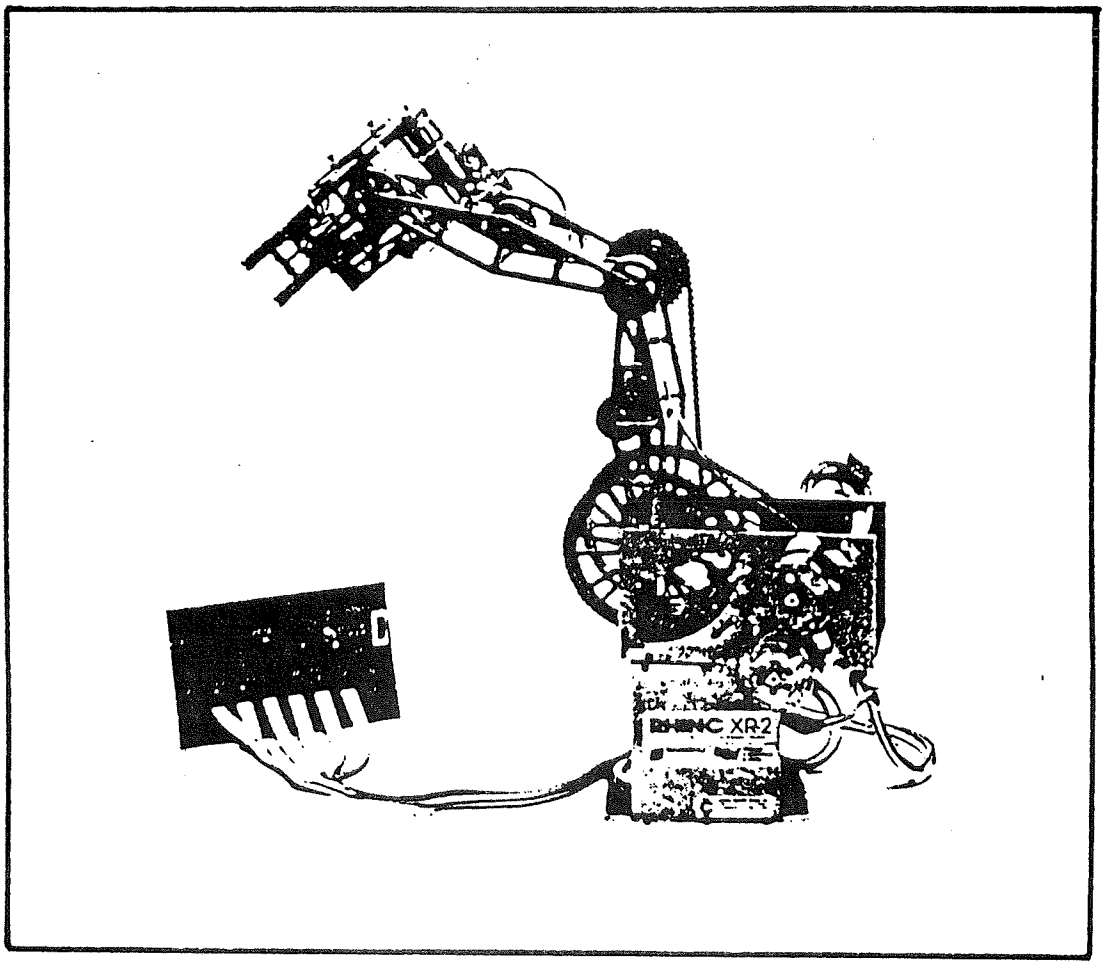

Figure 2.1: Robot RHINO XR-1

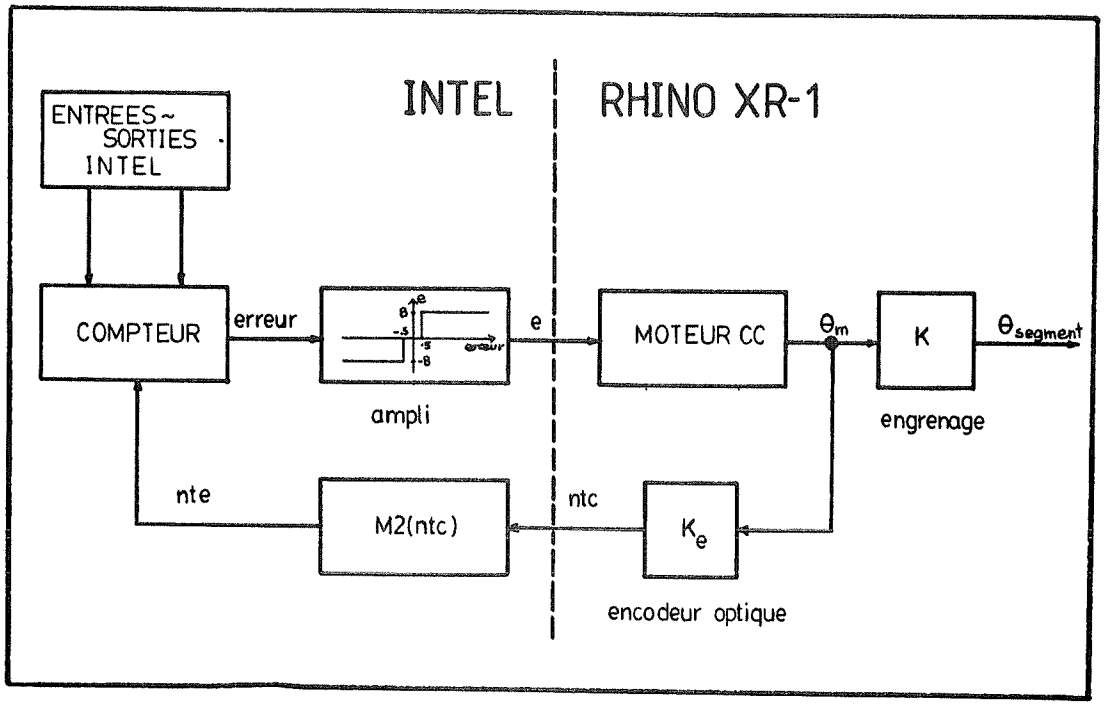

Figure 2.2: Diagramme fonctionnel de l'asservissement d'une articulation.

II-1.2 Système de vision

Une vue d'ensemble des composantes matérielles du système de vision est illustrée à la figure 2.3.

Le système est constitué des éléments suivants :

- un micro-ordinateur MATROX ZBC 80 (MACS CCB-7)
- un clavier et un écran DT80/1
- une caméra vidéo SONY AVC 3210
- un moniteur vidéo PANASONIC WV-5410

- un discrétiseur d'image vidéo VAF 512/4A
- une mémoire dédiée au stockage d'une image 256x256x4, RGB GRAPH (RGB-G/16/4)

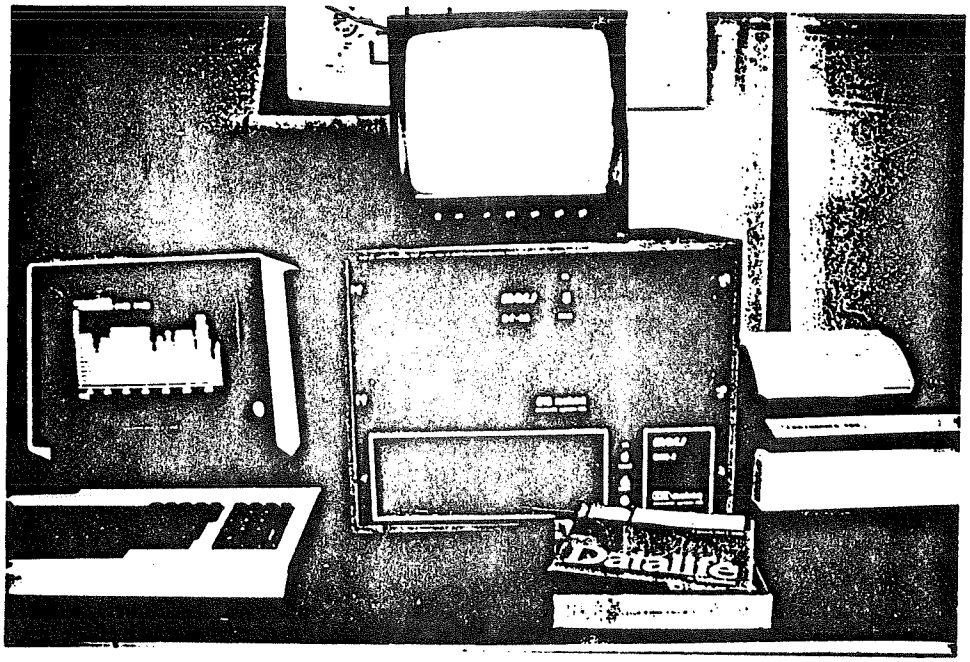

Figure 2.3: Système de vision

Le principe d'opération du système est illustré en schéma bloc à la figure 2.4. Le discrétiseur (VAF

512/4A) transforme le signal vidéo capté par la caméra en luminosité pontuelle sur un mot de 8 bits. Les signaux de l'image discrétisée sont ensuite enregistrés dans les mémoires dédiées (RGB-GRAPH) de 64k sous un format de 256x256 avec 4 bits de profondeur représentant 16 niveaux de teinte de gris de l'image. Les mémoires RGB-GRAPH sont accessibles en tout moment par le micro-ordinateur MATROX ZBC 80. Une description détaillée de toutes ces composantes peut être trouvée aux références [1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7].

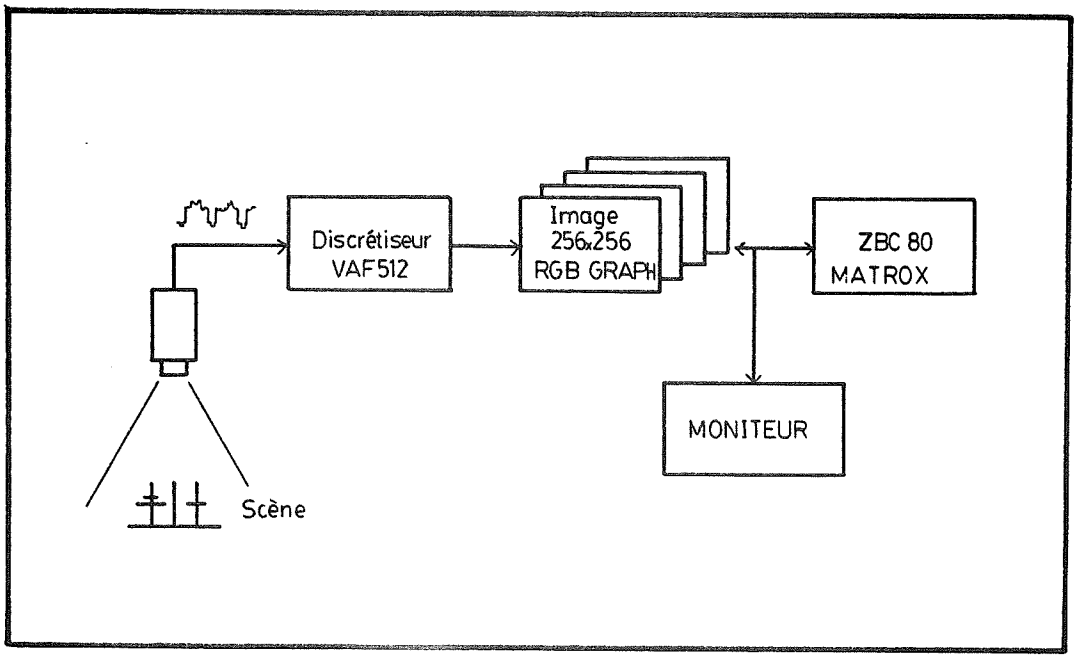

Figure 2.4: Schéma bloc du système de vision

II-1.3 Système de guidage du robot

Une vue d'ensemble des composantes matérielles du système de guidage du robot est montrée à la figure 2.5. Le système est constitué des éléments suivants :

- un micro-ordinateur IBM PC
- un clavier et un moniteur graphique couleur IBM
- une imprimante EPSON FX-80

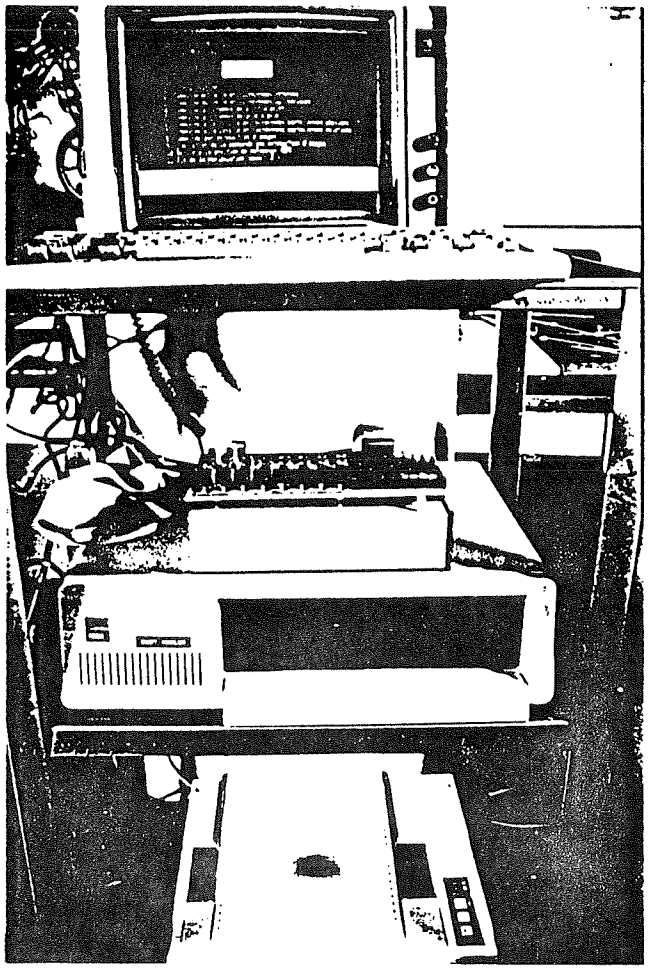

Figure 2.5: Système de guidage du robot.

Le micro-ordinateur IBM PC possède deux unités de disquette et des mémoires vives (RAM) de 512k. Il possède en plus un coprocesseur 8087, une carte AST I/O PLUS, une carte graphique IBM, une carte LAB MASTER TECMAR, 16 entrées convertisseurs A/N de 12 bits, 2 sorties convertisseurs N/A de 12 bits, un port de communication parallèle pour communiquer avec le système de vision et un port de communication sérielle RS-232 pour communiquer avec le contrôleur de RHINO XR-1. Une description plus detaillée sur le système de guidage peut être trouvée aux références [9] et [13].

La fonction du système de guidage est de calculer les trajectoires de transfert et les séquences de valeurs des articulations pour effectuer la commande point-point du robot.

Le système de guidage peut oeuvrer aussi bien comme élément du système de robotisation du jeu de la tour d'Hanoï que comme élément indépendant.

Dans le premier cas, les données proviennent du système de vision. Le système de guidage communique avec ce dernier pour réaliser les commandes par rétroaction d'image.

Dans le deuxième cas, le robot est commandé directement à partir du clavier du IBM PC.

La figure 2.6 illustre le montage des composantes matérielles du système de robotisation.

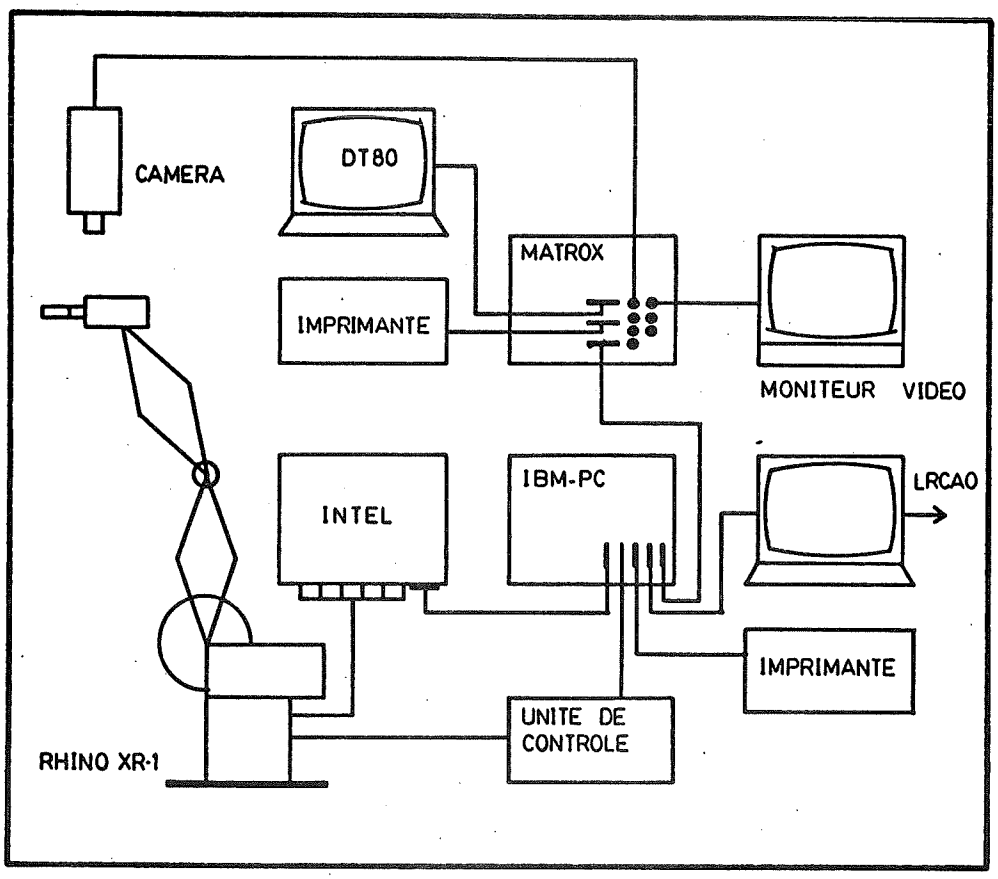

Figure 2.6: Montage des composantes matérielles du système de robotisation.

II-2 COMPOSANTES LOGICIELLES DU SYSTEME DE ROBOTISATION

Les composantes logicielles du système de robotisation sont classées en deux groupes: composantes du système de vision et composantes du système de guidage.

II-2.1 Composantes logicielles du système de vision

Les composantes logicielles du système de vision sont classées en deux catégories : logiciel de support de base et logiciel d'application relatif au traitement d'image.

Le logiciel de support de base permet de :

1.- initialiser les processus de discrétisation et de numérisation de l'image;

2.- geler ou replacer en mémoire les valeurs des points de l'image;

3.- lire ou écrire les valeurs de la luminosité des points de l'image.

Le logiciel de support de base est représenté par le fichier LOGAP.SRC (Tableau 2.1). Les fonctions des sous programmes se trouvant dans ce fichier sont

expliquées en appendice A et une description détaillée peut être retrouvée dans la référence [21].

Le logiciel d'application relatif au traitement d'image se compose principalement de quatre modules :

1. - module de calibration
2. - module de localisation des disques
3. - module de décision
4. - et module de centrage des disques.

Le module de calibration permet de régler l'éclairage de la scène, de localiser la position des pôles de la tour d'Hanoï et de calculer les facteurs d'échelle pour les différents niveaux de disques.

A partir de la luminosité des points de l'image emmagasinée en mémoire dédiée, la module de localisation des disques permet de déterminer et de classifier les disques empilés sur chaque pôle.

A partir du numéro du pôle de destination (donné par l'opérateur) et des données du module de localisation des disques, le module de décision calcule la stratégie optimale de déplacement des disques et génère toutes les instructions nécessaires au système de guidage.

```
;*************************************************************
;
; ENSEMBLE DE PROGRAMMES ASSEMBLEUR POUVANT ETRE EXECUTE
; PAR PASCAL/Z.
;
; SOUS PROGRAMMES DISPONIBLES DANS CE FICHIER :
; ---------------------------------------------
;
;       PROCEDURE INIT; EXTERNAL;        ( AUCUN PARAMETRE )
;               ( FAIT L'INITIALISATION DU VAF-512 ET LE MET EN )
;               ( MARCHE. (DIGITALISATION DE L'IMAGE).          )
;
;       PROCEDURE FREEZE; EXTERNAL;      ( AUCUN PARAMETRE )
;               ( FAIT UN FREEZE DE L'IMAGE DIGITALISER         )
;
;       PROCEDURE DIRECT; EXTERNAL;      ( AUCUN PARAMETRE )
;               ( INVERSE DE FREEZE. L'IMAGE EST REDIGITALISER  )
;               ( TRES RAPIDEMENT.                              )
;
;       PROCEDURE POINT ( X, Y: BYTE; LUMIN: NIBBLE); EXTERNAL;
;               ( IMPRIME UN POINT (COORDONNEES X, Y) DE LUMINO-)
;               ( SITE LUMIN DANS RGB-GRAPH                     )
;
;       PROCEDURE IPOINT ( X, Y: BYTE; VAR LUMIN: NIBBLE); EXTERNAL;
;               ( PREND UN POINT (COORDONEES X, Y) DANS RGB-GRAPH)
;               ( ET LE MET DANS LA VARIABLE LUMIN.             )
;
;       PROCEDURE IHLIN ( X, Y, N: BYTE; VAR TLUM: TAB_NIB);
;                       EXTERNAL;
;               ( (INPUT HORIZONTAL LINE) PREND UNE LIGNE       )
;               ( HORIZONTALE DE N PIXEL(S) A PARTIR DE X ET Y  )
;               ( ET LA DISPOSE DANS LE TABLEAU TLUM.)
;
;       PROCEDURE IVLIN ( X, Y, N: BYTE; VAR TLUM: TAB_NIB);
;                       EXTERNAL;
;               ( (INPUT VERTICAL LINE) PREND UNE LIGNE VERTICALE)
;               ( DE N PIXEL(S) A PARTIR DE X ET Y ET LA DISPOSE )
;               ( DANS LE TABLEAU TLUM )
;
;       PROCEDURE IHALIN ( Y: BYTE; VAR TLUM: TAB_NIB);
;                       EXTERNAL;
;               ( (INPUT HORIZONTAL ABSOLUTE LINE) PREND UNE    )
;               ( LIGNE HORIZONTALE DE 256 PIXELS A PARTIR DE   )
;               ( X=0 ET Y (DONNE EN PARAMETRE) .               )
;               ( CETTE ROUTINE EST UNE VERSION DE IHLIN SIMPLI )
;               ( FIE . )
;
;       PROCEDURE IVALIN ( X: BYTE; VAR TLUM: TAB_NIB);
;                       EXTERNAL;
;               ( (INPUT VERTICAL ABSOLUTE LINE) PREND UNE      )
;               ( LIGNE VERTICAL DE 256 PIXELS A PARTIR DE Y=0  )
;               ( ET X (DONNE EN PARAMETRE).                    )
;               ( SIMPLIFICATION DE IVLIN. )
;
;       PROCEDURE OHLIN  ( X, Y, N: BYTE; VAR TLUM: TAB_NIB);
;                       EXTERNAL;
;               ( (OUTPUT HORIZONTAL LINE) IMPRIME UNE LIGNE    )
;               ( HORIZONTALE SUR L'ECRAN A PARTIR DE X ET Y    )
;               ( LONGUEUR DE LA LIGNE = N. LA LIGNE EST TRANSMISE)
;               ( DANS LA VARIABLE TLUM. )
;
;       PROCEDURE OVLIN  ( X, Y, N: BYTE; VAR TLUM: TAB_NIB);
;                       EXTERNAL;
;               ( (OUTPUT VERTICAL LINE) IMPRIME UNE LIGNE      )
;               ( VERTICALE SUR L'ECRAN A PARTIR DE X ET Y      )
;               ( LA LONGUEUR DE LA LIGNE = N. LA LIGNE EST     )
;               ( TRANSMISE DANS LA VARIABLE TLUM. )
;
;       PROCEDURE OHALIN ( Y: BYTE; VAR TLUM: TAB_NIB); EXTERANL;
;               ( (OUTPUT HORIZONTAL ABSOLUTE LINE) IMPRIME UNE )
;               ( LIGNE HORIZONTALE DE 256 ELEMENTS SUR L'ECRAN )
;               ( A LA HAUTEUR Y. )
;
;       PROCEDURE OVALIN ( X: BYTE; VAT TLUM: TAB_NIB); EXTERNAL;
;               ( (OUTPUT VERTICAL ABSOLUTE LINE) IMPRIME UNE   )
;               ( LIGNE VERTICALE DE 256 ELEMENTS SUR L'ECRAN   )
;               ( A LA POSITION X. )
;
;*************************************************************
```

Tableau 2.1: Liste des sous programmes de logiciel de support de base: LOGAP.SRC

A partir de la luminosité des points de l'image, le module de centrage des disques permet de déterminer l'écart entre la position du centre du disque transporté par la pince du robot et celle du sommet du pôle d'arrivée.

