UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

# AUTOMATISATION D'UN BRISE-ROCHES: BANC D'ESSAI POUR L'ÉTUDE DE LA LOCALISATION DES ROCHES ET LE POSITIONNEMENT DU MARTEAU

par

Paul-André CORBEIL
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLÉCTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

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

Juin 1990

© Paul-André CORBEIL 1990

National Library
of Canada

Canadian Theses Service

Ottawa, Canada
K1A 0N4

Bibliothèque nationale
du Canada

Service des thèses canadiennes

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

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

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

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

ISBN 0-315-58944-2

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

# AUTOMATISATION D'UN BRISE-ROCHES: BANC D'ESSAI POUR L'ÉTUDE DE LA LOCALISATION DES ROCHES ET LE POSITIONNEMENT DU MARTEAU

Présenté par: Paul-André CORBEIL

en vue de l'obtention du grade de: M.Sc.A.

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

M. Paul Cohen ....., Ph.D., président-rapporteur,

M. Richard Hurteau....., D.Ing, directeur de thèse,

M. André Piché....., Ph.D., membre du jury.

# Sommaire

Dans le but de réduire l'intervention humaine dans les conditions environnementales difficiles des mines souterraines, l'industrie minière s'intéresse à l'automatisation de ses opérations. Le brise-roches constitue un exemple de système pour lequel un tel intérêt est apparu ces dernières années.

Le brise-roches est un manipulateur hydraulique de 4 degrés de liberté, muni d'un marteau pneumatique ou hydraulique, qui est utilisé pour déplacer et casser des roches bloquées sur un grillage, nommé grizzly. Présentement cet appareil est dirigé manuellement par un opérateur.

Dans un premier temps, une revue des méthodes potentielles pour la détection et la localisation des roches sur le grizzly est présentée. Deux des méthodes présentées, la vision passive et un capteur tactile ont été utilisées pour ce projet.

Le but principal de ce projet est de reproduire, sur une échelle réduite et dans des conditions de laboratoire, le fonctionnement d'un brise-roches automatique ou partiellement automatique, c'est-à-dire où l'intervention de l'opérateur est limitée. L'aspect du cassage des roches n'est toutefois pas considéré.

Un banc d'essai, constitué d'un grizzly en modèle réduit, d'une caméra et d'un robot muni d'un capteur tactile, a été développé afin de permettre l'étude de la détection des roches (amas) et du positionnement automatique d'un brise-roches.

En utilisant ces différentes composantes, un programme, comprenant deux fonctions principales, a été développé. Une première fonction, l'analyse des images, permet de connaître le nombre de roches et leur contour. La deuxième est l'inspection tactile, par laquelle la hauteur des roches est extraite en certains points caractéristiques, nommés points de recherche en effectuant un positionnement automatique du robot vers la roche.

Les techniques relatives au traitement d'images pour la détection des roches ainsi que les résultats obtenus sont présentés. De plus le modèle complet du banc d'essai est décrit de même que la stratégie développée pour assurer l'inspection tactile des roches. Un exemple de résultats obtenus pour l'extraction de la hauteur des roches est présenté.

# Abstract

Rockbreakers are 4 degrees of freedom hydraulic manipulators, equipped with a pneumatic or hydraulic hammer, and are used to break oversize rocks dumped on a grizzly grid. Presently these manipulator are manually operated and the human operator is exposed to severe environmental conditions.

In this study the potential solutions for the detection of the rocks are first presented. After, we describe the bench test used in this project. The goal of this project is to reproduce the operation of an automatic rockbreaker in laboratory but without the task of breaking rocks. The positionning of the hammer is realized by applying artificial vision techniques to analyse the state of the working area. The final approach and the contact between the hammer and the rocks is executed by using a tactile sensor. Results are presented and the potential of the techniques used to automate all the functions of the rockbreaker is discussed.

# Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce à l'appui financier intervenu dans le cadre d'une convention de recherche d'Énergie, Mines et Ressources Canada (CR-1732).

Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements à mon directeur, M. Richard Hurteau, pour la confiance qu'il m'a témoignée ainsi que pour les efforts qu'il a consacrés à l'élaboration de ce projet.

Il me fait plaisir de remercier M. André Piché, ancien directeur du CCARM, pour ses conseils précieux sur le domaine de l'industrie minière de même que pour l'aide apportée au financement de ce projet.

Je veux également exprimer ma reconnaissance à M. Romano DeSantis, chef de la Section d'Automatique, pour les fonctions de contrôle du Rhino qui ont été développées sous sa supervision et que j'ai ré-utilisées en partie dans ce projet.

Je remercie également Guy Chevrette, Yves Laperrière, Emerico Natonek et Maher Hammami pour leurs encouragements et leur agréable soutien, de même qu'à tous ceux qui m'ont aidé durant cette période.

Je veux également remercier mon frère Jean-François pour les efforts qu'il a fait à la réalisation des dessins.

Enfin, ma gratitude va à mes parents qui m'ont toujours soutenu et qui m'ont permis d'arriver à ce point par leurs encouragements et leur dévouement.

# Table des matières

**Sommaire** iv

**Abstract** vi

**Remerciements** vii

**Liste des figures** xiv

**Liste des tableaux** xvi

**Liste des symboles** xvii

**1 Introduction** 1

1.1 Problématique . . . . . 1

1.1.1 Description du brise-roches . . . . . 1

1.1.2 Tâche de l'opérateur . . . . . 2

1.1.3 Automatisation d'un brise-roches . . . . . 4

1.2 Objectifs et motivations . . . . . 4

1.3 Organisation du mémoire . . . . . 6

**2 Solutions potentielles pour la détection et la localisation des roches** 8

2.1 Vision passive à l'aide d'une caméra . . . . . 8

2.2 Vision stéréo (triangulation passive) . . . . . 9

2.3 Capteurs de distance . . . . . 11

2.3.1 Triangulation active . . . . . 11
2.3.2 Temps de propagation . . . . . 12
2.3.3 Projection au foyer (focusing) . . . . . 13
2.3.4 Caractéristiques générales . . . . . 13
2.4 Éclairage structuré . . . . . 14
2.5 Capteurs de proximité . . . . . 16
2.5.1 Capteurs ultrasoniques (sonars) . . . . . 17
2.5.2 Capteurs optiques . . . . . 17
2.5.3 Caractéristiques générales . . . . . 18
2.6 Capteurs tactiles . . . . . 18
2.7 Conclusion . . . . . 18

**3 Description du banc d'essai** **20**
3.1 Nécessité de l'expérimentation . . . . . 20
3.2 Principe de fonctionnement . . . . . 22
3.3 Composantes matérielles du banc d'essai . . . . . 24
3.3.1 Grizzly . . . . . 24
3.3.2 Robot . . . . . 24
3.3.3 Système de vision . . . . . 27
3.3.4 Capteur tactile . . . . . 28
3.4 Composantes logicielles du banc d'essai . . . . . 28
3.5 Représentation du banc d'essai . . . . . 32
3.5.1 Assignation des référentiels . . . . . 32
3.5.2 Extraction de l'information . . . . . 33
3.6 Conclusion . . . . . 36

**4 Analyse d'images pour la détection des roches** **37**
4.1 Objectifs de l'algorithme . . . . . 37
4.2 Description de l'algorithme . . . . . 38

4.2.1 Initialisation . . . . . 38
4.2.1.1 Extraction des coordonnées du grizzly . . . . . 38
4.2.1.2 Mise en mémoire de l'image du grizzly sans roche . . 41
4.2.2 Traitement de l'image du grizzly avec des roches . . . . . 41
4.2.2.1 Soustraction . . . . . 42
4.2.2.2 Segmentation de l'image résultante . . . . . 42
4.2.2.3 Caractérisation des régions . . . . . 44
4.2.2.4 Regroupement des régions des barres . . . . . 47
4.2.2.5 Reconstitution des roches . . . . . 48
4.2.2.6 Caractérisation des roches . . . . . 53
4.2.2.7 Contour des roches . . . . . 53
4.3 Résultats du traitement d'images . . . . . 54
4.3.1 Détection des parties du grizzly . . . . . 54
4.3.2 Cas des roches isolées . . . . . 54
4.3.3 Cas d'un amas de roches . . . . . 57
4.4 Analyse de l'algorithme . . . . . 57
4.4.1 Caractéristiques de l'algorithme . . . . . 57
4.4.1.1 Influence de contrastes faibles . . . . . 60
4.4.1.2 Influence de l'ombrage . . . . . 63
4.4.1.3 Utilisation de la soustraction . . . . . 64
4.4.1.4 Complexité et robustesse de l'algorithme . . . . . 65
4.4.2 Perspectives éventuelles . . . . . 66
4.5 Conclusion . . . . . 67