Les sous programmes du module de calibration sont regroupés dans le fichier CALIBVIS.PAS/COM dont le menu général est montré au tableau 2.2. Le tableau 2.3 illustre le menu général du fichier POLYVIS.PAS/COM qui regroupe tous les sous programmes des modules de localisation des disques, de décision et de centrage des disques.

En plus de ces quatres modules, le logiciel d'application possède un sous programme qui s'occupe de maintenir la communication bidirectionnelle entre le système de vision et le système de guidage. Ce sous programme se trouve dans le fichier MATRIBM.SRC.

Un exemple de manipulation de chaque module du logiciel d'application relatif au traitement d'image est décrit au chapitre III. Une description détaillée de ce logiciel se trouve en appendice B.

```
POLYVISION   VERS.  1.0   MAI 1985
-----------------------------------

          MENU GENERAL

   /1     INITIALISATION
   /2     CALIBRATION
   /3     MODIFICATION DE PARAMETRES
   /4     VERIFICATION DE DONNEES ENREGISTREES
   /5     FIN

>>> VOTRE CHOIX  : CAL>_
```

Tableau 2.2: Menu général de CALIBVIS.PAS/COM

```
POLYVISION   VERS.  1.0   MAI 1985
-----------------------------------

          MENU GENERAL

   /1     INITIALISATION
   /2     MODIFICATION ET CORRECTION
   /3     EXECUTION PAR LA RETROACTION VISUELLE
   /4     TRANSMISSION DE HANSEQI.DAT ( HANOI )
   /5     FIN

>>> VOTRE CHOIX  : VIS>_
```

Tableau 2.3: Menu général de POLYVIS.PAS/COM

II-2.2 Composantes logicielles du système de guidage

Les composantes logicielles du système de guidage se compose de deux parties. La première permet au système de commander le robot directement à partir du clavier du IBM-PC (menu No 3 et 4 du tableau 2.4). La deuxième partie contient tous les sous programmes nécessaires permettant de réaliser, en coordination avec le système de vision, les commandes par rétroaction visuelle (menu No 4 et 5 du tableau 2.4). Tous les sous programmes dont le menu général se présente au tableau 2.4 sont regroupés dans le fichier RETROIMA.PAS/COM.

```
*****************************************************
** JEU DE LA TOUR D'HANOI PAR LA RETRO-ACTION D'IMAGE **
************************************** Version 1.0 *****

>>>>>>>>>>>>>>>>    MENU GENERAL      <<<<<<<<<<<<<<<<<<

   1   INITIALISATION DE RHINO XR-1
   2   MODIFICATION DE PARAMETRES
   3   COMMANDE EN COORDONNEES CARTIESIENNES
   4   EXECUTION AVEC CENTRAGE MANUEL
   5   EXECUTION AUTOMATIQUE
   6   MESSAGE D'ABANDON A MATROX
   7   FIN

>>> Votre choix : 1
```

Tableau 2.4: Menu général de RETROIMA.PAS/COM

Le logiciel du système de guidage possède en plus deux sous programmes de communication. Le premier, IBMMTR.ASM, maintient la liaison bidirectionnelle avec le système de vision, et le deuxième, RHIBM.ASM, établit la communication entre le système de guidage et le contrôleur de RHINO-XR1.

Un exemple de manipulation de chaque fonction du logiciel du système de guidage est expliqué au chapitre III. Une description détaillée de ce logiciel se trouve en appendice C. Les détails sur les modules de communication (MATRIBM.SRC, IBMMATR.ASM et RHIBM.ASM) sont présentés dans l'appendice D.

CHAPITRE III

ILLUSTRATION DES MODALITES D'OPERATION

L'exécution robotisée du jeu de la tour d'Hanoï s'articule autour des opérations de calibration, de localisation de disques, d'exécution du module de décision et de centrage des disques par rétroaction visuelle.

Le logiciel de robotisation du jeu de la tour d'Hanoï par rétroaction visuelle se divise en deux groupes. Le premier, représenté par le fichier CALIBVIS.PAS/COM, couvre la calibration du système de vision. Le second groupe, représenté par le fichier POLYVIS.PAS/COM, couvre l'exécution du jeu de la tour d'Hanoï par rétroaction visuelle. L'acquisition d'image, le traitement d'image, la prise de décisions, la simulation du jeu de la tour d'Hanoï, le centrage des disques et la transmission de données de commande vers le système de guidage font partie intégrale de ce second groupe.

III-1 CALIBRATION DU SYSTEME DE VISION

L'opération la plus difficile et la plus longue

dans la robotisation du jeu est sans doute la calibration du système de vision.

Moyennant l'exécution du programme CALIBVIS.COM, le système de vision initialise son RGB-GRAPH, l'image digitalisée apparait au moniteur (Panasonic WV5410) et le menu de calibration (Tableau 2.2) est affiché à l'écran DT80/1.

L'opération de calibration du système de vision s'effectue en deux étapes: l'ajustement de l'éclairage de la scène et le repérage des points de calibrage pour évaluer les facteurs d'échelle. Ces deux étapes nécessitent continuellement des interventions de l'opérateur.

III-1.1 Ajustement de l'éclairage de la scène

Cette étape consiste à règler l'éclairage de la scène de la tour d'Hanoï. En fonction de l'image digitalisée observée sur le moniteur du système de vision, l'opérateur doit ajuster selon son bon jugement la clarté de l'image. Les zones critiques sont les régions au voisinage des trois pôles de la tour. L'ajustement de l'éclairage a pour but d'orienter les

ombres indésirables vers les directions qui ne dérangent pas le travail du traitement d'image pour identifier le nombre de disques empilés sur chaque pôle. Il permet aussi d'améliorer les contrastes et minimiser les bruits de l'image. La figure 3.1 illustre l'histogramme d'une ligne de luminosité, pris à partir du centre d'un pôle, dans une condition acceptable de l'éclairage. La figure 3.2 le remontre dans le cas inacceptable à cause de la présence de bruits et des ombres indésirables. Les contours des disques ne sont pas assez nets en raison de la mauvaise luminosité.

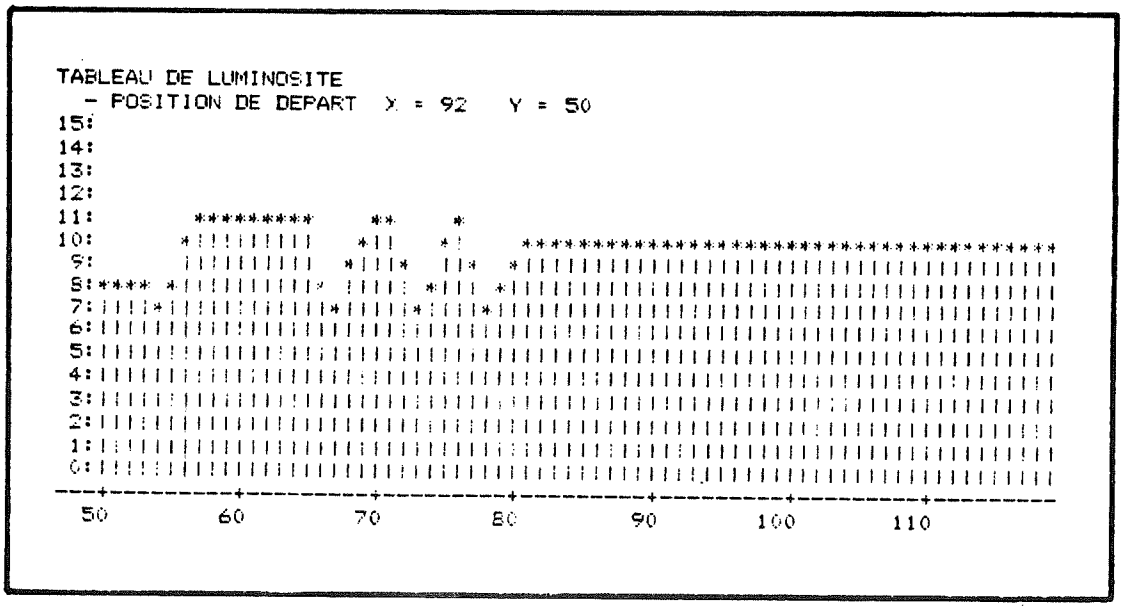

Figure 3.1: Histogramme d'une ligne de luminosité dans une condition acceptable de l'éclairage.

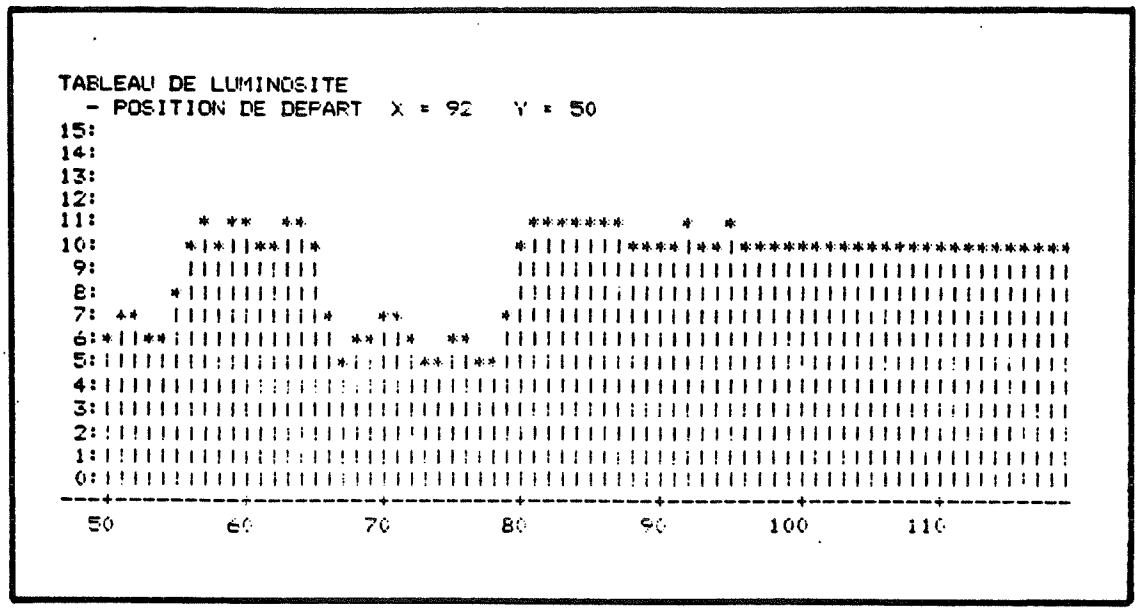

Figure 3.2: Histogramme d'une ligne de luminosité dans une condition inacceptable de l'éclairage

III-1.2 Calibration des facteurs d'échelle

La deuxième étape de la calibration consiste à repérer, en utilisant le curseur du système de vision, les cinq points P1, P2, P3, C et D montrés à la figure 3.3. Les points P1, P2 et P3 représentent les trois sommets des pôles de la tour d'Hanoï. Les point C et D correspondent aux points sur le plan de la base du jeu qui sont respectivement localisés au centre des trois pôles P1, P2 et P3 et au milieu de P1 et P2.

Les valeurs des coordonnées de ces points servent à évaluer les facteurs d'échelle pour les différents niveaux de disques empilés sur les trois pôles. Les facteurs d'échelle sont enregistrés dans le fichier ECHELLE.DAT en vue d'être reutilisés par le module de localisation de disques (Figure 3.4).

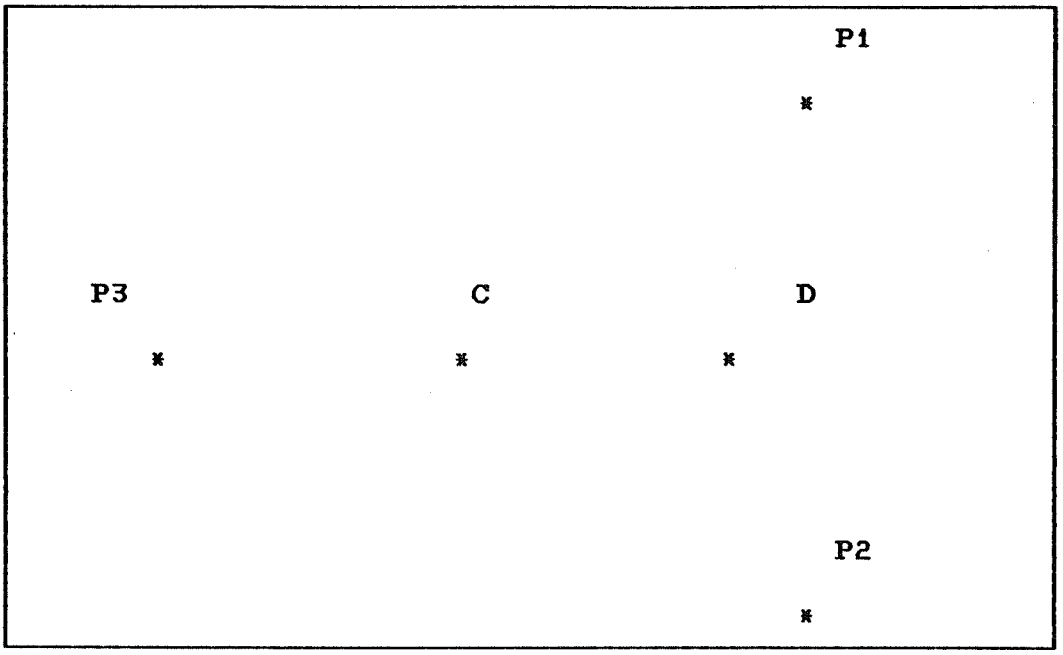

Figure 3.3: Points de calibrage.

Les coordonnées des centres de disques de différents niveaux sont aussi évaluées l'avance et sont enregistrées dans le fichier COORDISQ.DAT (Figure 3.5).

La méthode adoptée pour évaluer ces paramètres est montrée en appendice B.

```
***  FACTEURS D'ECHELLE  ***

ECHELLE VERTICALE      :    7.8 PIXELS/CM.

ECHELLE HORIZONTALE    :    6.5 PIXELS/CM.

HAUTEUR DE CAMERA      :    56.3 CM.

 NIVEAU   0 :  FACTEURV =  6.52  PIXELS/CM.
 NIVEAU   1 :  FACTEURV =  6.65  PIXELS/CM.
 NIVEAU   2 :  FACTEURV =  6.79  PIXELS/CM.
 NIVEAU   3 :  FACTEURV =  6.94  PIXELS/CM,
 NIVEAU   4 :  FACTEURV =  7.09  PIXELS/CM.
 NIVEAU   5 :  FACTEURV =  7.25  PIXELS/CM.
 NIVEAU   6 :  FACTEURV =  7.42  PIXELS/CM.
 NIVEAU   7 :  FACTEURV =  7.59  PIXELS/CM.
 NIVEAU   8 :  FACTEURV =  7.78  PIXELS/CM.
 NIVEAU   9 :  FACTEURV =  7.97  PIXELS/CM.
 NIVEAU  10 :  FACTEURV =  8.17  PIXELS/CM.
```

Figure 3.4: Illustration des facteurs d'échelle.

```
>> COORDONNEES DES CENTRES DES DISQUES (NIVEAU K=[0..10]) <<

NIV   POLE 1        POLE 2        POLE 3
      X , Y         X , Y         X , Y
 0    196  42       205 188       82 121
 1    197  41       206 188       81 121
 2    197  40       207 188       81 121
 3    197  39       207 188       80 121
 4    198  38       208 189       80 120
 5    198  37       209 189       79 119
 6    198  36       209 189       78 119
 7    199  35       210 189       78 119
 8    199  34       211 190       77 118
 9    199  32       212 190       77 118
10    200  31       212 190       76 117

####  POLE 1  :  [ 200 ,  34 ]
####  POLE 2  :  [ 211 , 189 ]
####  POLE 3  :  [  77 , 119 ]
```

Figure 3.5: Illustration des coordonnées des centres de disques.

III-2 LOCALISATION DE DISQUES

Moyennant l'exécution du programme POLYVIS.COM, le système de vision initialise son RGB-GRAPH, l'image digitalisée apparaît au moniteur. Les liens de communication entre le système de vision et le système de guidage sont rétablis. Les données de calibration dans les fichiers COORDISQ.DAT et ECHELLE.DAT sont rechargées et finalement le système est prêt à exécuter le jeu en affichant au moniteur DT80/1 le menu illustré au tableau 2.3.

L'exécution du jeu de la tour d'Hanoï commence par le module de localisation de disques. La figure 3.6 illustre la configuration de départ de la scène de la tour d'Hanoï captée par la caméra du système de vision (MATROX). Trois disques (No-1, No-2 et No-3) sont empilés sur les pôles. Le pôle 1 ne possède aucun disque, le pôle 2 possède un disque (No-2), et le pôle 3 possède deux disques (No-1 et No-3).

Le module de localisation des disques crée une fenêtre de recherche centrée au sommet de chaque pôle. A partir de la luminosité de l'image emmagasinée dans les mémoires RGB-GRAPH, correspondant à chaque fenêtre, il

détermine le nombre de disques empilés sur chaque pôle.

La figure 3.7 illustre l'histogramme d'une ligne de luminosité de l'image lue à partir du sommet du pôle 3. Cet histogramme montre nettement deux creux (à x=94 et x=99) sur la ligne de luminosité et affirme la présence de deux disques sur ce pôle. Le creux se trouvant près de l'origine représente l'ombre du sommet du pôle et sera ignoré par le module de localisation de disques.

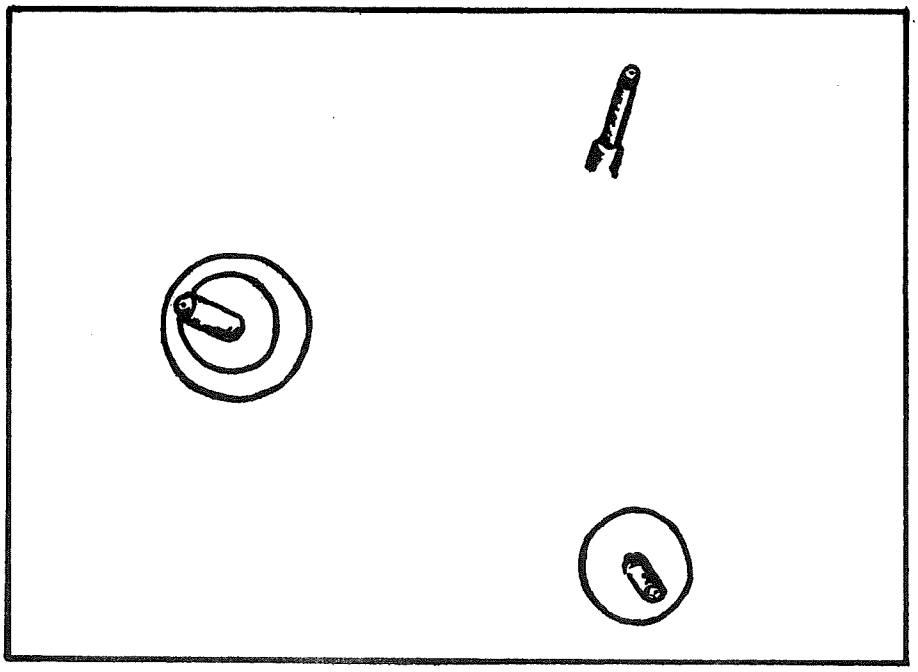

Figure 3.6: Scène vue par le sytème de vision

Les résultats de la localisation des disques, montrés à la figure 3.8, sont illustrés sous formes des numéros des disques empilés en colonne. Chaque colonne représente un pôle. Le niveau 10 est le niveau le plus bas et le niveau 1 est le niveau le plus haut (pour le cas présent, le programme est prévu pour exécuter un jeu possédant jusqu'à 10 disques).

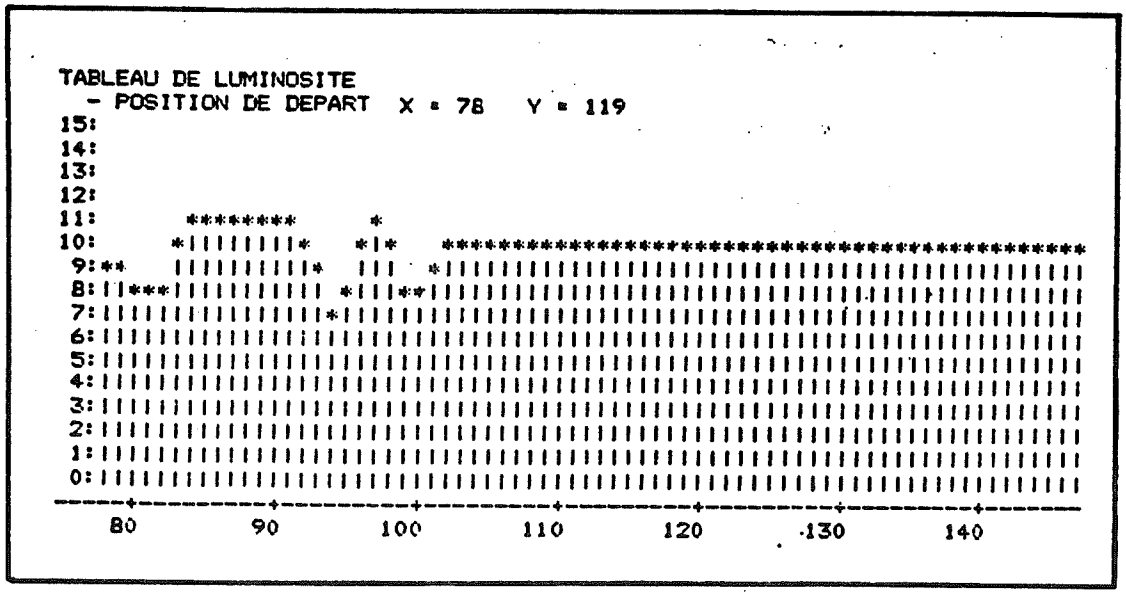

Figure 3.7: Histogramme d'une ligne de luminosité

*** LES DONNEES POUR HANOI ***

NIV	POLE 1	POLE 2	POLE 3
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	1
10	0	2	3

Figure 3.8: Résultat de la localisation de disques de la figure 3.6.