**5 Inspection tactile** **69**
5.1 Modélisation du robot et du capteur tactile . . . . . 69
5.1.1 Modélisation cinématique du Rhino XR-1 . . . . . 70
5.1.1.1 Cinématique directe . . . . . 70
5.1.1.2 Cinématique inverse . . . . . 73

5.1.1.3 Relation par rapport au grizzly . . . . . 75
5.1.2 Modélisation du capteur tactile . . . . . 76
5.1.3 Modèle global . . . . . 79
5.2 Modèle de la caméra et du système d'acquisition de l'image . . . . . 80
5.2.1 Description du modèle . . . . . 81
5.2.2 Modèle global particulier au projet . . . . . 85
5.2.3 Influence de la projection . . . . . 90
5.3 Éclairage structuré . . . . . 92
5.4 Stratégie d'inspection . . . . . 96
5.4.1 Extraction des points de recherche pour les roches . . . . . 97
5.4.1.1 Choix des points de recherche . . . . . 97
5.4.1.2 Détermination des points de recherche valides pour une roche . . . . . 99
5.4.1.3 Calcul des coordonnées réelles des points de recherche 102
5.4.2 Positionnement automatique . . . . . 102
5.4.2.1 Trajectoire utilisée . . . . . 103
5.4.2.2 Déplacements du Rhino . . . . . 103
5.4.3 Mise en commun de l'information . . . . . 106
5.5 Exemple de fonctionnement . . . . . 107
5.6 Analyse des résultats . . . . . 108
5.6.1 Précision sur la hauteur . . . . . 108
5.6.2 Problèmes rencontrés . . . . . 109
5.7 Conclusion . . . . . 110

**6 Conclusion** **112**
6.1 Résumé et apports du mémoire . . . . . 112
6.2 Travaux futurs . . . . . 115

**Bibliographie** **116**

**A Cinématique du Rhino XR-1** **120**

A.1 Cinématique directe . . . . . 120

A.2 Cinématique inverse . . . . . 122

**B Résumé des paramètres du modèle global et valeurs associées** **128**

# Liste des figures


1.1 Installation d'un brise-roches et du grizzly . . . . . 3

2.1 Vision stéréo . . . . . 10
2.2 Principe de base de la triangulation active. Tirée de [DB87]. . . . . 12
2.3 Triangulation active avec synchronisation. Tirée de [DR88]. . . . . 13
2.4 Principe de la projection au foyer. Tirée de [DR88]. . . . . 14
2.5 Eclairage structuré. Tirée de [HCNP89]. . . . . 15

3.1 Schéma général pour l'automatisation d'un brise-roches . . . . . 23
3.2 Schéma d'ensemble du banc d'essai . . . . . 25
3.3 Banc d'essai . . . . . 26
3.4 Diagramme fonctionnel du Rhino et de son contrôleur . . . . . 27
3.5 Diagramme fonctionnel du système de vision. Tirée de [Ocu86]. . . . 28
3.6 Capteur à contact . . . . . 29
3.7 Diagramme simplifié du programme BRIROC . . . . . 30
3.8 Menu principal du programme BRIROC . . . . . 32
3.9 Assignation des référentiels aux principales composantes du banc d'essai . . . . . 34
3.10 Points de recherche sur le grizzly . . . . . 35
3.11 Définition des plans à partir des points de recherche . . . . . 35

4.1 Parties du grizzly . . . . . 40
4.2 Algorithme de traitement d'images . . . . . 43

4.3 Zone non-traitée de l'image . . . . . 45
4.4 Zones traitées de l'image . . . . . 45
4.5 Contact des régions avec les côtés des parties . . . . . 47
4.6 Regroupement de régions connexes sur les barres du grizzly . . . . . 49
4.7 Regroupement de régions connexes selon la première phase . . . . . 51
4.8 Regroupement de régions connexes selon la deuxième phase . . . . . 52
4.9 Zones traitées et points de recherche du grizzly . . . . . 55
4.10 Différentes étapes relatives au traitement du cas de roches séparées . 56
4.11 Séparation de deux roches effectuée par l'algorithme . . . . . 58
4.12 Exemple pour un amas de roches . . . . . 59
4.13 Exemple d'une roche noire . . . . . 61
4.14 Exemple d'une roche blanche . . . . . 62

5.1 Assignation des référentiels et paramètres cinématiques pour le Rhino XR-1 . . . . . 71
5.2 Paramètres cinématiques pour le banc d'essai . . . . . 77
5.3 Capteur tactile et ses paramètres cinématiques . . . . . 78
5.4 Assignation des référentiels pour le modèle de la caméra . . . . . 82
5.5 Position du référentiel de l'image (réf. $\{I\}$) . . . . . 88
5.6 Influence de la projection sur les coordonnées des roches . . . . . 90
5.7 Calcul de l'erreur de projection . . . . . 91
5.8 Installation utilisée pour l'éclairage structuré . . . . . 93
5.9 Fonctionnement général du système d'éclairage structuré . . . . . 94
5.10 Roche frappée par le plan de lumière . . . . . 95
5.11 Recontruction de la scène suite à un balayage . . . . . 95
5.12 Cycle complet de la stratégie d'inspection . . . . . 98
5.13 Cas limites pour la validité des points de recherche . . . . . 101
5.14 Fonctionnement du déplacement lent en ligne droite . . . . . 105
5.15 Reconstruction de la roche dans référentiel du grizzly . . . . . 108

# Liste des tableaux

3.1 Tâches de la phase d'initialisation . . . . . 31

5.1 Paramètres cinématiques des segments du Rhino . . . . . 72

5.2 Valeurs des paramètres du banc d'essai pour le calcul du décalage maximal dû à la projection . . . . . 92

A.1 Limites permises pour les articulations du Rhino . . . . . 127

# Liste des symboles

$a_{i-1}$ : distance entre $\hat{Z}_{i-1}$ et $\hat{Z}_i$ mesuré le long de $\hat{X}_{i-1}$

${}^{I}C_x$ : numéro de la colonne du centre de l'image dans le référentiel $\{I\}$

${}^{I}C_y$ : numéro de la ligne du centre de l'image dans le référentiel $\{I\}$

$d_i$ : distance entre $\hat{X}_{i-1}$ et $\hat{X}_i$ mesuré le long de $\hat{Z}_i$

$D_{C_x}$ : distance centre à centre entre deux éléments adjacents du senseur de la caméra sur une ligne

$D_{C_y}$ : distance centre à centre entre deux éléments adjacents du senseur de la caméra sur une colonne

${}^{G}D_P$ : décalage causé par la projection mesuré dans $\{G\}$, ${}^{G}D_P = \left({}^{G}D_{P_x}, {}^{G}D_{P_y}\right)$

${}^{I}D_P$ : décalage causé par la projection mesuré dans $\{I\}$, ${}^{I}D_P = \left({}^{I}D_{P_x}, {}^{I}D_{P_y}\right)$

$E_P$ : enfoncement du poussoir

$f$ : distance entre le plan image et le centre optique de la caméra

$F_C$ : facteur de conversion ($F_{C_x}$ et $F_{C_y}$ )

$Hr_{max}$ : hauteur maximale des roches à déposer sur le grizzly

$I_i(x, y)$ : image initiale

$I_o(x, y)$ : image originale

$I_r(x,y)$ : image résultante après la soustraction

$I_s(x,y)$ : image seuillée

$I_{sr}(x,y)$ : image sans roche

$L_{Ft_y}$ : largeur de la fenêtre de travail en pixels dans le sens de $\hat{Y}_I$

$L_{Pa}$ : longueur du déplacement requis pour atteindre le point d'action de l'interrupteur

$L_{Ra}$ : longueur de l'avant bras du Rhino

$L_{Rb}$ : longueur du bicep du Rhino

$M_P$ : marge de protection

$N$ : nombre de degrés de liberté

$N_{A_x}$ : nombre de pixels échantillonnés par le système d'acquisition sur une ligne