Les chiffres figurant dans les colonnes représentent le numéro de calibre du disque se trouvant à ce niveau. Le chiffre "0" représente une absence de disque.

Ainsi le résultat de la figure 3.8 confirme que le pôle 1 ne possède aucun disque, que le pôle 2 en possède un (No-2) au 10ème niveau et que le pôle 3 en possède deux (No-1 et No-3) respectivement au 9ème et

10ème niveau. Les résultats de localisation de disques sont enregistrés dans le fichier HANVIS.DAT en vue d'être utilisés par le module de décision.

III-3 EXECUTION DU MODULE DE DECISION

En utilisant les résultats enregistrés dans HANVIS.DAT, le module de décision affiche d'abord la configuration initiale de la scène sur l'écran DT80/1 sous forme de dessin (Figure 3.9). Il demande ensuite à l'opérateur de déterminer le pôle de destination.

Une fois le pôle de destination choisi (par exemple : pôle 3), les étapes de déplacement des disques sont d'abord simulées sur l'écran de DT80/1 (Figures 3.10 à 3.12). Dans le cas illustré, le jeu s'exécute en trois étapes. Ces étapes sont ensuite transmises par un lien parallèle au système de guidage (module de commande).

```
     I            I            I            3
     I            I           =I=           2
     I          ==I==       ===I===         1

   POLE 1       PLOLE 2      POLE 3      NIVEAU

CONFIGURATION DE DEPART
#######################

POLE DE DESTINATION ...... [1..3]  = 3

POLE DE DESTINATION ...... : 3
CAS GENERAL : POSITION DE DEPART QUELCONQUE
```

Figure 3.9: Configuration initiale

```
     I            I            I            3
     I            I            I            2
    =I=         ==I==       ===I===         1

   POLE 1       PLOLE 2      POLE 3      NIVEAU

MOUVEMENT DE L'ETAPE 1 :
========================

DISQUE  R1  DU POLE  P3  AU POLE  P1
```

Figure 3.10: Etape 1

```
      I              I              I              3
      I              I            ==I==            2
     =I=             I          ===I===            1

    POLE 1        PLOLE 2        POLE 3        NIVEAU

  MOUVEMENT DE L'ETAPE 2 :
  ========================

  DISQUE  R2  DU POLE  P2  AU POLE  P3
```

Figure 3.11: Etape 2

```
      I              I             =I=             3
      I              I            ==I==            2
      I              I          ===I===            1

    POLE 1        PLOLE 2        POLE 3        NIVEAU

  MOUVEMENT DE L'ETAPE 3 :
  ========================

  DISQUE  R1  DU POLE  P1  AU POLE  P3
```

Figure 3.12: Etape 3

III-4 CENTRAGE DES DISQUES

Lorsqu'un disque est déplacé au dessus d'un pôle

d'arrivée, le système de guidage, tout en communiquant avec le système de vision, effectue les opérations de centrage des disques. La figure 3.13 illustrent des extraits de résultats de ces opérations.

La correction du centrage est effectuée en opérant sur les coordonnées X et Y. Tel qu'illustrés à la figure 3.13, les résultats indiquent d'abord que le disque est transporté au point de coordonnées (41.31 , -8.75). Le module de commande demande au module de traitement d'image si le disque est bien centré. En retour, il reçoit l'erreur de centrage à corriger (0.21 , 0.12). Le module de commande envoie alors au contrôleur de Rhino les instructions nécessaires pour faire que l'erreur devienne nulle. La position du centre de disque est corrigée à (41.52 , -8.63). Le système de guidage redemande au système de vision si le disque est bien centré. En retour, il reçoit encore l'erreur du centrage à corriger (0.01 , 0.00). Le système de guidage effectue les opérations de correction ... . La flexibilié et l'imprécision du robot font que cette séquence d'opérations doit habituellement répétée plusieurs fois. Elle se répète donc jusqu'à ce que le disque soit centré dans des limites de tolérances fixées, avant de passer aux étapes suivantes.

```
#### GUIDAGE PAR LA VISION #####

Code DATA =  -30002

********  Position actuelle en  [cm.]  ********
%%%  PACT.  X :=  41.31
%%%  PACT.  Y :=  -8.75

*****  Erreur relative en [cm.]  *****
%%%  DELTA X :=   0.21
%%%  DELTA Y :=   0.12

 *****   Correction  ......  *****

D+01
E+03
F+01



#### GUIDAGE PAR LA VISION #####

Code DATA =  -30002

********  Position actuelle en  [cm.]  ********
%%%  PACT.  X :=  41.52
%%%  PACT.  Y :=  -8.63

*****  Erreur relative en [cm.]  *****
%%%  DELTA X :=   0.10
%%%  DELTA Y :=   0.00

 *****   Correction  ......  *****

D+00
E+01
F+00
```

Figure 3.13: Centrage et guidage par la vision

CHAPITRE IV

DIFFICULTES RENCONTREES DANS LE PROJET

Les principales sources de difficultés rencontrées dans le projet proviennent de plusieurs facteurs et se situent sur plusieurs niveaux.

IV-1 DIFFICULTES AU NIVEAU DE LA LOCALISATION DES DISQUES

L'image numérique disponible dans les mémoires de RGB-GRAPH est une transformation d'un espace à trois dimensions (scène réelle de la tour d'Hanoï) en un espace à deux dimensions (image de la scène). La mesure de la troisième dimension d'un objet dans une image (profondeur, hauteur, épaisseur) engendre comme difficulté une variation de luminosité et une présentation en perspective de l'objet.

IV-1.1 Effet de la variation de luminosité

Le contour d'un objet dans une image est marqué par un changement appréciable du niveau de luminosité. Une scène mal éclairée crée des lignes de contrastes qui peuvent être considérées par le système de vision comme

des contours d'un objet.

Dans le projet considéré, le système de vision détermine le nombre de disques empilés sur chaque pôle par la présence du nombre de creux sur la ligne de luminosité lue à partir de sommets des pôles et dans des directions bien déterminées. Ces creux représentent les contours des disques empilés sur ces pôles.

La présence des ombres de l'objet causées par l'éclairage sur la scène est un phénomène indésirable dans la détection du contour. Lors de la calibration du système de vision, on doit arranger le système de l'éclairage de telle manière que les ombres soient orientées dans les directions qui ne dérangent pas la partie du traitement considéré. La technique adoptée pour contourner les difficultés associées avec la localisation des disques et dûes aux effets de luminosité est expliquée dans l'appendice B.

IV-1.2 Effet de la perspective

Un objet plus petit placé près de la caméra pourrait être vu par cette dernière plus grand qu'un autre objet plus grand placé en arrière plan. Tel que

montré à la figure 4.1, sur le même plan Z, le disque D2 est vu par la caméra comme étant plus grand que le disque D1 (l est plus grand que L).

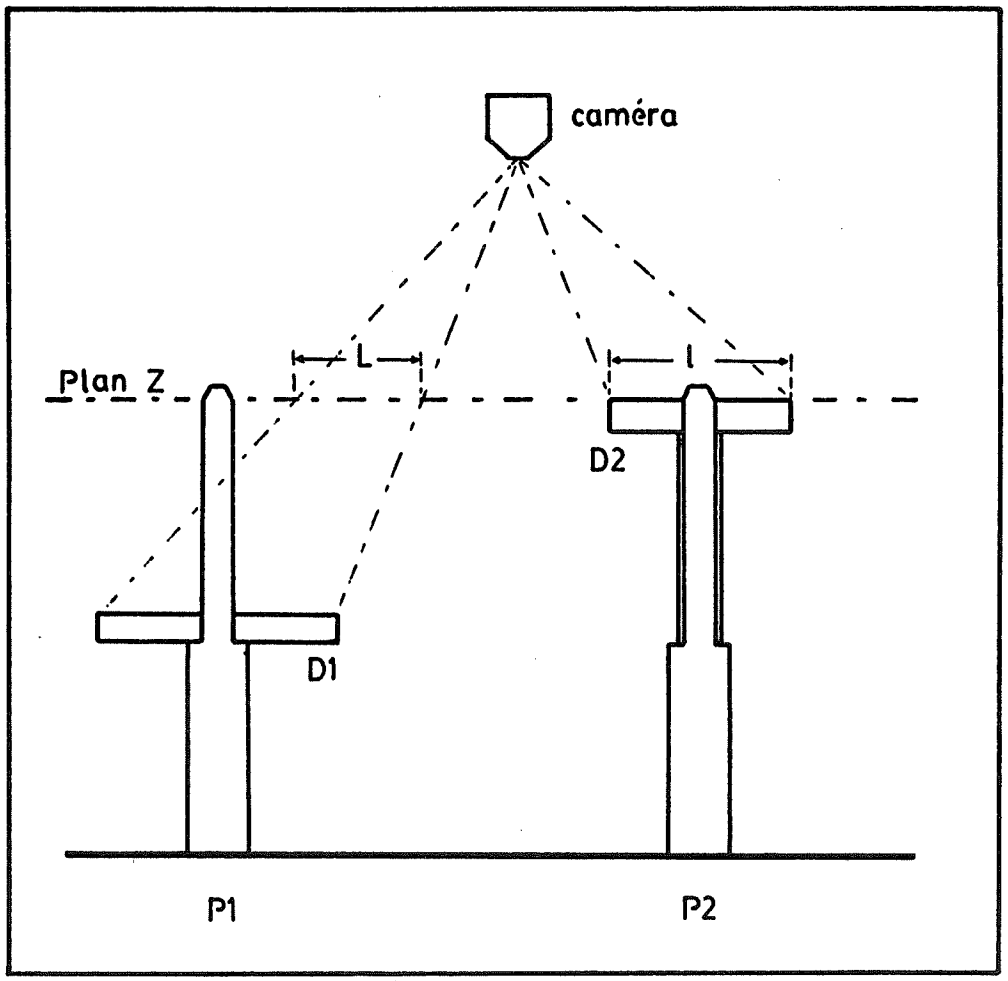

Figure 4.1: Effet de la perspective.

Pour résoudre le problème du jeu de la tour d'Hanoï tel que présenté dans ce projet, la connaissance du nombre de disques empilés sur chaque pôle n'est pas suffisante. La grandeur de chaque disque est aussi requise.

Le système de vision évalue la grandeur des disques en tenant compte non seulement du nombre de pixels de leur rayon, mais aussi il doit tenir compte du niveau auquel chaque disque se trouve. Les niveaux des disques sont déduits directement à partir du nombre de disques sur chaque pôle.

Chaque niveau correspond à un facteur d'échelle qui dépend de l'épaisseur des disques, de la hauteur et du type de la caméra.

La méthode d'évaluation de la grandeur des disques et la technique de calcul des facteurs d'échelle pour les différents niveaux sont expliquées dans l'appendice B.

IV-2 DIFFICULTES AU NIVEAU DU CENTRAGE DES DISQUES

La principale difficulté associée avec le

centrage des disques est dû à l'effet de parallaxe. Cet effet est causé par l'utilisation d'une seule caméra fixe pour observer une scène (Figure 4.2).

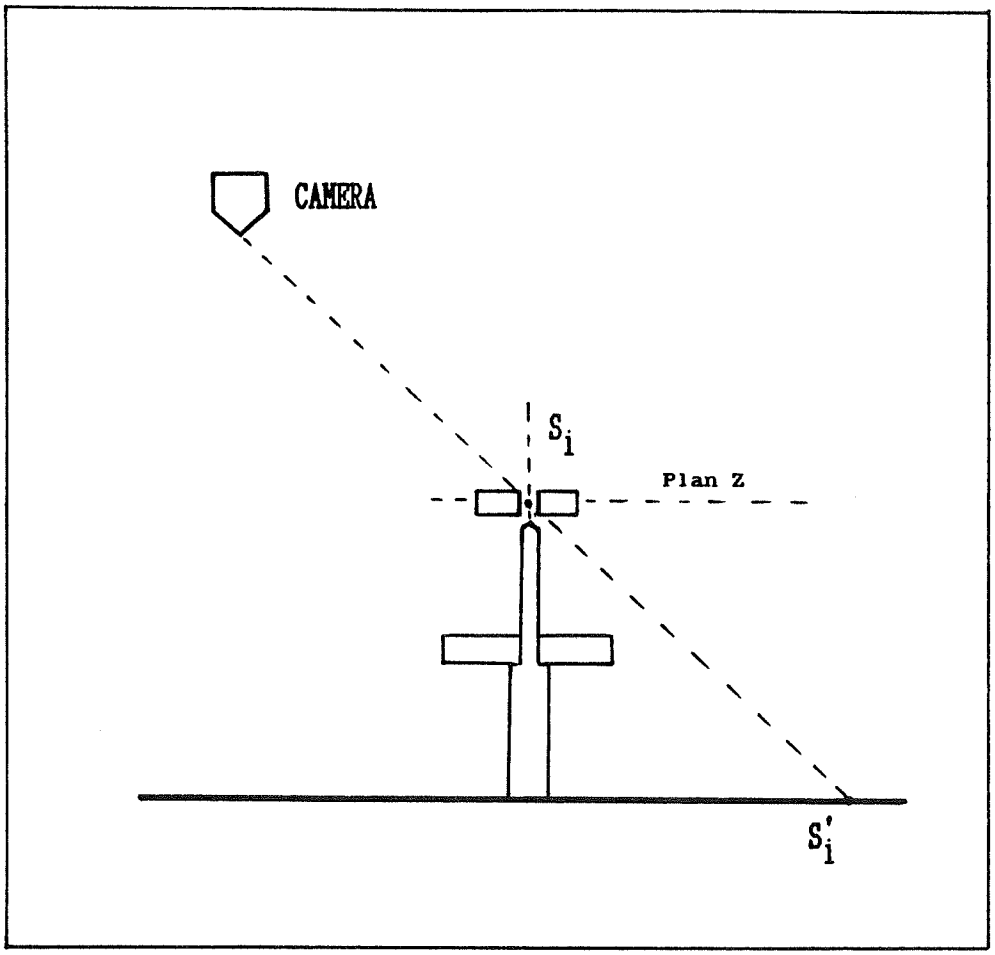

Figure 4.2: Effet de parallaxe

La solution que nous avons utilisée pour résoudre ce problème consiste à déterminer le centre imaginaire "S_i" du disque au niveau du centrage de ce dernier. Le centrage s'effectue par rapport à ce point qui se situe à l'intersection du prolongement du pôle avec la ligne horizontale du plan "Z". Les coordonnées images de ce centre dépendent directement de la hauteur actuelle du disque. Les détails de calcul des coordonnées images des centres de disques sont donnés dans l'appendice B.

IV-3 DIFFICULTES AU NIVEAU DE COMMUNICATION ENTRE LES MICRO-ORDINATEURS

Les standards différents, aux niveaux des ENTREES/SORTIES des micro-ordinateurs, nécessitent la modification du câblage des liens et la conception de programmes de communication. En particulier, la communication entre le micro-ordinateur de vision (MATROX) et le micro-ordinateur de guidage du robot (IBM) est effectuée par un lien parallèle bidirectionnel non standard. La communication entre le micro-ordinateur de guidage et le contrôleur de RHINO se fait à travers un lien sériel RS-232 spécial (type Z). Des renseignements ultérieurs sur le système de câblage et sur l'utilisation des liens de communication sont donnés dans l'appendice D

CONCLUSION

Ce projet a permis d'étudier les possibilités de robotiser des processus d'assemblage industriels par la rétroaction visuelle. En particulier, il met en évidence la possibilité de l'utilisation d'une seule caméra fixe pour récolter des informations d'une scène à trois dimensions.

Les principales conclusions qui se dégagent de ce projet sont les suivantes :

a) Contrainte physique de l'utilisation d'une seule caméra

Avec une seule caméra, on ne peut pas détecter directement la troisième dimension d'une scène (hauteur, profondeur). Ainsi on doit fournir au système de vision les points de repère et les dimensions de la scène à observer.

b) Qualité de l'image

L'opérateur reste toujours maître de la prise de vue pour chercher à obtenir de bonnes images en jouant

sur la prise de vue, l'éclairage et la mise à point.

c) Précision de la localisation et du centrage des disques.

La précision dans la mesure des grandeurs des disques dépend de la résolution du RGB-GRAPH qui réflète directement sur les valeurs des facteurs d'échelle. Par exemple: une résolution de RGB-GRAPH de 256x256 donne un facteur d'échelle de 7.8 pixel/cm pour le plan au sommet des pôles de la tour d'Hanoï. La hauteur de la caméra par rapport à ce plan est évaluée à 56.3 cm (Figure 3.4). Une erreur de lecture de 1 pixel correspond à une erreur de mesure réelle de 0.12 cm. Dans la phase de localisation des disques, cette erreur pourrait être négligée dans la comparaison des grandeurs des disques, mais elle est loin d'être négligeable dans la partie de centrage des disques.

d) Utilisation de plusieurs types de micro-ordinateur

L'utilisation de plusieurs types de micro-ordinateur assurant des tâches différentes nécessite la maîtrise de plusieurs types et niveaux de langages de programmation. En particulier, la

programmation pour le système de vision est en langage PASCAL/Z [19] et ASSEMBLEUR 8080 sous le système d'exploitation CP/M 80 [8]. Le système de guidage utilise les langages de programmation en PASCAL Microsoft [11] et ASSEMBLEUR 8088 sous le système d'exploitation PC-DOS de IBM-PC [12].

En conclusion générale, ce projet est une des représentations des robots de la troisième génération dotés de l'intelligence artificielle qui est un domaine de plus en plus adopté présentement par des industries.

Notons, enfin, qu'on peut améliorer ce projet au point de vue du choix des équipements et des langages de programmation. On se trouve déjà à la veille de la cinquième génération des ordinateurs.

REFERENCES

[1]. ANONYMOUS, "ZBC-80 CPU Board", Manuel No. 1020MO-06A-1, Matrox Electronics Systems Ltd.

[2]. ANONYMOUS, "VAF-512 Graphics Support Board", Manual No. 176MO-01-0, Matrox Electronics Systems Ltd.

[3]. ANONYMOUS, "FFD-1 Floppy Disk Controller", Manual No. 1025MO-03-1, Matrox Electronics Systems Ltd.

[4]. ANONYMOUS, "MECS-10 System Guide", Manual No. 10022MO-02, Matrox Electronics Systems Ltd.

[5]. ANONYMOUS, "MECS-10 System Guide", Manual No. 10022MO-04, Matrox Electronics Systems Ltd.

[6]. ANONYMOUS, "DF-28 Dual Floppy Disk Drives", Manual No. 1030MO-01, Matrox Electronics Systems Ltd.

[7]. ANONYMOUS, "DT80/1 Video Terminal Operation's Handbook", DATAMEDIA COORPORATION.

[8]. ANONYMOUS, "CP/M Operating System Manual", DIGITAL RESEARCH.

[9]. ANONYMOUS, "Technical Reference", No. 6025005, IBM.

[10]. ANONYMOUS, "Microsoft Pascal, Reference Manual", Part 1 and Part 2, Document No 8501-320-06, Microsoft Corporation.

[11]. ANONYMOUS, "Microsoft Pascal Compiler for the MS-DOS Operation System, User's Guide", Document No 8501A-320-04.

[12]. ANONYMOUS, "Macro Assembler", The Personal Computer Software Library, No 6172234, IBM.

[13]. ANONYMOUS, "PC-Mate, Lab Master : Installation Manual Users Guide", Tecmar Incorporated.

[14]. ALAN PUGH, "Robot Vision", International Trends in Manufacturing Technology, IFS (Publications) Ltd., UK, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo (1983).

[15]. ALEKSANDER I., "ARTIFICIAL VISION FOR ROBOTS", CHAPMAN & HALL, New York (1983).

[16]. BLANCHET ANDRE J., "Amélioration du système de commande par ordinateur (TI 9900) du bras robotique RHINO XR-1", Projet de fin d'étude (Avril 1983), Dir. R.M. DESANTIS et R. HURTEAU, Ecole Polytechnique de Montréal.

[17]. FAUGERAS O.D., "Fundamentals in computer vision", Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), Cambride Unyversity Press (1983).

[18]. JENSEN K. et WIRTH N., "PASCAL Manuel de l'utilisateur", Eyrolles.

[19]. MOSCOW J., "PASCAL/Z, PASCAL/BZ, User's Manual", Version 4.0, Ithaca Intersystems (1981).

[20]. LANCE A. LEVENTHAL, "Z80 assembly language programming", Osborne/McGraw-Hill, 1979.

[21]. LACASSE VINCENT, "Commande d'un robot avec retour d'image", Projet de fin d'étude (Avril 1984), Dir. R. HURTEAU, Ecole Polytechnique de Montréal.

[22]. PIERRE LOPEZ et JEAN-NUMA FOULC, "Introduction à la ROBOTIQUE", Tome 1, Editests (1984).

[23]. RATSIMBAZAFY C., DESANTIS R.M., HURTEAU R., "Implantation des algorithmes optimaux de résolution du problème de la tour d'Hanoï", Ecole Polytechnique de Montréal (1984).

[24]. RICHARD P. PAUL, "Robot Manipulator: Mathematics, Programming and Control", The MIT Press (1982).

[25]. SANDHU, "The manual for the RHINO XR-1", SANDHU MACHINE DESIGN Inc.

[26]. TERROUX ANDRE, "Simulateur graphique de système robotique en 3D", Mémoire de maîtrise (1986) dirigée par R.M. DESANTIS, Ecole Polytechnique de Montréal.

[27]. TERZIEN HAIG, "Commande d'un robot utilisant l'intelligence artificielle", Projet de fin d'étude (Avril 1984), Dir. R.M. DESANTIS , Ecole Polytechnique de Montréal.

[28]. VALERIEN F. et CHIASSON D., "Design d'une unité de contrôle pour la commande du manipulateur robotique RHINO XR-1", Projet de fin d'étude (Avril 1983), Dir. R.M. DESANTIS et R. HURTEAU, Ecole Polytechnique de Montréal.

[29]. NGUYEN, A. T., "Etude de sensibilité du comportement dynamique d'un manipulateur robotique", mémoire de maîtrise (1986), dirigé par R.M. DESANTIS, Ecole Polytechnique de Montréal.