$N_{A_y}$ : nombre de pixels échantillonnés par le système d'acquisition sur une colonne

$N_{C_x}$ : nombre d'élements du senseur sur une ligne

$N_{C_y}$ : nombre d'élements du senseur sur une colonne

$O$ : centre optique de la caméra

$O_i$ : intersection de l'axe optique $\hat{Z}_{CO}$ et du plan image frontal

$p$ : pourcentage de l'espace occupé par les trous relativement à l'aire totale du grizzly

${}^{CO}P$ : point $P$ par rapport à $\{CO\}$, ${}^{CO}P = \left({}^{CO}P_x, {}^{CO}P_y, {}^{CO}P_z\right)^T$

${}^{CP}P$ : point $P$ par rapport à $\{CP\}$, ${}^{CP}P = \left({}^{CP}P_x, {}^{CP}P_y\right)$

${}^{G}P$ : point $P$ par rapport à $\{G\}$, ${}^{G}P = \left({}^{G}P_x, {}^{G}P_y, {}^{G}P_z\right)^T$

${}^{I}P$ : point $P$ par rapport à $\{I\}$, ${}^{I}P = \left({}^{I}P_x, {}^{I}P_y\right)$

${}^{T}\boldsymbol{P_P}$ : matrice de position et d'orientation du poussoir par rapport à $\{T\}$

${}^{G}\boldsymbol{P_P}$ : matrice de position et d'orientation du poussoir du capteur par rapport à $\{G\}$

${}^{G}\boldsymbol{P_R}$ : matrice de position et d'orientation du point de recherche par rapport à $\{G\}$

${}^{G}P_R$ : position d'un point de recherche et hauteur de œ point par rapport à $\{G\}$ ${}^{G}P_R = \left({}^{G}P_{R_x}, {}^{G}P_{R_y}, {}^{G}P_{R_z}\right)$

${}^{I}P_R$ : position d'un point de recherche par rapport à $\{I\}$, ${}^{I}P_R = \left({}^{I}P_{R_x}, {}^{I}P_{R_y}\right)$

${}^{G}P_{R_z}$ : hauteur de la roche au point de recherche

${}^{G}P_{R_{z_1}}$ : hauteur pré-fixée supérieure (premier point de déplacement)

${}^{G}P_{R_{z_2}}$ : hauteur pré-fixée inférieure (deuxième point de déplacement)

${}^{CO}_{G}R$ : matrice de rotation de $\{G\}$ par rapport à $\{CO\}$

$S$ : seuil pour le seuillage de l'image pour la détection des parties

$S_B$ : seuil pour le seuillage de l'image sur les barres du grizzly

$S_T$ : seuil pour le seuillage de l'image vis-à-vis les trous du grizzly

${}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T}$ : matrice de transformation du référentiel $\{i\}$ par rapport au réf. $\{i-1\}$

${}^{G}_{BR}\boldsymbol{T}$ : matrice de transformation de $\{BR\}$ par rapport à $\{G\}$

${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}$ : matrice de transformation de $\{ER\}$ par rapport à $\{BR\}$

${}^{ER}_{T}\boldsymbol{T}$ : matrice de transformation de $\{T\}$ par rapport à $\{ER\}$

${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T_d}$ : position et orientation désirées de l'extrémité du robot par rapport à sa base

${}^{0}_{N}\boldsymbol{T}$ : équivalent à ${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}$

## Alphabet grec

$\alpha_{i-1}$ : l'angle entre $\hat{Z}_{i-1}$ et $\hat{Z}_i$ mesuré autour de $\hat{X}_{i-1}$

$\beta$ : orientation du capteur tactile par rapport à l'horizontale

$\theta_i$ : l'angle entre $\hat{X}_{i-1}$ et $\hat{X}_i$ mesuré autour de $\hat{Z}_i$

$\phi$ : défini par l'équation 5.10

$\psi$ : défini par l'équation 5.11

$(\alpha, \beta, \gamma)$ : angles d'Euler

## Référentiels

$\{0\}$ : équivalent au référentiel de la base du robot $\{BR\}$

$\{BR\}$ : référentiel de la base du robot

$\{CO\}$ : référentiel du centre optique de la caméra

$\{CP\}$ : référentiel du plan image de la caméra

$\{ER\}$ : référentiel de l'extrémité du robot

$\{G\}$ : référentiel du grizzly

$\{I\}$ : référentiel de l'image

$\{i\}$ : référentiel du segment $i$ du robot avec l'origine sur le segment $i$

$\{N\}$ : équivalent au référentiel de l'extrémité du robot $\{ER\}$

$\{T\}$ : référentiel du capteur tactile

## Coordonnées

$\left({}^{G}P_{x_p}, {}^{G}P_{y_p}\right)$ : coordonnées de la roche projetées sur le plan du grizzly mesurées dans $\{G\}$

$\left({}^{G}P_{x_r}, {}^{G}P_{y_r}\right)$ : coordonnées réelles mesurées dans $\{G\}$

$\left(\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i\right)$ : axes du référentiel $\{i\}$

$\left({}^{G}_{BR}T_x, {}^{G}_{BR}T_y, {}^{G}_{BR}T_z\right)$ : vecteur position de l'origine de $\{BR\}$ par rapport à $\{G\}$

$\left({}^{ER}_{T}T_x, {}^{ER}_{T}T_y, {}^{ER}_{T}T_z\right)$ : vecteur position de l'origine de $\{T\}$ par rapport à $\{ER\}$

$(T_x, T_y, T_z)$ : vecteur position de l'origine de $\{G\}$ par rapport à $\{CO\}$

# Chapitre 1

# Introduction

Dans les mines souterraines, de nombreuses tâches répétitives sont exécutées par des ouvriers travaillant dans des conditions environnementales difficiles. Dans le but de réduire l'intervention humaine dans ce genre d'environnement et dans le cadre d'une compétition intense, les industries minières s'intéressent à l'automatisation de leurs opérations. Le brise-roches est un exemple de système pour lequel un tel intérêt est apparu ces dernières années.

## 1.1 Problématique

La description du brise-roches et de la tâche de son opérateur permettront de faire ressortir les problèmes reliés à l'automatisation d'un brise-roches.

### 1.1.1 Description du brise-roches

Le brise-roches est un manipulateur hydraulique de 4 degrés de liberté, muni d'un marteau pneumatique ou hydraulique, qui est utilisé pour déplacer et casser des roches bloquées sur un grillage, nommé grizzly, dont la dimension des côtés varie

entre 3 et 5 mètres.

Les roches, qui sont déposées sur le grizzly à la suite de leur transport dans la pelle d'un véhicule (LHD), doivent être réduites en morceaux suffisamment petits pour passer sans problème dans un concasseur. Après quoi elles sont remontées à la surface de la mine. La fonction du grizzly est de retenir les roches de dimensions excédentaires afin de permettre au brise-roches de les casser pour qu'elles tombent en petits morceaux sous le grizzly. La figure 1.1 illustre l'installation d'un brise-roches. Ce dernier est présentement dirigé manuellement par un opérateur localisé dans une cabine, de laquelle il maintient un contact visuel avec le grizzly. De hauts niveaux de bruit, de la poussière, des vibrations et des éclats de roches projetés en tous sens, font partie des conditions difficiles auxquelles fait face l'opérateur.

### 1.1.2 Tâche de l'opérateur

La tâche de l'opérateur décrite ici, et qui est donnée en détails dans [ACH89], est basée sur une visite effectuée à la mine Fraser de Sudbury.

Après le déchargement des roches sur le grizzly, l'opérateur va, si nécessaire, "balayer" la surface du grizzly avec l'extrémité du marteau pour faire tomber les accumulations de petites roches. Parfois il déplacera le marteau trou par trou de façon systématique. L'approche de l'opérateur pour briser une roche dépend de la grosseur de la roche. Si la roche est grande, il devrait la casser sur les côtés, petit à petit, pour obtenir une grandeur raisonnable. Pour les petites roches, il positionnera le marteau au centre de la roche pour la casser. Malgré ces principes généraux, il n'existe pas de règles strictes pour casser une roche. Comme l'opérateur, à partir de sa position de travail, n'est pas en mesure de voir la roche au complet, il lui arrivera de casser la roche qu'après de multiples essais, en ayant déplacé le marteau à plusieurs positions sur la roche. Toutefois l'expérience lui assurera une plus grande efficacité. Pour briser