[30]. PIEDBOEUF, J. P., "Commande de poutre flexible par rétroaction visuelle", mémoire de maîtrise (1985), dirigé par Richard HURTEAU, Ecole Polytechnique de Montréal.

[31]. DESANTIS, R.M., "Eléments Fondamentaux de la Robotique", Edition Ecole Polytechnique de Montréal, 1986.

APPENDICES

APPENDICE A

LOGICIEL DE SUPPORT DE BASE

Le logiciel de support de base se compose de treize sous programmes écrits en assembleur de 8080. Ces sous programmes sont regroupés dans un seul fichier LOGAP.SRC illustré au tableau 2.1. Chacun de ces sous programmes peut être appelé par des programmes écrits en langages évolués tels que Basic, Fortran et Pascal.

Cet appendice a pour but d'illustrer en premier lieu les fonctions de ces treize sous programmes du logiciel de support de base. En second lieu nous présentons une méthode pour rendre ces sous programmes compatibles avec le langage PASCAL.

A-1 ILLUSTRATION DES FONCTIONS DU LOGICIEL DE BASE [21]

Parmi les treizes sous-programmes considérés, les cinq premiers sont des primitives; les autres sous programmes représentent des extensions de ces derniers.

1. INIT: activer la carte RGB-GRAPH et la mettre en marche.

2. FREEZE: geler l'image discrétisée.

3. DIRECT: dégeler l'image discrétisée.

4. POINT(X,Y,L): dessiner un point de luminosité L aux coordonnées X,Y dans le plan de l'image.

5. IPOINT(X,Y,L): lire la luminosité L du point de coordonnées X,Y de l'image.

6. IHLIN(X,Y,N,T): lire une ligne de luminosité de N points, à partir de X,Y et mettre dans un tableau T.

7. IVLIN(X,Y,N,T): lire une colonne de luminosité de N points, à partir de X,Y et mettre dans un tableau T.

8. IHALIN(Y,T): lire à la ligne Y, une ligne de luminosité de 256 points et mettre dans un tableau T.

9. IVALIN(X,T): lire à la colonne X, une ligne de luminosité de 256 points et mettre dans un tableau T.

10. OHLIN(X,Y,N,T): tracer une ligne horizontale à partir de X,Y avec N éléments de T.

11. OVLIN(X,Y,N,T): tracer une ligne verticale à partir de X,Y avec N éléments de T.

12. OHALIN(Y,T): tracer à la ligne Y, une ligne horizontale avec les 256 éléments de T.

13. OVALIN(X,T): tracer à la colonne X, une ligne verticale avec les 256 éléments de T.

A-2 UTILISATION DU LOGICIEL DE SUPPORT DE BASE PAR PASCAL

Un programme principal ecrit en PASCAL/Z, qui utilise un ou plusieurs sous programmes de logiciel de base (LOGAP.SRC), doit les déclarer en "procedure external" dans la partie du début de sa déclaration [19].

La figure A-1 illustre la façon de déclarer, par le programme POLYVIS.PAS, les sous programmes : INIT, FREEZE, DIRECT, POINT(X,Y,L) et IPOINT(X,Y,L) en "procedure external".

La figure A-2 résume étape par étape les modalités de compilation des fichiers POLYVIS.PAS (en pascal/z) et LOGAP.SRC (en assembleur 8080); ces fichiers compilés sont ensuite interconnectés pour avoir un fichier exécutable POLYVIS.COM.

Les fichiers POLYVIS.PAS et LOGAP.SRC se trouvent dans l'unité de disque B, les compilateurs pascal/z et assembleur se trouvent dans l'unité A.

```
PROGRAM POLYVIS(O) ;
CONST
        { Déclaration de constantes }
TYPE
        {  Déclaration de types }
VAR
        {  Déclaration de variables }

(* Déclaration de "PROCEDURE EXTERNAL" *)
PROCEDURE INIT ; EXTERNAL ;
PROCEDURE FREEZE ; EXTERNAL ;
PROCEDURE DIRECT ; EXTERNAL ;
PROCEDURE POINT(X,Y : BYTE ; L :NIBBLE) ; EXTERNAL ;
PROCEDURE POINT(X,Y : BYTE ; VAR L :NIBBLE) ; EXTERNAL ;

(* Programme POLYVIS *)
Begin
         { Corp du programme POLYVIS }
                  .
                  .
End.
```

Figure A-1: Structure de la déclaration des sous programmes en "procedure external".

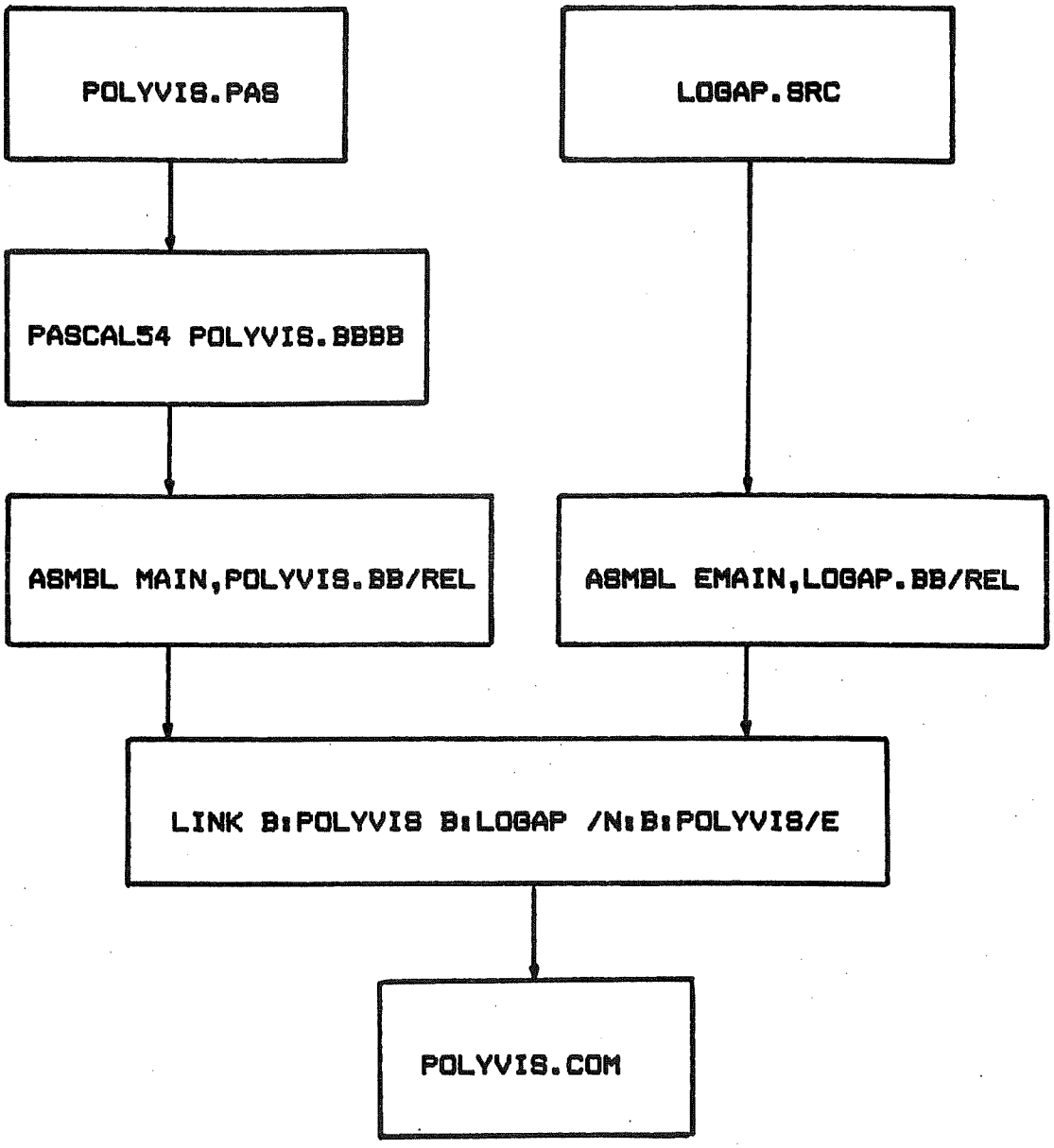

Figure A-2: Structure de la compilation du pascal/z et de l'assembleur 8080.

APPENDICE B

LOGICIEL D'APPLICATION RELATIF AU TRAITEMENT D'IMAGE

Dans cet appendice nous décrivons la structure et le code des modules du logiciel d'application relatif au traitement d'image.

Ce logiciel se compose de quatre modules : calibration, localisation de disques, décision et centrage des disques. Il est subdivisé en deux groupes. Le premier, représenté par le fichier CALIBVIS.PAS/COM, couvre la calibration du système de vision. Le second groupe, représenté par le fichier POLYVIS.PAS/COM, couvre l'exécution du jeu de la tour d'Hanoï par rétroaction visuelle.

B-1. MODULE DE CALIBRATION DU SYSTEME DE VISION

Tel qu'illustrée à la figure B-1, l'opération de calibration du système de vision se compose de deux étapes: l'ajustement de l'éclairage de la scène et le repérage des points de calibrage.

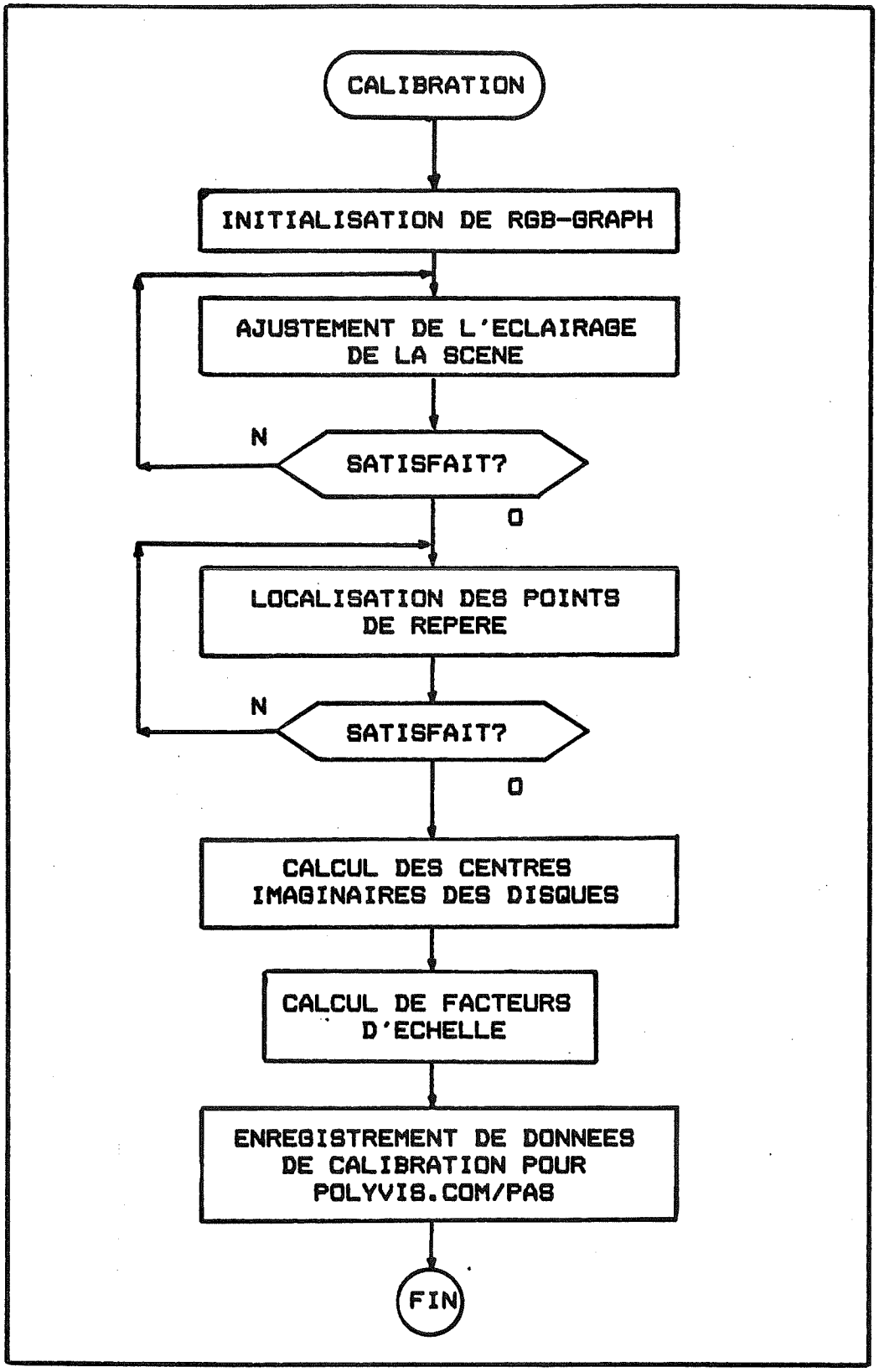

Figure B-1: Organigramme de CALIBVIS.PAS/COM

Les valeurs de coordonnées des cinq points de calibrage (figure 3.3) servent à évaluer les coordonnées images des centres de disques et à calculer les facteurs d'échelle pour les différents niveaux de plans.

B-1.1 Evaluation des coordonnées images des centres des disques

Un des problèmes fondamentaux en vision robotique est de reconnaître un objet dans une scène à trois dimensions. Plusieurs méthodes ont été proposées pour déterminer et mesurer la troisième dimension d'un objet (hauteur, profondeur). Une des méthodes les plus complètes est basée sur l'utilisation de plusieurs caméras ("Simple Assembly under Visual Control" [14]). Une autre approche propose les solutions basées sur l'utilisation d'une caméra et des rayons lasers ("The Use of Taper Light Beam for Object Recognition" [14], "Conversion Algorithm Between 3-D Shape Representation" [17]).

Le problème avec la plupart de ces méthodes est que le système devient trop coûteux au point de vue équipements et temps de compilation.

La méthode proposée dans ce projet utilise «La Projection Optique» pour évaluer les paramètres de la troisième dimension en se servant d'une seule caméra fixée au dessus de la scène (Figure B-2).

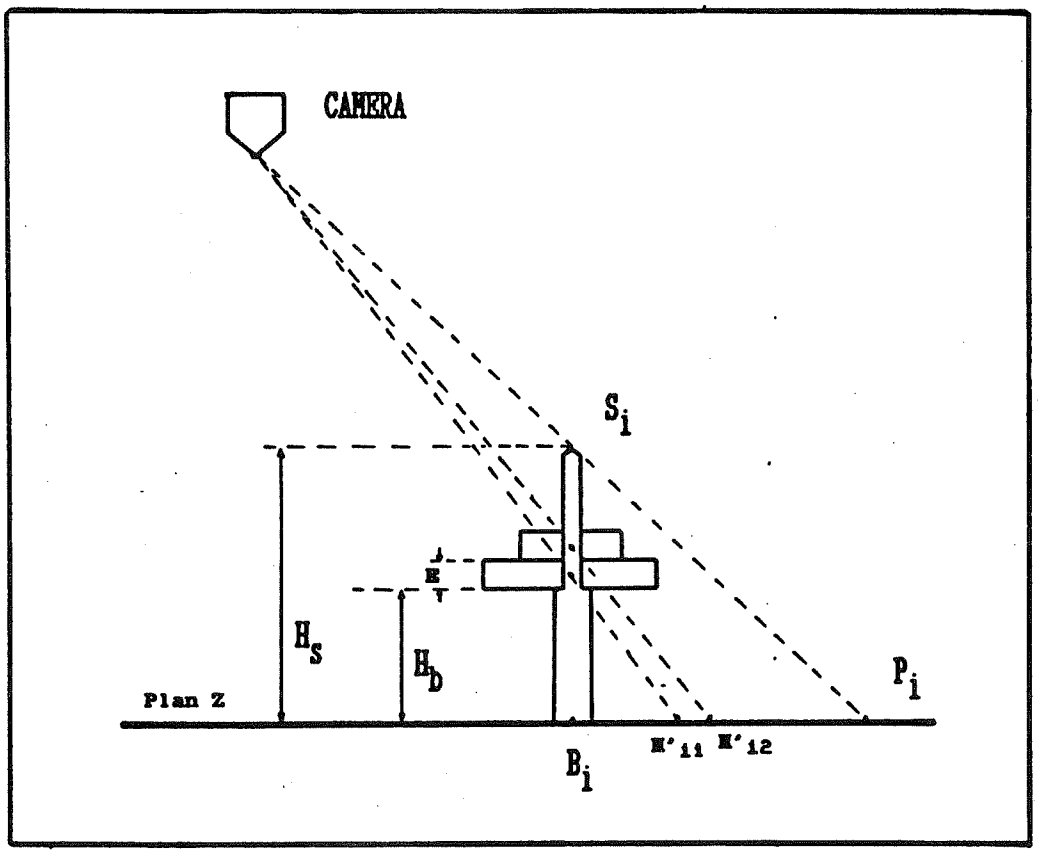

Figure B-2: Arrangement de la caméra par rapport à la scène.

B-1.1.1 Méthode de "Projection Optique"

Tel que montrée à la figure B-2, une caméra est fixée au dessus de la scène. La caméra voit le sommet S_i du pôle i confondu avec le point P_i, son prolongement sur le plan Z. Le point B_i, base du pôle, est sur le même plan Z que le point P_i. Dans cette approche on représente la hauteur du pôle B_iS_i par son image B_iP_i. Connaissant la dimension réelle des pôles, les coordonnées images des points P_i et B_i ainsi que l'épaisseur des disques, on peut évaluer les coordonnées images des centres des disques au $z^{ième}$ niveaux du I^{ième} pôle (N'_{iz} ; i=1,2,3 et z=0,1,2,3,4, ...).

B-1.1.2 Analyse mathématique de la méthode proposée

A partir des coordonnées images des points C et D (Figure B-3), le problème consiste à déterminer d'abord les coordonnées images des pôles B_i, puis avec l'orientation de B_iP_i on évalue les coordonnées des centres images N'_{iz}.

Tel qu'illustrées aux figures B-2 et B-3, on peut écrire les équations suivantes :

A partir des triangles semblables CD'D et DD"B_i on a

$$\frac{CD'}{DD''} = \frac{CD}{DB_i} = \frac{DD}{D''B_i} \qquad \text{(B-1)}$$

$$B_{ix} = D_x - D''B_i \qquad \text{(B-2)}$$

$$B_{iy} = D_y - DD'' \qquad \text{(B-3)}$$

Avec (1), les équations (2) et (3) s'écrivent :

$$B_{ix} = D_x - \frac{D'D * DB_i}{CD} \qquad \text{(B-4)}$$

$$B_{iy} = D_y + \frac{CD' * DB_i}{CD} \qquad \text{(B-5)}$$

A partir des coordonnées images de B_i et P_i on a

$$\Theta_i = \arctan \frac{P_{iy} - B_{iy}}{P_{ix} - B_{ix}} \qquad \text{(B-6)}$$

$$B_iP_i = \sqrt{(P_{ix} - B_{ix})^2 + (P_{iy} - B_{iy})^2} \qquad \text{(B-7)}$$

Finalement les coordonnées images des N'_{iz} sont :

$$N'_{izx} = B_{ix} + B_iP_i * \frac{H_b + E * z}{H_s} \cos \Theta_i \qquad \text{(B-8)}$$

$$N'_{izy} = B_{iy} + B_iP_i * \frac{H_b + E * z}{H_s} \sin \Theta_i \qquad \text{(B-9)}$$

(N'_{izx}, N'_{izy}) : Coordonnées images des centres des disques (Pixel).

(B_{ix}, B_{iy}) : Coordonnées images de la base du pôle i (Pixel)

B_iP_i : Distance en pixel représentant la hauteur du pôle i

H_s : Hauteur réelle du sommet des pôles (en cm.)

H_b : Hauteur réelle de la base des pôles (en cm.)

E : Epaisseur réelle des disques (en cm.)

z : Indice de niveau (z = 0, 1, 2, 3, 4, ... z = 0 c'est le niveau le plus bas des disques.)

Θ_i : Angles d'orientation des pôles ($[-\pi/2, \pi/2]$ sinon, $\Theta_i = \Theta_i + \pi$)

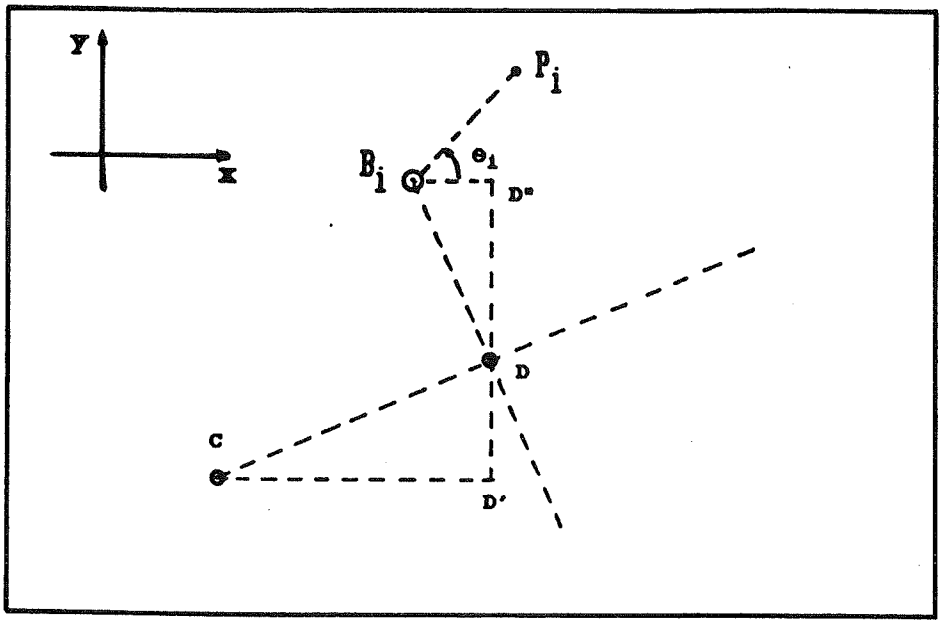

Figure B-3: Orientation du pôle i

B-1.2 Evaluation des facteurs d'échelle

La courbe caractéristique $F_{ech} = F(h)$ illustrée à la figure B-4 est le résultat expérimental d'évaluation de facteurs d'échelle d'une scène en faisant varier la hauteur de la caméra. D'après l'allure de la courbe on considère que les facteurs d'échelle sont inversement proportionnels à la hauteur de la caméra.

$$F(h)_{ech} = \frac{K_{cam}}{h} \qquad \text{(B-10)}$$

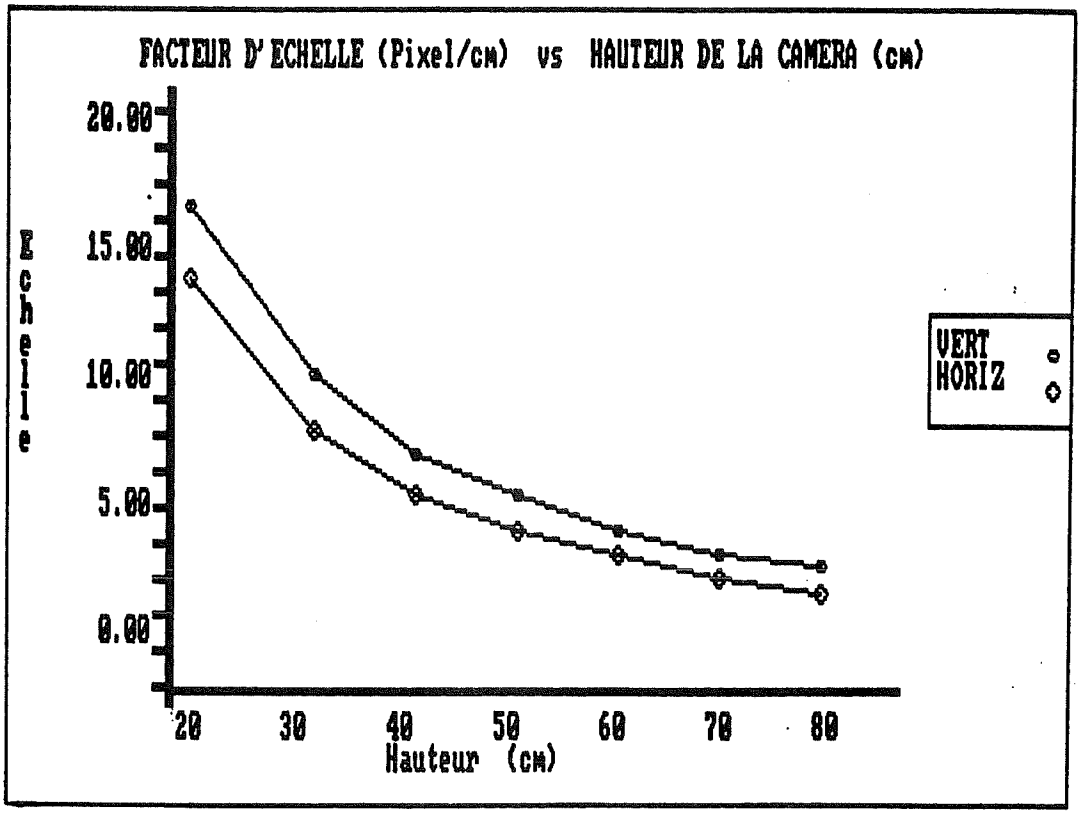

Figure B-4: Courbes caractéristiques de facteurs d'échelle

Dans l'essai considéré, la constante K_{cam} est évaluée à 321. Cette constante dépend des caractéristiques de chaque type de caméra.

Connaissant les dimensions réelles de la scène de la tour d'Hanoï, on peut évaluer les facteurs d'échelle pour chaque niveau des disques.

Tel que illustrée à la figure B-5, l'évaluation se fait de la façon suivante :

- Facteur d'échelle au niveau du sommet des pôles :

$$F_s = \frac{\sqrt{(P_{1x} - P_{2x})^2 + (P_{1y} - P_{2y})^2}}{S_1S_2} \qquad \text{(B-11)}$$

avec S_1S_2, la distance réelle entre le pôle 1 et pôle 2 en cm.

- Hauteur de la caméra par rapport au plancher de la scène :

$$H_{cam} = \frac{K_{cam}}{F_s} + H_s \qquad \text{(B-12)}$$

- Et finalement,

$$F(z)_{ech} = \frac{K_{cam}}{Niv(z-1) + E} \qquad \text{(B-13)}$$

avec

$z = 1, 2, 3, 4, \ldots$

$Niv(0) = H_{cam} - H_b$

Les facteurs d'échelle dans le sens horizontal et le sens vertical de l'image ne sont pas identiques (Figure 3.1), ceci est dû à la répartition non uniforme des pixels sur l'écran vidéo. Dans le cas de ce présent projet, leur rapport est dans l'ordre de 6/5.

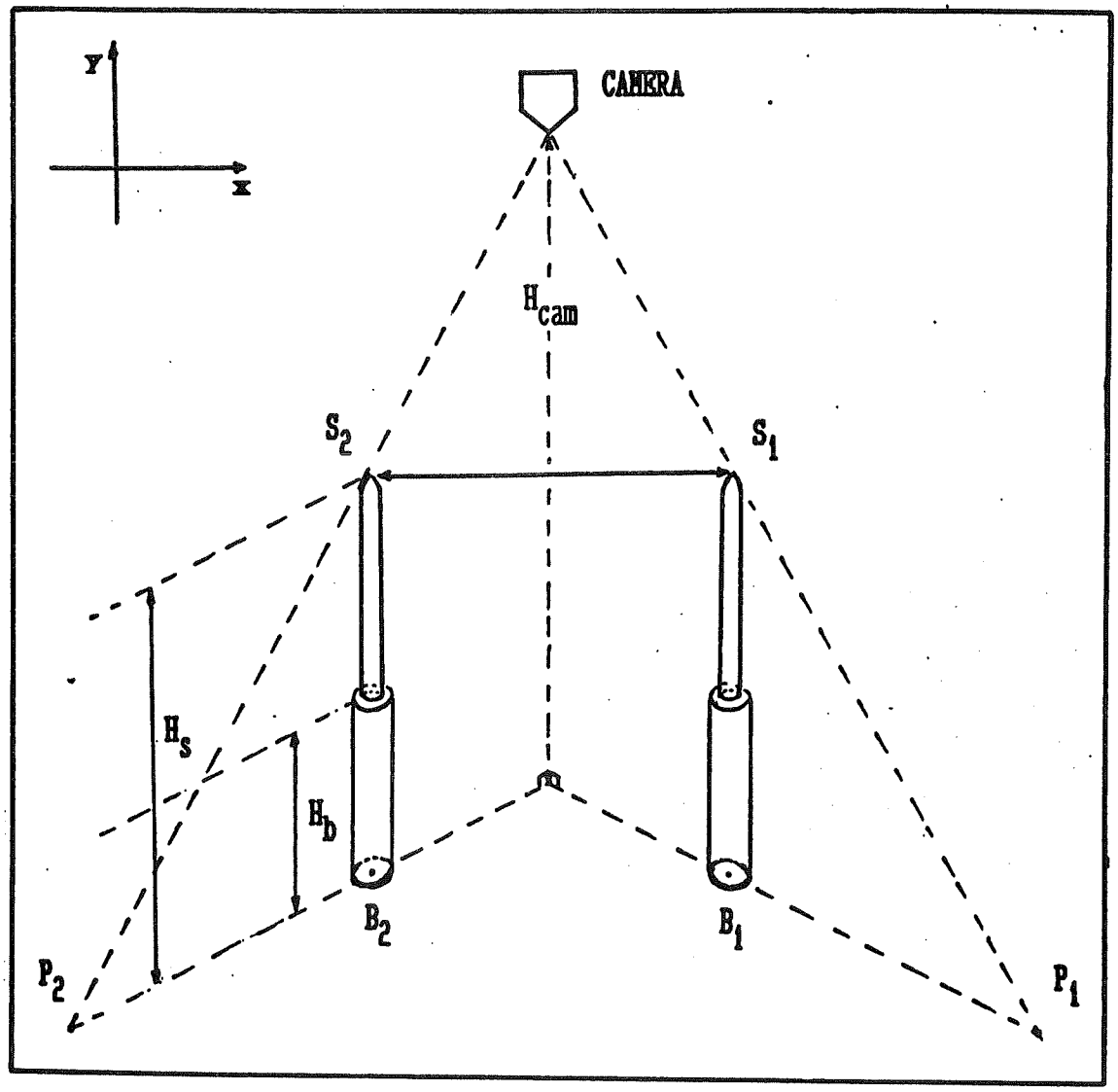

Figure B-5: Méthode d'évaluation de facteurs d'échelle

B-2 MODULE DE LOCALISATION DES DISQUES

Dans l'optique de la robotisation du jeu de la tour d'Hanoï par rétroaction visuelle, le système de traitement d'image doit pouvoir localiser et identifier les disques empilés d'une façon aléatoire sur les trois pôles.

Le tâche du module de localisation des disques est de fournir au module de décision la configuration de de départ de la scène de la tour d'Hanoï. L'organigramme de la figure B-6 illustre la structure du programme de ce module. Dans la stratégie élaborée, le programme identifie d'abord combien de disques se trouvent empilés sur chaque pôle, et ensuite, dans la seconde étape, la dimension de chaque disque est évaluée.

B-2.1 Procédure de détermination du nombre de disques sur chaque pôle.

Trois lignes de luminosité sont lues d'une façon particulière à partir du sommet S_i (i=1,2,3) de chaque pôle (Figure B-7). Les histogrammes affirmant la présence de deux disques sur le pôle 1 et aucun disque sur le pôle 2 sont montrées respectivement aux figures B-8 et B-9.

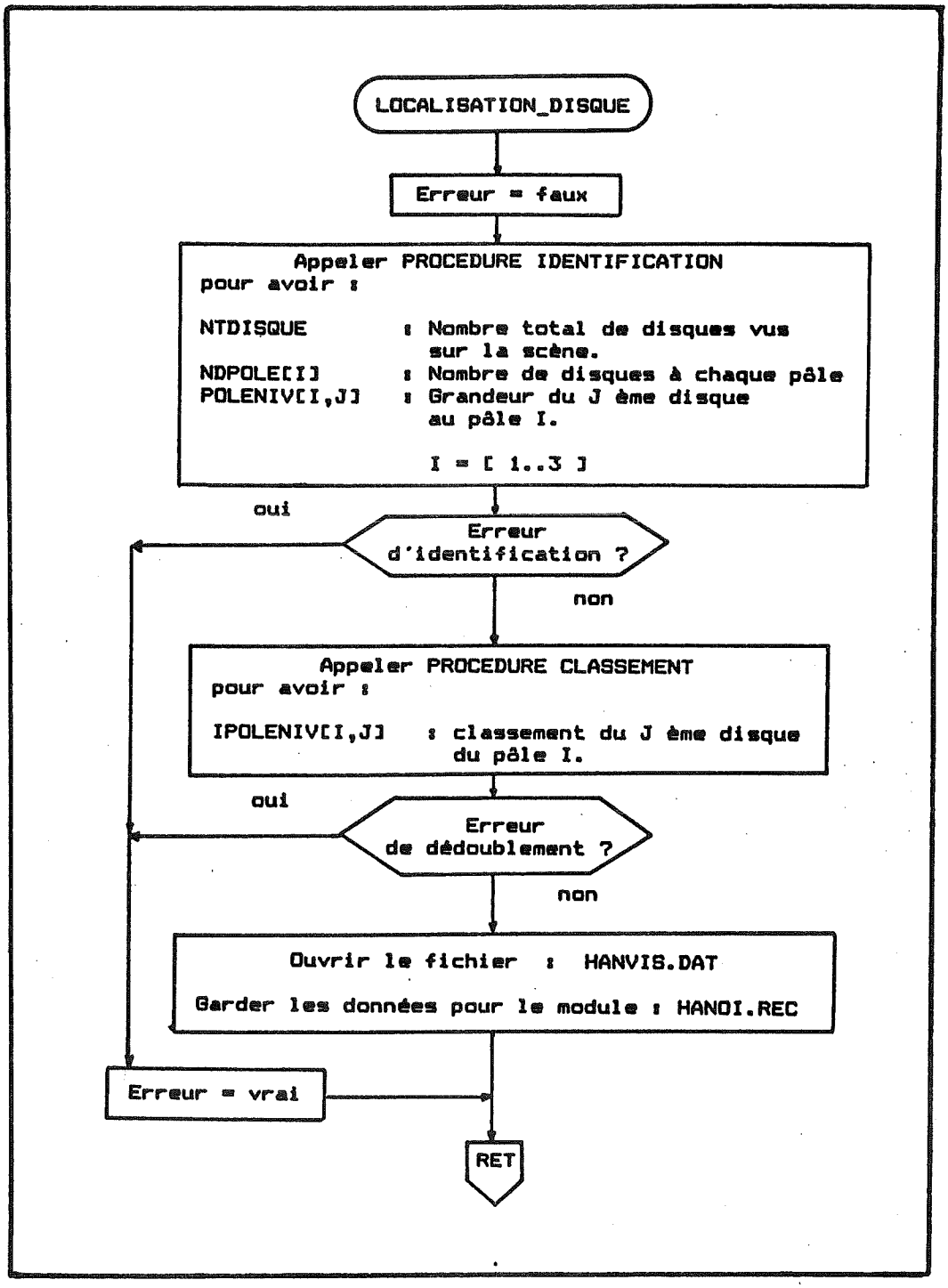

Figure B-6: Organigramme du module de localisation des disques.

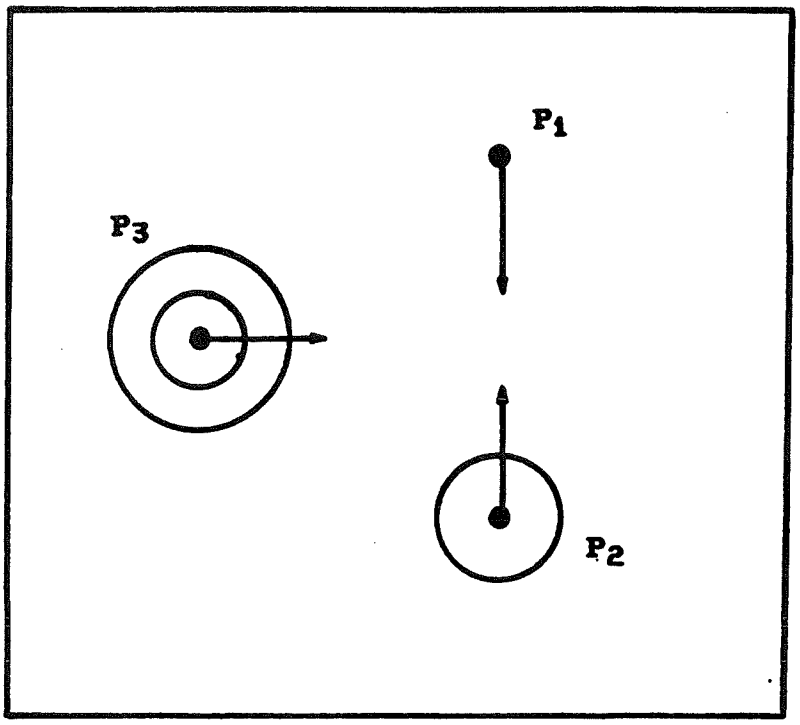

Figure B-7: Méthode de détermination de nombre de disques

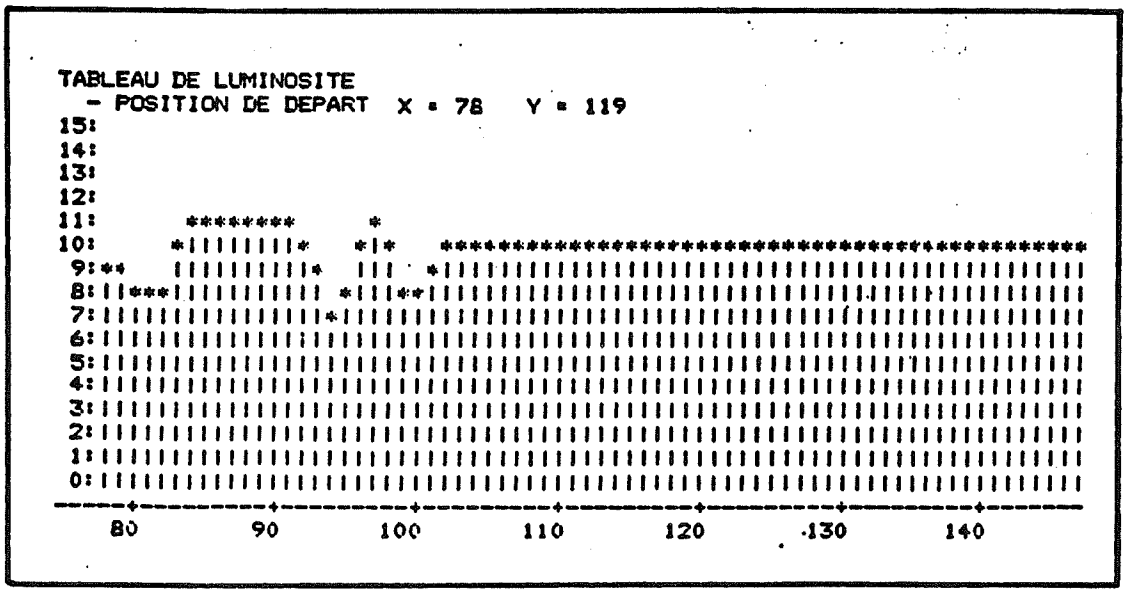

Figure B-8: Histogramme de la présence de deux disques

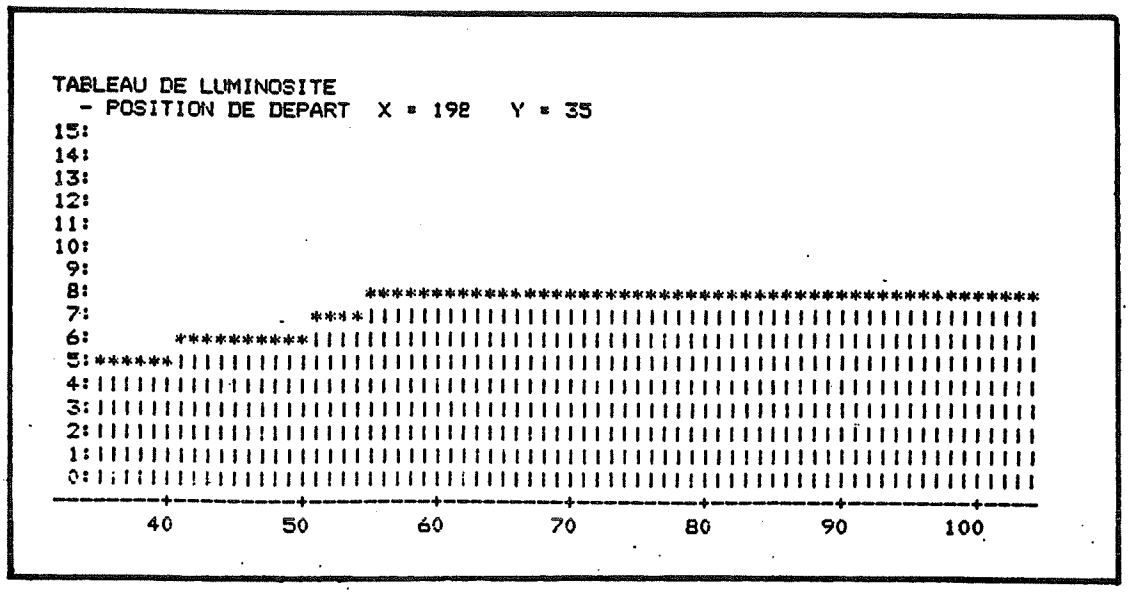

Figure B-9: Histogramme de la présence d'aucun disque

La procédure de détermination du nombre de disques sur chaque pôle est la suivante :

Pour chaque "pôle i", à partir de la ligne de luminosité considérée, on compare les intensités des pixels successifs, PIXEL(k-1) et PIXEL(k), pour déterminer les directions de transition de niveau de gris (direction montant vers le "Blanc" ou direction descendant vers le "Noir"). La limite du contour des disques est marquée par la première transition montante. L'algorithme de la procédure proposée se présente comme suit :

```
FRONT_Précédent = Montant ;
Nb_DISQUE = 0 ;
k = Premier_Pixel considéré ;
Répéter
    Si  PIXEL(k) < PIXEL(k-1)
            Alors  FRONT_Actuel = Descendant ;
    Si  PIXEL(k) > PIXEL(k-1)
            Alors  FRONT_Actuel = Montant ;
    Si  PIXEL(k) = PIXEL(k-1)
            Alors  FRONT_Actuel = FRONT_Précédent ;
    Si (FRONT_Actuel = Montant)
                   et (FRONT_Précédent = Descendant);
            Alors  Nb_DISQUE(i) = Nb_DISQUE(i) + 1 ;
    FRONT_Précedent = FRONT_Actuel ;
    k = k+1 ;
Jusqu'à  k = Dernier_Pixel considéré ;
```

Figure B-10: Algorithme de détermination du nombre de disques sur chaque pôle.

B-2.2 Procédure d'évaluation de la grandeur des disques

Par le même principe que la procédure de détermination du nombre de disques sur chaque pôle, à partir des centres images des disques (N'_{iz}) à chaque niveau Z, on compte le nombre de pixels déterminant le rayon du $Z^{ième}$ disque du I^{ième} pôle (Nb_Pixel(i,z). L'évaluation de la grandeur de chaque disque est calculée par:

$$R_Disque(i,z) = Nb_Pixel(i,z) \ / \ F(z)_{ech} \qquad (B\text{-}14)$$

avec R_Disque(i,z) : Rayon de la $Z^{ièm}$ disque du I^{ième} pôle (cm.); "z" représente aussi le niveau du plan d'image.

$F(z)_{ech}$: Facteur d'échelle du $Z^{ième}$ niveau de plan (Pixel/cm).

Pour évaluer correctement les Nb_Pixel(i,z), il faut tenir compte du nombre de disques se trouvant sur le pôle ainsi que leur centre image respectif (N'_{iz}).

L'algorithme de la procédure d'évaluation de la grandeur des disques se présente comme suit:

```
Si Nb_DISQUE(i) est non nul ;
Alors
  k = Nb_Disque(i) ;
  Répéter
    j = 0 ;
    Répéter
      {A partir du centre N'ik, déterminer le
       Nb_Pixel(i,k), avec la contrainte
       suivante:}
        - A chaque rencontre du contour: j=j+1 ;
    Jusqu'à  j = (Nb_DISQUE(i) - k) + 1
    Calculer   R_Disque(i,k) ;
    k = k-1 ;
  Jusqu'à  k = 0 ;
```

Figure B-11: Algorithme d'évaluation de grandeur des disques.

B-3 MODULE DE DECISION

Etant donnée que la distribution des N disques aux trois pôles est aléatoire, et que le choix d'un pôle de destination dépend de la décision de l'opérateur, la

fonction du module de décision est de déterminer la séquence optimale des déplacements des disques qui est nécessaire pour former une tour complète de N disques au pôle de destination désirée (PDES).

Le problème classique de la tour d'Hanoï consiste à déplacer une tour complète d'un pôle à un autre, sous les contraintes habituelles [23]. Le problème généralisé considéré dans ce projet diffère essentiellement de sa version classique par le fait que la configuration de départ des pôles est aléatoire.

Le principe de la solution proposée repose sur une structure récurrente et comprend deux phases (Figure B-12).

Soient :

S_n^d : $\{ D_n, D_{n-1}, \ldots, D_1 \}$ un ensemble de disques ordonnés suivant l'ordre décroissant de diamètre.

S_n^c : $\{ D_1, D_2, \ldots, D_n \}$ un ensemble de disques ordonnées suivant l'ordre croissant de diamètre.

PD_k : Pôle de destination transitoire du disque D_k.

PO_k : Pôle actuel du disque D_k.