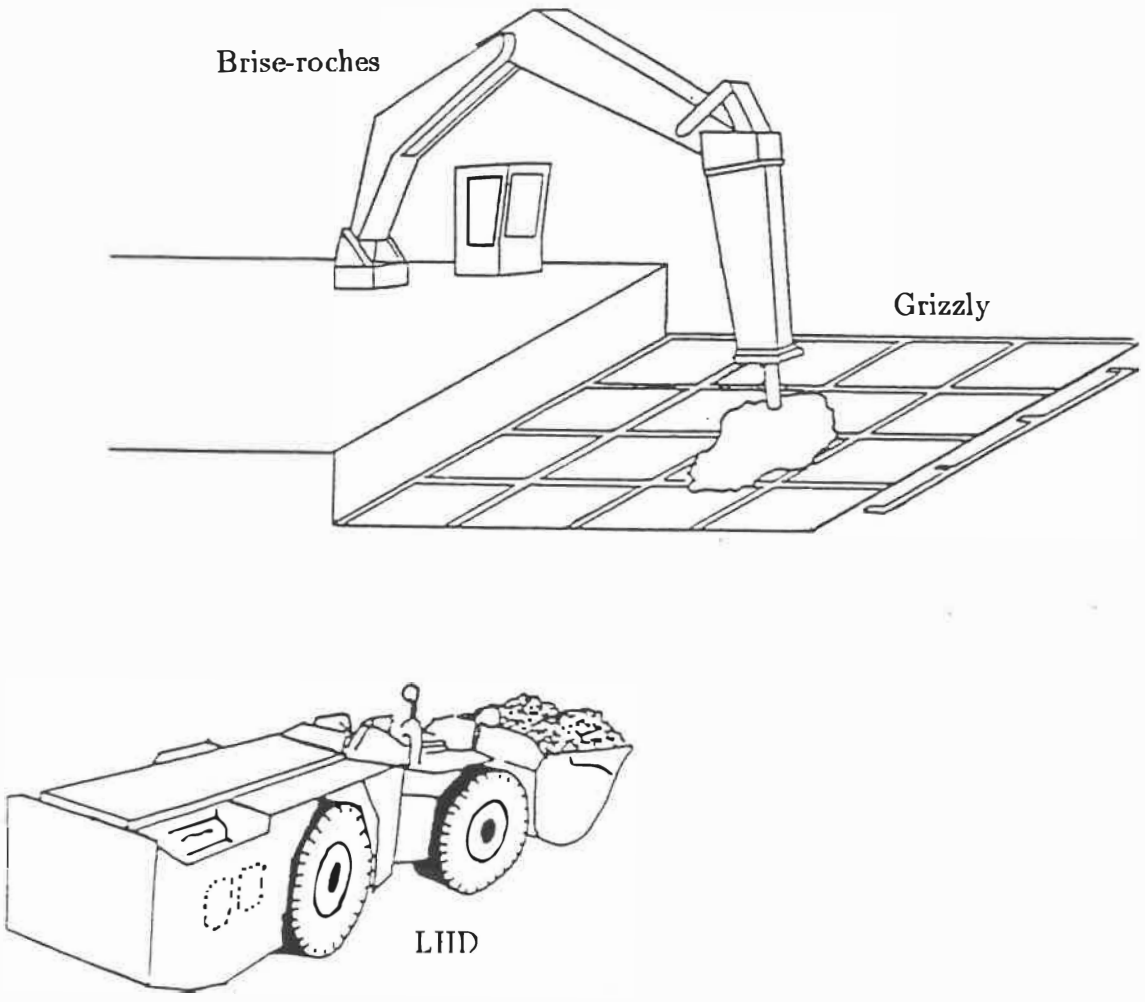



Figure 1.1: Installation d'un brise-roches et du grizzly

une roche, l'opérateur doit prendre soin de stabiliser celle-ci et d'orienter le marteau le plus perpendiculairement possible à la surface de la roche pour éviter le glissement de l'extrémité du marteau sur la roche. Par la suite, tout en maintenant une certaine pression sur le marteau, il actionnera le mécanisme de frappe de ce dernier, jusqu'au moment de la cassure.