$ACTA_k$: Indicateur d'action (VRAI / FAUX).

<u>Phase 1</u> : <u>Recherche des déplacements de chaque disque</u>.

Etape 1 : PD_k = Pôle de destination finale.

Etape 2 : Déterminer la position des disques de

$$S_k^d = \{ D_k, D_{k-1}, \ldots , D_1 \} \text{ avec } k = n$$

Etape 3 : Si le disque D_k se trouve sur le pôle PD_k, alors aucun déplacement n'est prévu pour ce disque à cette étape. ($ACTA_k$ = FAUX).

Sinon, PD_{k-1} = Autre que PD_k et PO_k. Noter que D_k sera déplacé à PD_k. ($ACTA_k$ = VRAI).

Etape 4 : Aller à l'Etape 2 pour opérer sur :

$$S_{k-1}^d = \{ D_{k-1}, D_{k-2}, \ldots , D_1 \}$$

<u>Phase 2</u> : <u>Effectuer les déplacements des disques</u>.

Etape 1 : Dépendant de l'état d'indicateur d'action $ACTA_k$ déterminé à la phase 1 :

Si $ACTA_k$ = VRAI ,

- alors effectuer le déplacement du disque D_k de

$$S_k^c = \{ D_k, D_{k+1}, \ldots , D_n \}$$

du pôle PO_k au pôle PD_k.

- Déplacer le SOUS TOUR composé de disques

$$S_{k-1}^d = \{ D_{k-1}, \ldots, D_1 \}$$

se trouvant au pôle autre que PD_k et PO_k au pôle PD_k suivant l'algorithme classique de la tour d'Hanoï.

Etape 2 : Retourner à l'ETAPE 1 pour opérer sur :

$$S_{k+1}^c = \{ D_{k+1}, D_{k+2}, \ldots , D_n \}$$

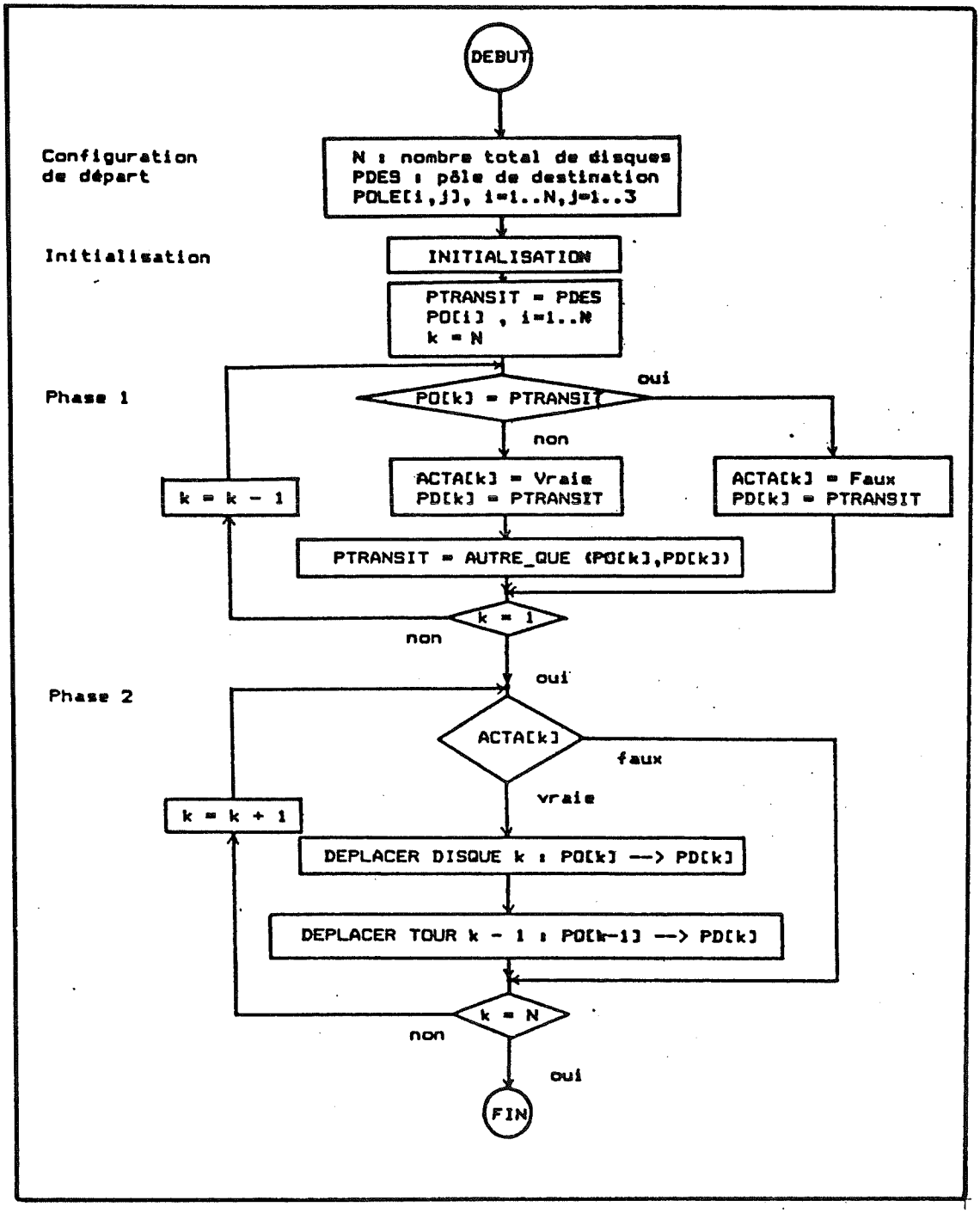

Figure B-12: Algorithme du module de décision

Le tableau B-1 montre les entrées et les sorties du module décisionnel.

TYPE	DESCRIPTION	FORMAT
Entrées	- Disque numéro j au niveau i	POLE[i, j]
	- Nombre total de disques	N
	- Pôle de destination	PDES
Sorties	- $i^{ième}$ étape	ETAPE[i]
	- Disque à déplacer	DISQUE[k]
	- Position actuelle	PO[k]
	- Position de transit	PD[k]
	- Indicateur d'action	ACTA[i]

Tableau B-1: Format des Entrées/Sorties du module de décision

Exemple d'illustration du principe

a) Problème considéré

Soit la configuration de départ de la figure B-13. On veut avoir la tour finale au pôle 3 (ie PDES=3).

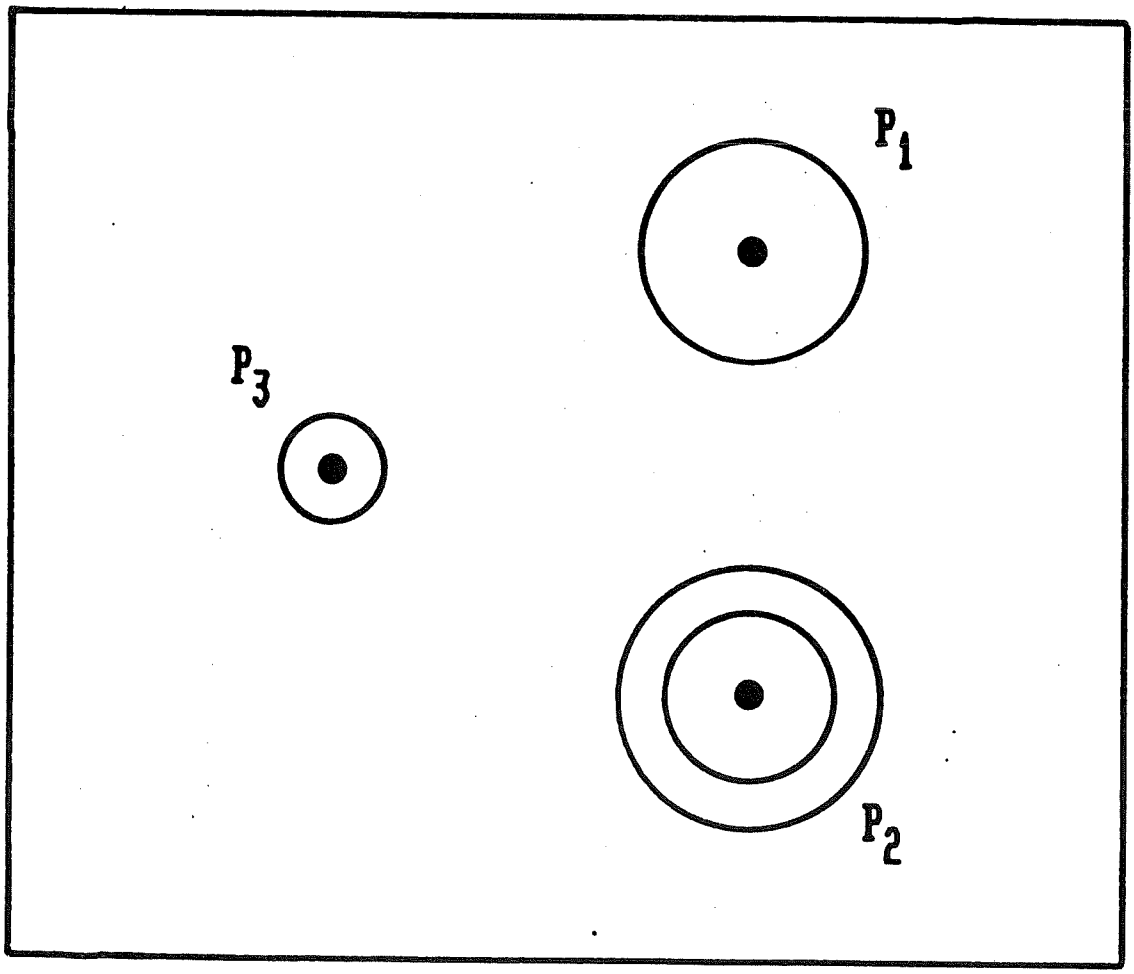

Figure B-13: Configuration de départ

b) Solution

Phase 1 :

k	PD[k]	PO[k]	ACTA[k]	PDES actualisé Pôle de transit
4	3	2	Vrai	1
3	1	1	Faux	1
2	1	2	Vrai	3
1	3	3	Faux	3

Phase 2 :

k	Actions	Séquences finales
1	- Aucune	
2	- Disque D2: de P2 à P1 - Sous-tour ST1: de P3 à P1	D2: P2 ---> P1 D1: P3 ---> P1
3	- Aucune	
4	- Disque D4: de P2 à P3 Sous-tour ST3: de P1 à P3	D4: P2 ---> P3 D1: P1 ---> P3 D2: P1 ---> P2 D1: P3 ---> P2 D3: P1 ---> P3 D1: P2 ---> P1 D2: P2 ---> P3 D1: P1 ---> P3

B-4 MODULE DE CENTRAGE DES DISQUES

A cause de la flexibilité et de l'imprécision du robot Rhino XR-1, pour placer les disques sur les pôles, avec le moins d'erreur possible, le système de guidage fait appel au module de centrage des disques.

La principale fonction de ce module est de calculer les écarts d'erreur "∂x et ∂y" entre le centre "O" du disque transporté par la pince et le sommet "S" du pôle de destination (Figure B-14).

$$\partial x = S_x - O_x \qquad \text{(B-15)}$$

$$\partial y = S_y - O_y \qquad \text{(B-16)}$$

Ces écarts sont ensuite transmis par un lien paralèlle au système de guidage pour effectuer la correction nécessaire.

Etant donnée que les coordonnées images de $S(S_x, S_y)$ sont connues lors de la calibration du système, le problème se pose seulement sur la détermination des coordonnées images de $O(O_x, O_y)$.

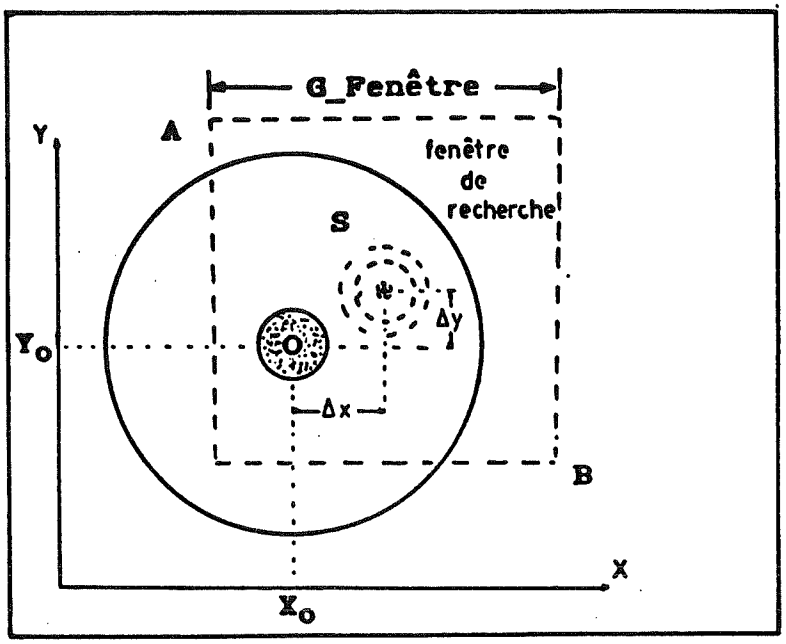

Figure B-14: Centrage des disques

La méthode proposée dans ce projet utilise «Les Lignes de Luminosité Minimum dans la fenêtre de recherche» pour déterminer le centre du disque.

B-4.1 Méthode de "Lignes de Luminosité Minimum"

Tel que montrée à la figure B-14 la fenêtre de recherche est centrée au point S. Le système de vision fait la recherche de la ligne de luminosité minimum, horizontalement et verticalement, à l'intérieur de cette

fenêtre. Le croisement de ces lignes de luminosité minimum détermine les coordonnées du centre de disques.

B-4.2 Algorithme de détermination du centre de disques

L'algorithme de détermination du centre de disques se présente comme suit :

```
PROCEDURE CENTRE_DISQUE ;

{ Définition de la fenêtre de recherche }
    A   = S   - G Fenêtre/2 ; A   = S   - G Fenêtre/2 ;
    B^X = S^X + G-Fenêtre/2 ; B^Y = S^Y + G-Fenêtre/2 ;
     X    X    -               Y    Y    -
{ Recherche de lignes de luminosité minimum }
Répéter de K = Début de la fenêtre

    Som_X = 0 ;  Som_Y = 0 ;
    Répéter de J = Début de la ligne (ou colonne)
            Lire :  Pixel_X(J) ---> Lumin ;
                    Som_X = Som_X + Lumin ;
            Lire :  Pixel_Y(J) ---> Lumin ;
                    Som_Y = Som_Y + Lumin ;
            J = J + 1 ;
    Jusqu'à  J = Fin de la ligne (ou colonne) ;

    { Détermination du centre O(O ,O ) }
    Si  Som X < Som Xmin  Alors  Som^Y X    = Som X
          -       -              Oy = S^min + K ; -
    Si  Som Y < Som Ymin  Alors  Som Y Y    = Som Y
          -       -              Ox = S^min + K ; -
                                      x
    K = K + 1 ;
Jusqu'à  K = Fin de la fenêtre

{ Ecart d'erreur }
    Delta X = S   - O  ;
    Delta-X = S^X - O^X ;
        -     y    y
```

Figure B-15: Algorithme du centrage de disques

B-4. 3 Opération de centrage de disques

Les opérations de déplacement des disques, illustrées par la figure B-16, ne sont pas totalement supervisées par le système de vision.

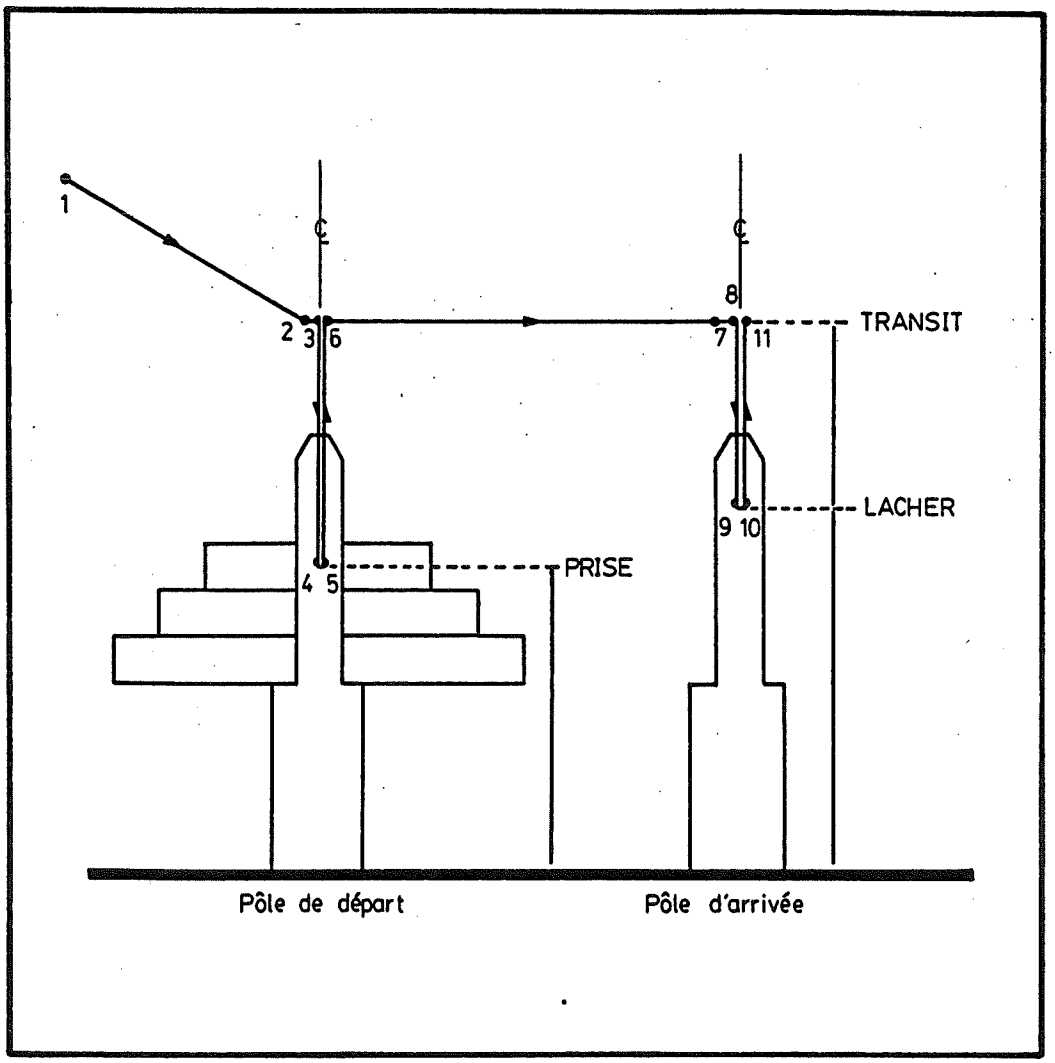

Figure B-16: Trajectoires des disques

Les trajectoires 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-6, 6-7, 8-9, 9-10 et 10-11 sont exécutés en boucle ouverte. Les séquences provenant du module de décision (HANSEQM.DAT) sont enregistrées dans le fichier HANSEQI.DAT. Ces séquences sont ensuite traduites et envoyées étape par étape au contrôleur de RHINO pour exécuter les mouvements.

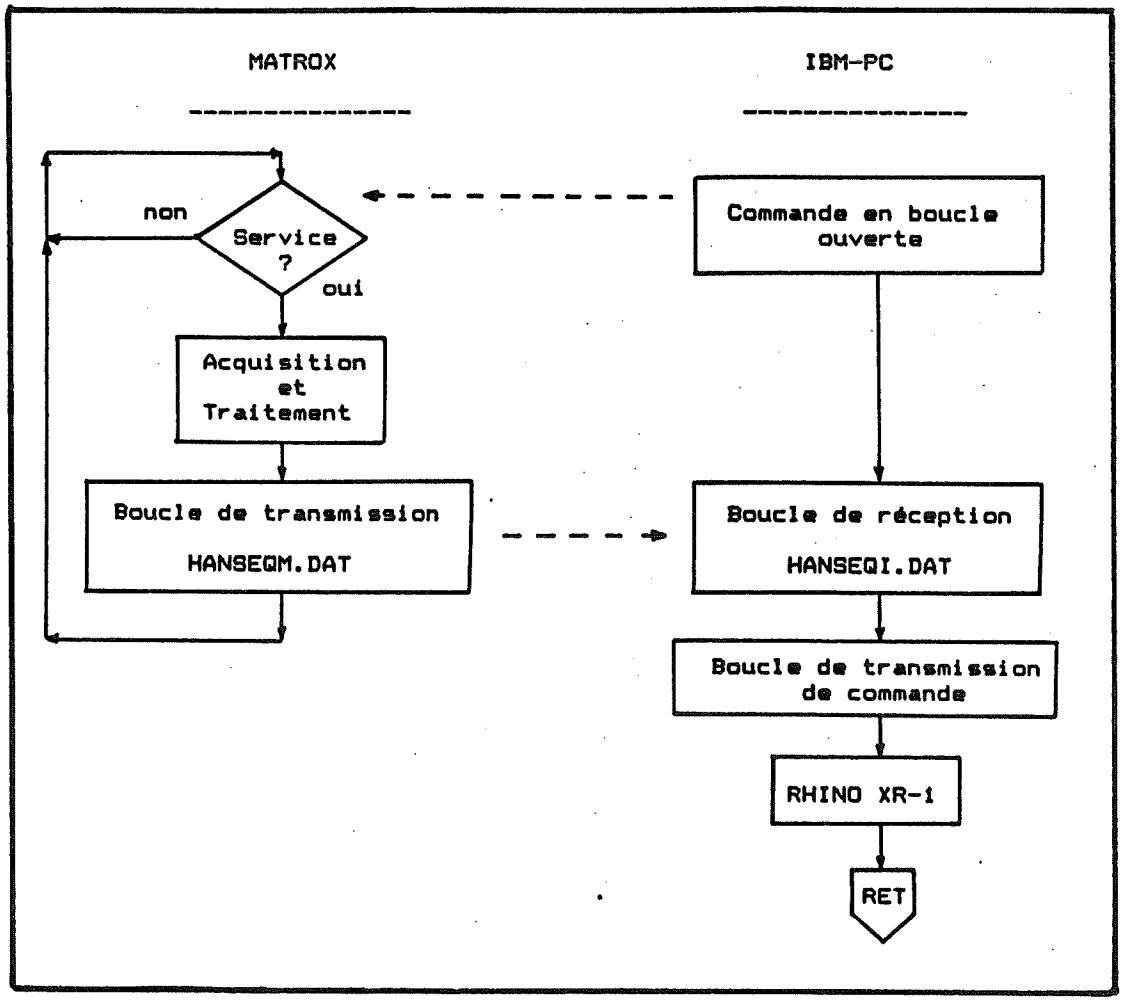

Figure B-17: Commande en boucle ouverte

L'opération de centrage des disques est représentée par la trajectoire 7-8. Cette trajectoire est exécutée en boucle fermée. Cette séquence fait aussi partie des données de HANSEQI.DAT. Avant de passer à l'exécution de l'étape 8-9, elle se répète jusqu'à ce que les écarts d'erreur, ∂x et ∂y, soient à l'intérieur des limites de tolérances fixées.

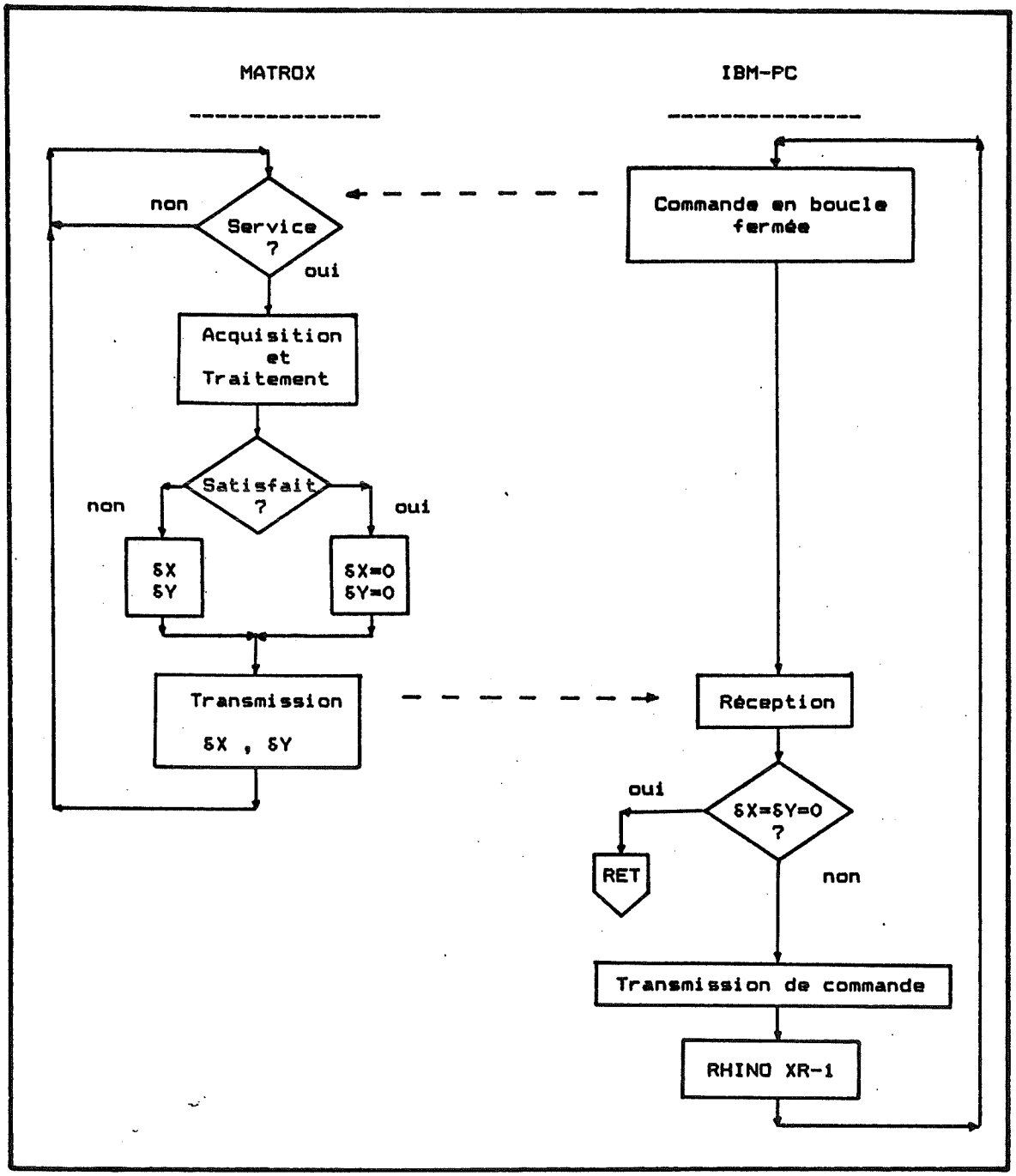

Figure B-18: Commande en boucle fermée

APPENDICE C

LOGICIEL D'APPLICATION RELATIF AU GUIDAGE DE ROBOT

Le logiciel d'application relatif au guidage de robot est basé sur la commande " POINT-POINT ". Le problème est de déterminer la séquence de commandes primaires à appliquer au robot, afin de déplacer la pince d'un point Po à un point Pc.

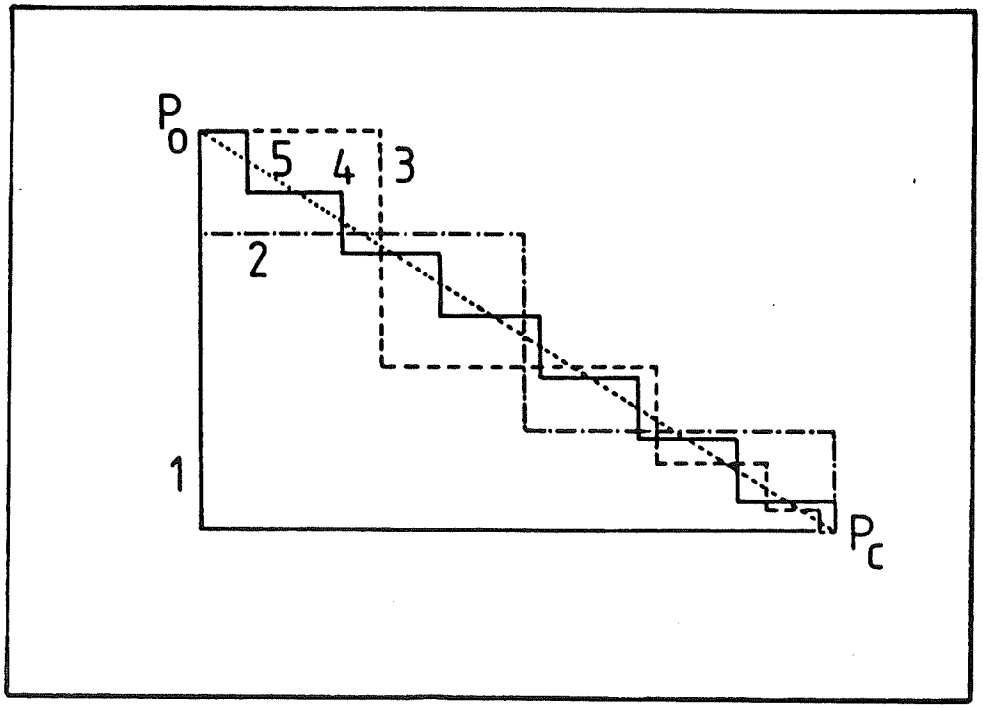

Figure C-1: Trajectoires de transfert

C-1 MODELE CINETIQUE DU ROBOT RHINO XR-1

Le modèle cinétique utilisé se base sur un modèle géométrique et se décrit par le modèle mathématique suivant :

$$X = [L*(\sin \bar{\theta}2 + \sin (\bar{\theta}2+\theta3)) + L1*\cos \theta4] * \cos \theta1$$

$$Y = [L*(\sin \bar{\theta}2 + \sin (\bar{\theta}2+\theta3)) + L1*\cos \theta4] * \sin \theta1$$

$$Z = [L*(\cos \bar{\theta}2 + \cos (\bar{\theta}2+\theta3)) + L1*\sin \theta4] \qquad \text{(C-1)}$$

avec : $\bar{\theta}2 = 90\cdot - \theta2$

Une autre approche utilise les transformations homogènes [24] :

$$T = T[1,0]\ T[2,1]\ T[3,2]\ T[4,3]\ T[5,4] \qquad \text{(C-2)}$$

tel que :

$$T[1,0] = Rot(z,\theta1)\ Rot(x,90\cdot)$$

$$T[2,1] = Rot(z,\theta2)\ Trans(L,0,0)$$

$$T[3,2] = Rot(z,\theta3)\ Trans(L,0,0)$$

$$T[4,3] = Rot(z,\theta4+90\cdot)\ Rot(x,90\cdot)$$

$$T[5,4] = Rot(z,\theta5)$$

Le modèle cinétique inverse s'écrit alors :

$$\theta 1 = \arctan(Y/X) \qquad \text{(C-3)}$$

$$\theta 3 = 2 \arctan\left(\frac{2}{\Gamma} \sqrt{L^2 - 0.25\ \Gamma^2}\right) \qquad \text{(C-4)}$$

avec: $\Gamma^2 = (Z - Li*\sin \theta 4)^2 + (\sqrt{X^2 + Y^2} - Li*\cos \theta 4)^2$

$$\bar{\theta} 2 = \frac{\pi - \theta 3}{2} - \arctan \frac{Z - Li*\sin \theta 4}{\sqrt{X^2 + Y^2} - Li*\cos \theta 4} \qquad \text{(C-5)}$$

avec: $\theta 2 = \pi/2 - \bar{\theta} 2$

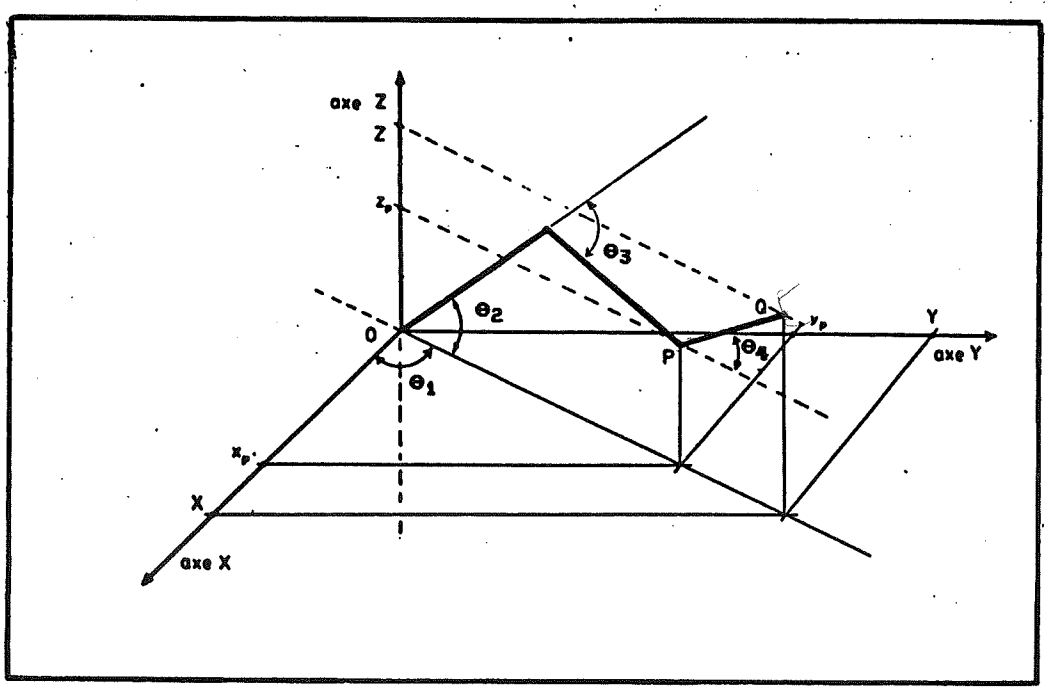

Figure C-2: Modèle géométrique de Rhino XR-1

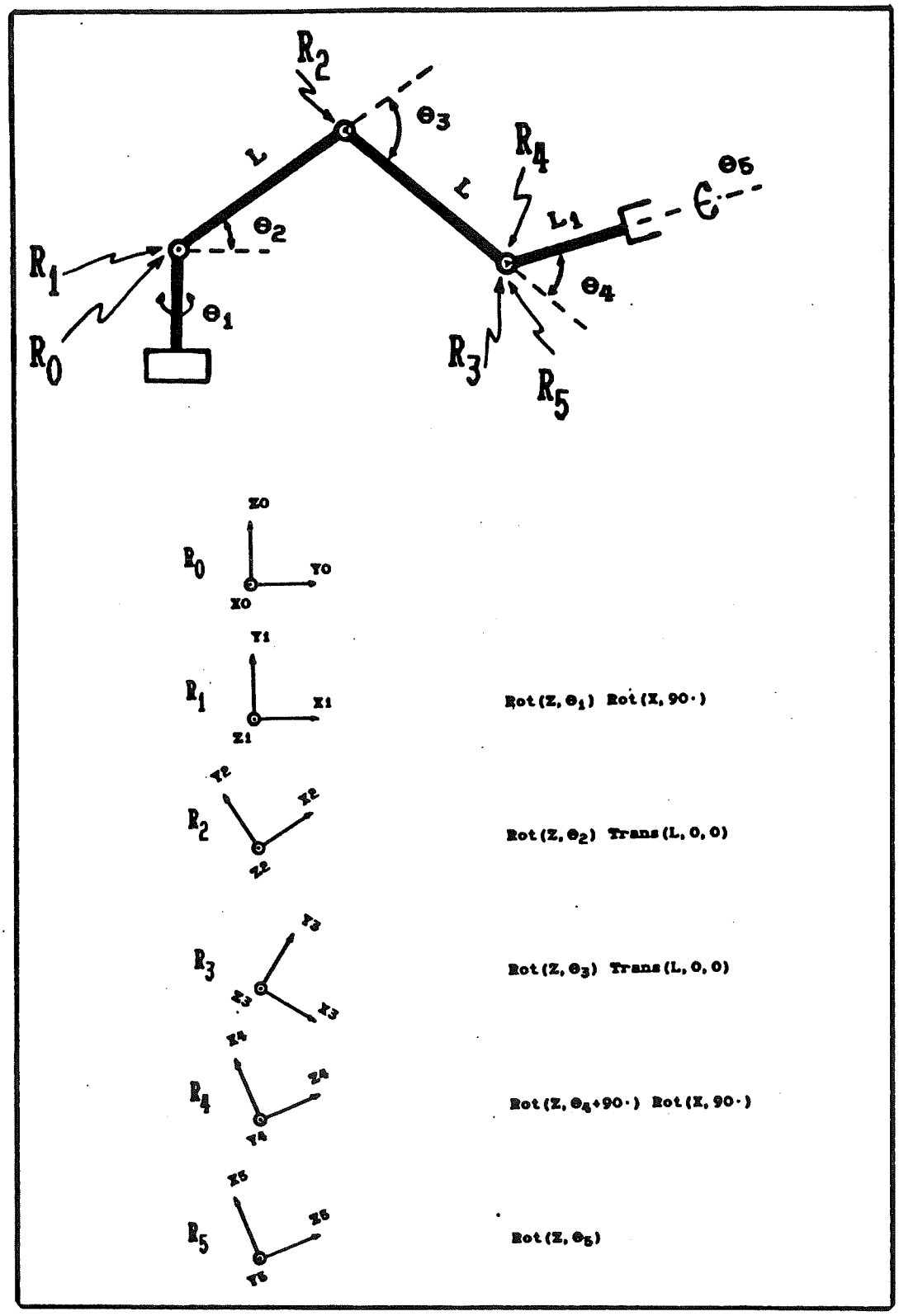

Figure C-3: Assignation de référentiel aux articulations

C-2 ALGORITHME DU MODULE DE GUIDAGE

Basé sur la commade point-point, cet algorithme (Figure C-4) transforme les coordonnées externes d'un point Pi (Xi, Yi, Zi) en coordonnées internes (Θ1i, Θ2i, Θ3i, Θ4i) selon les rotations C-3, C-4 et C-5. (Θ4i doit être fixé lors de l'initialisation du robot).

C-2.1 Principe de déplacement POINT-POINT

Etant donnée que les coordonnées de la position actuelle Pa (Xa, Ya, Za) et la position de destination Pd (Xd, Yd, Zd) sont connues, on peut calculer leurs coordonnées internes ainsi que les $\partial\Theta$i (i=1, 2, 3, 4).

$$\partial\Theta i = \Theta ia - \Theta id \qquad \text{(C-6)}$$

Ces $\partial\Theta$i correspondent aux variations d'angles qu'il faut transmettre au robot pour déplacer la pince au point de destination.

Pour garder la trajectoire la plus directe possible, ces variations sont subdivisées en des incrémentations unitaires et transmises alternativement.

$$[\ U\ ] * [\ \text{unitaire}\ ] = [\ K\ ] * [\ \partial\Theta\ ] \qquad \text{(C-7)}$$

avec:

[U] : Matrice de nombre de pas d'itération

[unitaire] : Matrice de nombre de trous pour chaque itération

[$\partial\Theta$] : [$\partial\Theta 1$ $\partial\Theta 2$ $\partial\Theta 3$ $\partial\Theta 4$]

[K] : Matrice de gain de l'engrenage (moteurs: F, E, D et C) qui est de la forme :

$$[\ K\ ] = \begin{bmatrix} 2620.0\ /\ 2\pi \\ 3144.0\ /\ 2\pi \\ 3144.0\ /\ 2\pi \\ 4541.3\ /\ 2\pi \end{bmatrix}$$

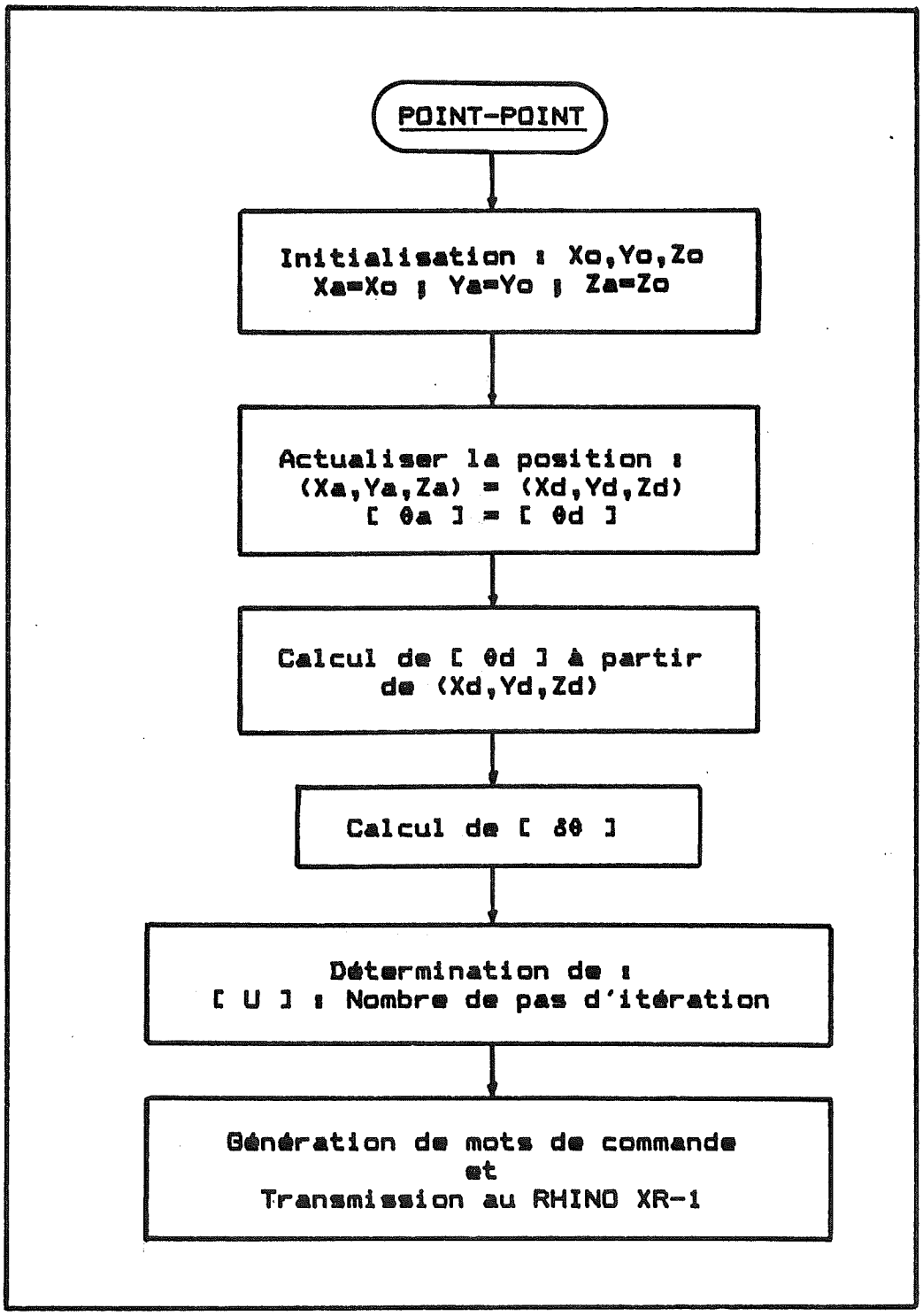

Figure C-4: Organigramme du déplacement POINT-POINT

C-2.2 Principe de déplacement de pôle à pôle

Les trajectoires de transfert de disques d'un pôle à un autre sont illustrés à la figure C-5. Les étapes du déplacement se résument de la façon suivante:

Etape 1 : (Trajet 1-2) ; Aller au pôle de DEPART
Etape 2 : (Trajet 2-3) ; Se placer au-dessus du pôle
Etape 3 : (Trajet 3-4) ; Descendre au niveau de PRISE
Etape 4 : (Trajet 4-5) ; Fermer la pince
Etape 5 : (Trajet 5-6) ; Monter au-dessus du pôle
Etape 6 : (Trajet 6-7) ; Aller au pôle d'ARRIVEE
Etape 7 : (Trajet 7-8) ; Aligner le centre du disque sur le pôle.
Etape 8 : (Trajet 8-9) ; Descendre au point de LACHER
Etape 9 : (Trajet 9-10) ; Ouvrir la pince
Etape 10 : (Trajet 10-11) ; Remonter au dessus du pôle et attendre les commandes suivantes.

Neuf étapes sur dix sont commandées en boucle ouverte. Seul l'étape 7 est commandé en boucle fermée. Durant cet étape, le système de vision et le système de guidage s'échangent des informations pour effectuer l'opération de centrage de disques. Cette opération se répète jusqu'à ce que l'allignement soit satisfaisant.

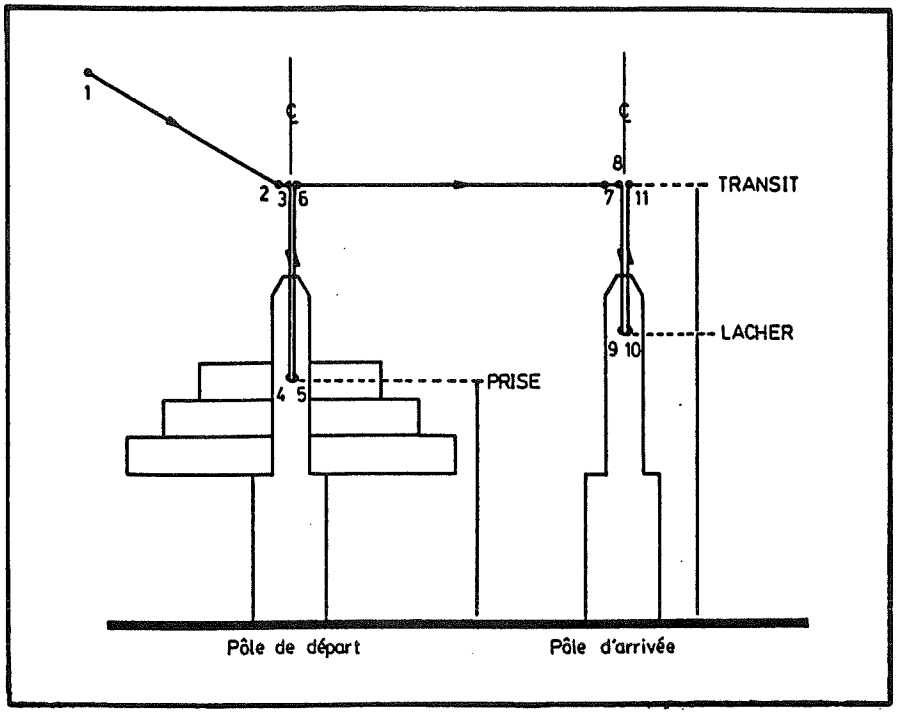

Figure C-5: Déplacement d'un pôle à un autre

C-2.3 Contrôle de fermeture et d'ouverture de la pince

L'initialisation de la pince se fait de la façon suivante :

1. Envoyer la commande de fermeture de la pince par petits coups (par exemple : "A+03"+char(13)) tout en vérifiant, après un certain delai, le retour du nombre de trous non utilisés dans la mémoire tempon du contrôleur de Rhino (en envoyant: "A?"+char(13)).

2. Si le nombre de retour est nul, alors répéter la séquence 1. Sinon garder ce nombre dans la variable RESTE et passer à l'étape 3.

3. Envoyer la commande d'ouverture au maximum de la pince en transmettant "A+yy"+char(13) avec yy = 70-RESTE.

"70 trous" est le nombre nécessaire pour ouvrir ou fermer au maximum la pince. Ainsi la procédure de fermeture de la pince pour saisir les disques et la procédure d'ouverture de la pince ont la forme suivante:

```
PROCEDURE PINCE ;

  Si Commande = "Fermer", alors
       Transmettre : "A+70"+CHAR(13)
       Attendre 1 seconde
       Transmettre : "A?"+CHAR(13)
       Garder le retour de transmission dans RESTE

  Si Commande = "Ouvrir", alors
       yy = 70 - RESTE
       Transmettre : "A-yy"+CHAR(13)
```

Figure C-6: Algorithme de contrôle de la pince

APPENDICE D

LOGICIEL DE COMMUNICATION

L'utilisation de trois types de micro-ordinateur pour partager des tâches dans la robotisation du jeu de la tour d'Hanoï, nécessite trois modules de sous programmes de communication codés en langage assembleur.

D-1 COMMUNICATION ENTRE LE SYSTEME DE GUIDAGE ET LE CONTROLEUR DE RHINO XR-1

Le système de guidage et le contrôleur de Rhino sont reliés par un lien sériel de type RS-232 spécial à trois fils (Tx, Rx et Gnd).

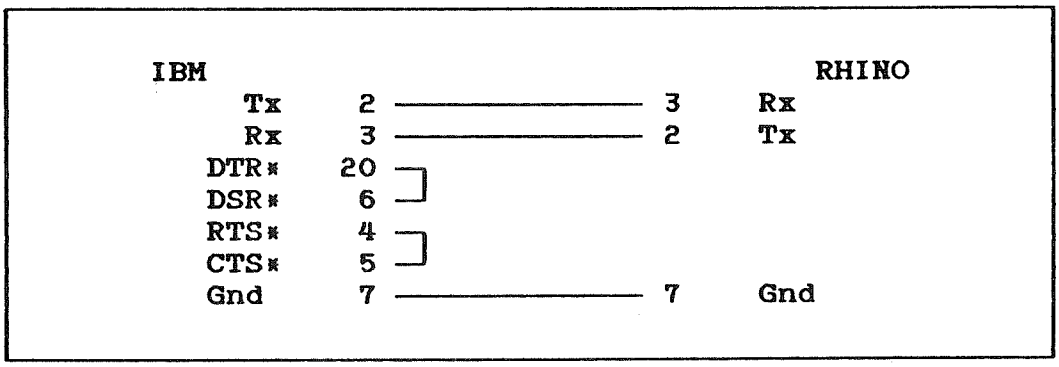

Figure D-1: Lien RS-232 à 3 fils.

En absence de lignes de contrôle (DTR, DSR, RTS et CTS), une modification particulière au niveau de la connection des fils a été effectuée [9] [25].

Les instructions de commande du système de guidage au contrôleur de Rhino se présentent sous les formes suivantes :

a) Commande de positionnement

M S X X <cr>

b) Vérification de mémoire tampon du contrôleur

M Y <cr>

avec

M : le moteur considéré A, B, C, D, E, F

S : le signe + ou -

XX : le nombre de trous demandé (0 ≤ XX ≤ 90)

Y : le code ASCII du caractère "?"

<cr> : le code ASCII de retour de chariot

Ainsi une séquence de commande de positionnement peut être composée d'une chaine de code ASCII de la forme suivante :

A-70 B+05 C+90 D+59 E-44 F+82 B+02 C+63 ....

où les espaces entre les mots MSXX représentent les caractères de retour de chariot.

Cette chaine de caractères, générée par le sous programme POINT-POINT (voir APPENDICE C), est placée dans une pile de mémoires (Stack) du système de guidage (IBM-PC). Le sous programme assembleur TX_CAR s'occupe de la transmettre (caractère par caractère) au contrôleur de Rhino (Figure D-2).

Les commandes de la forme MY<cr> sont transmises alternativement avec les mots de commande MSXX<cr> par le sous programme assembleur TX_RX (Figure D-3). En retour de cette transmission le système de guidage reçoit le nombre de trous restant à exécuter par le moteur M en cours. Cette technique permet de contrôler le risque de chambardement de codes dans les mémoires tampons du contrôleur de Rhino, car un seul moteur à la fois peut être commandé [25].

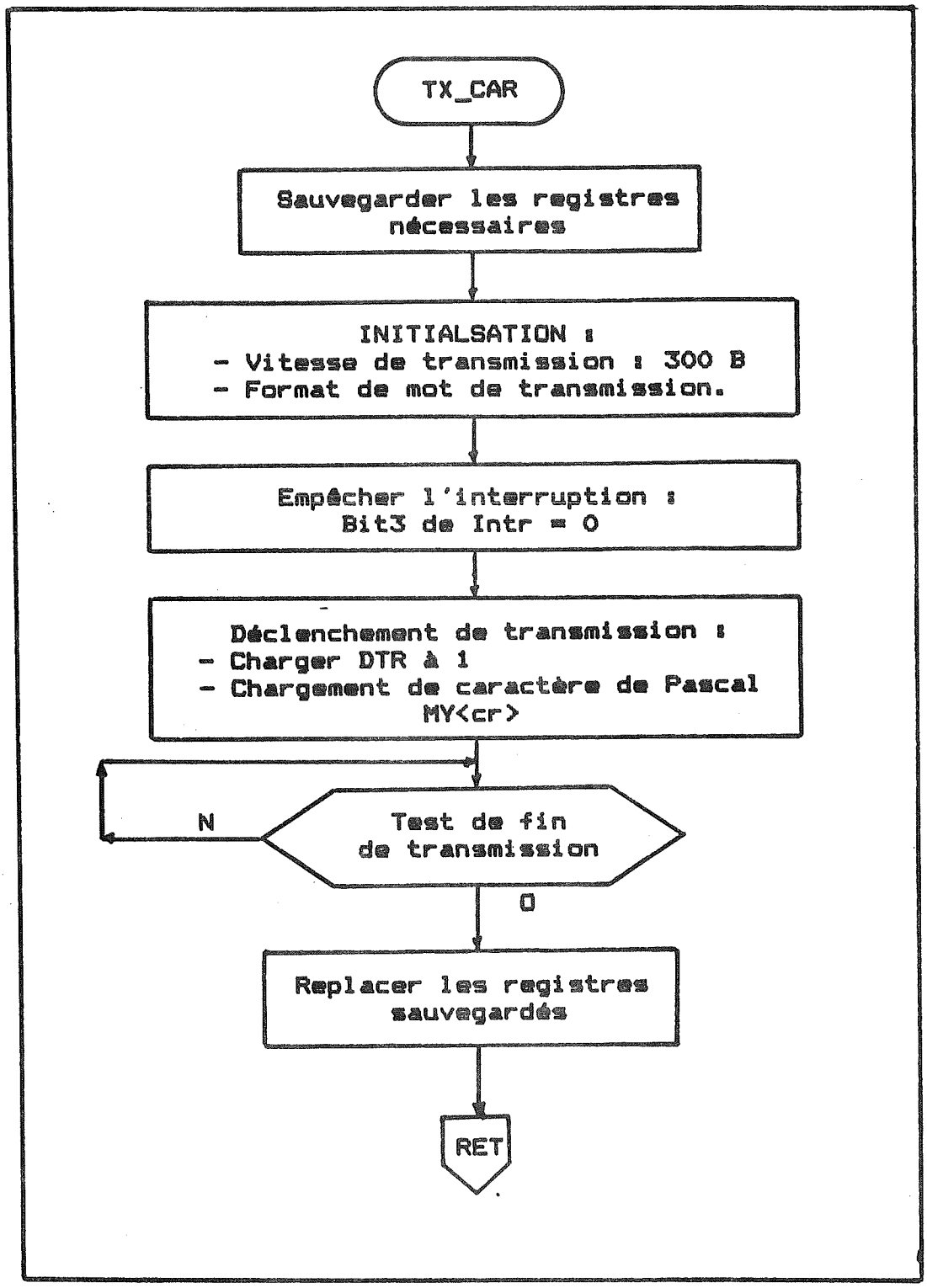

Figure D-2: Transmission de IBM vers contrôleur de Rhino

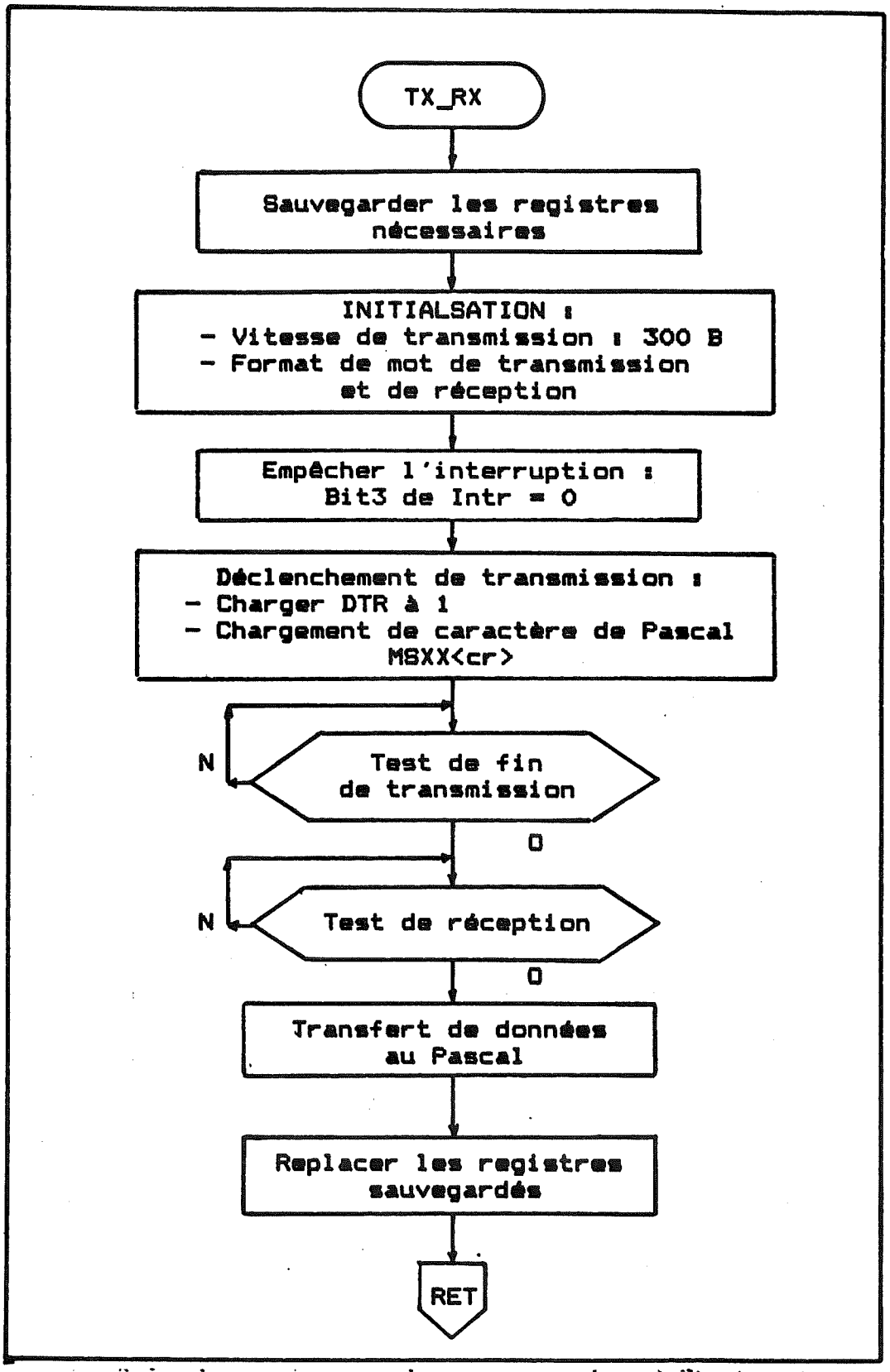

Figure D-3: Transmission/Réception entre IBM et Rhino

D-2 COMMUNICATION ENTRE LE SYTEME DE GUIDAGE ET LE SYSTEME DE VISION

Le système de vision (MATROX) et le système de guidage (IBM-PC) sont reliés par un lien parallèle spécialement câblé car les configurations physiques de leur port de communication sont incompatibles [1] [9].

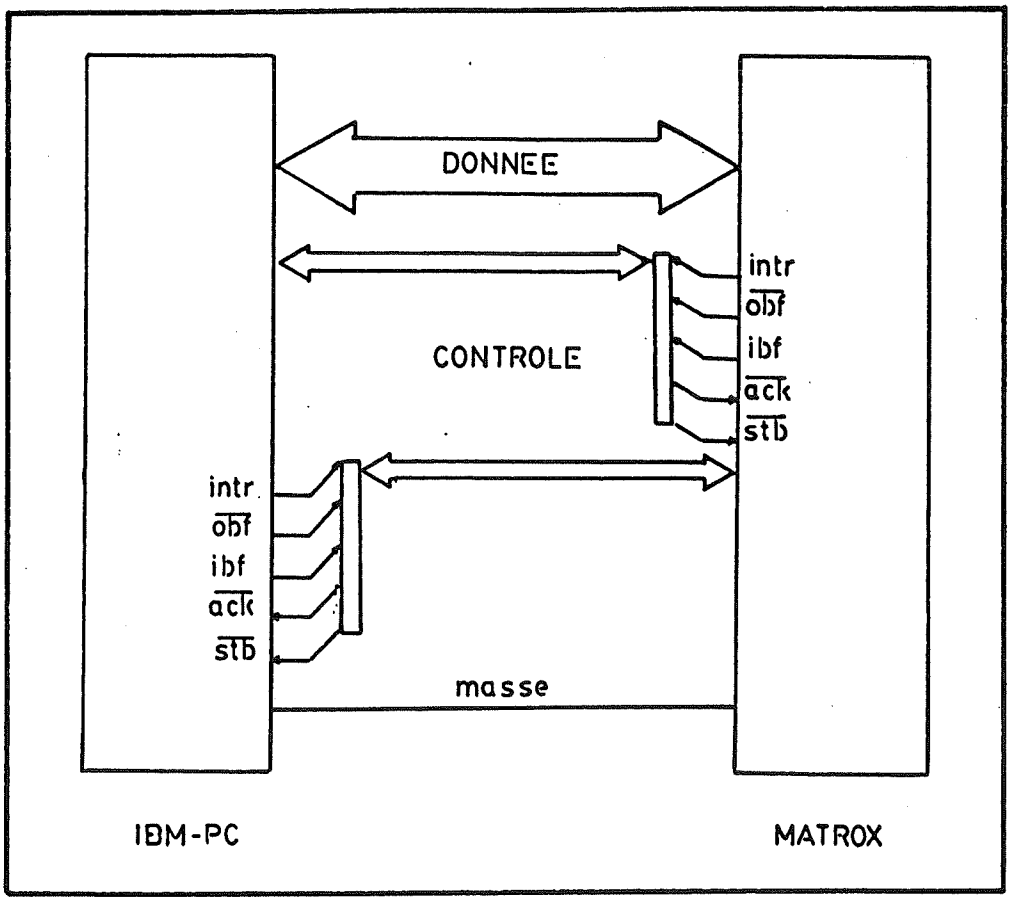

Figure D-4: Lien de communication parallèle entre IBM-PC et MATROX

Les mots de communication entre ces deux systèmes sont codés en format de "Nombre Entier". Les codes spéciaux de communication sont montrés dans le tableau D-1 :

Code	Description
30000	Indicateur de localisation de disques par caméra.
30001	Fin de données provenant de MATROX à IBM
30002	Indicateur de centrage au pôle 1
30003	Indicateur de centrage au pôle 2
30004	Indicateur de centrage au pôle 3
30005	Indicateur de centrage "insatisfaisant"
30006	Indicateur de centrage "satisfaisant"
30007	Fin d'opération de MATROX à IBM-PC
30008	Fin d'opération de IBM-PC à MATROX

Tableau D-1: Codes spéciaux de communication

D-2.1 Transmission et réception de données de la solution du problème de la tour d'Hanoï

Les données de la solution du problème de la tour d'Hanoï sont générées par le module de décision "HANOI3.PAS" et enregistrées séquentiellement dans le fichier de type entier "HANSEQM.DAT". Les deux premières données du fichier sont formées de nombre total de disques N et de pôle de destination PDES. Ensuite, dépendant du nombre de séquences de trajectoires à

compléter, des groupes de cinq données suivantes se succèdent :

- PHASE[I] : Phase I
- POLD[I] : Pôle de départ en phase I
- POLA[I] : Pôle d'arrivée en phase I
- DISQ[I] : Numéro de disque à déplacer pour la la phase I
- ZDISQ[I] : Niveau où se trouve le disque

Et finalement, le nombre 30001 est enregistré pour indiquer la fin de données. Ces séquences de données sont transmises par le sous programme de transmission TRANS (du fichier MATRIBM.SRC) de MATROX vers IBM-PC.

Le système de guidage reçoit ces données par le sous programme RECEPT (du fichier IBMMATR.ASM) et les enregistre dans le fichier HANSEQI.DAT. C'est à partir des données de ce fichier que le système de guidage utilise les commandes "pôle à pôle" pour exécuter les séquences du jeu de la tour d'Hanoï (Figure B-15, B-16 et B-17).

D-2.2 Transmission et réception des données de centrage des disques

Tel que illustré aux figures B-15 et B-17, le déroulement de communication entre le système de vision et le système de guidage pour la phase de centrage des disques (trajectoire 7-8) se résume de la façon suivante:

- A l'arrivée au-dessus de chaque pôle I (I=1,2,3), moyennant le sous programme TRANS du fichier IBMMATR.ASM, le système de guidage transmet le code 30001+I au système de vision.

- A la réception de ce code, par le sous programme RECEPT du fichier MATRIBM.SRC, le système de vision calcule les écarts d'erreur de centrage ∂x et ∂y. Si ces écarts sont nuls, il retourne le code 30006 au système de guidage. Si ces écarts sont non nuls, il retourne le code 30005 et attend un autre code (30001+I ou 30008) du sytème de guidage.

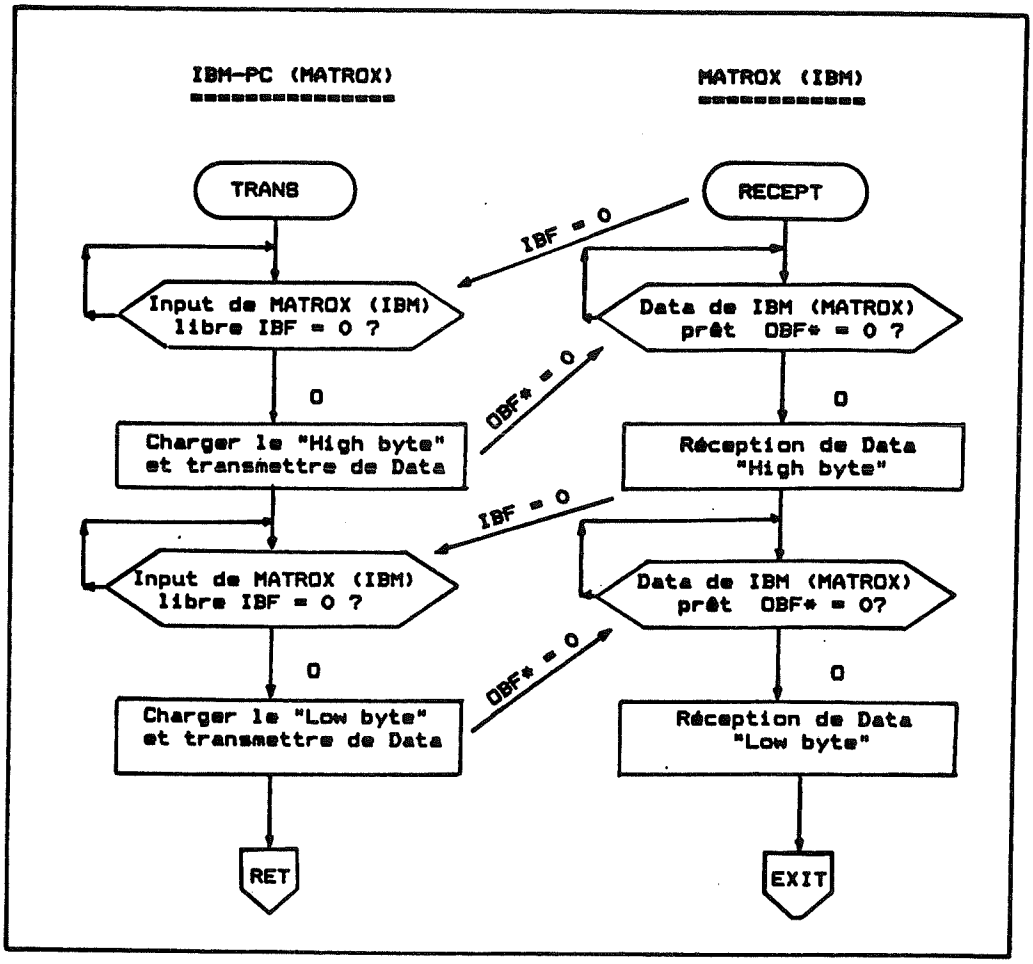

Figure D-5: Organigramme de communication entre le système de guidage et le système de vision

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00289426 7