### 1.1.3 Automatisation d'un brise-roches

L'automatisation complète d'un brise-roches passe par le développement des éléments suivants:

**Détection et localisation:** Cette fonction vise à détecter et à localiser les roches sur le grizzly. Idéalement on recherchera à extraire le plus d'information possible. Outre la position de la roche, la hauteur de celle-ci et sa forme pourraient être des informations utiles.

**Contrôle automatique du bras manipulateur:** Cette fonction consiste à modifier le mécanisme du brise-roches pour qu'il puisse être contrôlé par ordinateur et qu'il puisse effectuer de façon automatique des mouvements. Un brise-roches automatique aurait besoin d'être muni de capteurs lui permettant de mieux réagir à son environnement et d'assurer un contrôle des opérations.

**Stratégie:** Une stratégie doit être développée pour effectuer le cassage des roches et d'effectuer la gestion des opérations du brise-roches en tenant compte de l'information extraite sur les roches et de celle provenant des capteurs du brise-roches.

Outre les éléments précédents, un brise-roches automatique aura à tenir compte d'aspects tels que la production, l'intégration avec d'autres équipements et la sécurité.

## 1.2 Objectifs et motivations

Ce projet concerne la conception d'un banc d'essai pour l'étude de l'automatisation d'un brise-roches. Le but principal du développement de ce banc d'essai est de

reproduire, sur une échelle réduite et dans des conditions de laboratoire, un brise-roches qui fonctionne de façon automatique ou partiellement automatique, c'est-à-dire où l'intervention de l'opérateur est limitée. Étant donné que l'implantation est effectuée en laboratoire, il n'est pas question de briser les roches. Ainsi la stratégie pour effectuer cette tâche n'est pas considérée dans ce projet.

Dans un premier temps, ce projet vise à relever les méthodes potentielles pour la détection et la localisation des roches sur le grizzly. Cette étude a pour but de mettre en évidence des solutions susceptibles d'extraire des informations pertinentes sur des roches bloquées sur le grizzly telles que: la position des roches, la forme, la hauteur, etc. Il sera question de capteurs externes qui peuvent être montés sur un robot ou en un lieu fixe à proximité du grizzly.

Un des objectifs de ce projet est d'implanter une des méthodes de détection des roches sur un modèle réduit d'un grizzly et dans des conditions idéalisées. La méthode qui fut choisie pour effectuer cette implantation est basée sur l'utilisation d'un système de vision passive, c'est-à-dire une caméra fixée au dessus du grizzly et un système d'acquisition d'images relié à un ordinateur. Un algorithme de traitement d'images doit être développé pour permettre l'extraction de la position et du contour des roches dans l'image. L'algorithme développé a pour but de montrer la faisabilité et l'efficacité de détecter les roches grâce à la vision passive. Parmi les contraintes imposées à cet algorithme, il en est une qui est importante pour une éventuelle implantation réelle et elle concerne le fait que le traitement doit être assez rapide.

Un des objectifs intéressants de ce projet, c'est qu'il vise à aller au délà de la détection des roches afin de développer en partie le contrôle automatique. Un robot, le Rhino XR-1, est utilisé et sa fonction est de reproduire le fonctionnement d'un brise-roches contrôlable par ordinateur. Grâce à l'information obtenue par le traitement d'images, l'utilisation d'un robot permettra de reproduire en partie le travail d'un brise-roches automatique. En utilisant un capteur tactile monté sur le robot,

il sera possible d'étudier l'utilité d'un tel capteur pour effectuer le positionement automatique du brise-roches et pour extraire la hauteur des roches.

Enfin ce projet vise à mettre en évidence la grande variété de problèmes qui se posent lors de la conception et le développement d'un système automatique pour un brise-roches.

## 1.3 Organisation du mémoire

Outre cette introduction, le mémoire est constitué de quatre chapitres, d'une conclusion contenue dans le chapitre 6 et de deux annexes.

Le chapitre 2 présente les solutions les plus susceptibles d'être utilisées dans le cadre de l'automatisation d'un brise-roches. Il sera question de capteurs externes qui peuvent être montés sur un robot ou en un lieu fixe. Certains de ces capteurs donnent une information très partielle sur la présence d'une roche alors que d'autres peuvent fournir de riches données sur l'orientation et la profondeur des roches dans le système de coordonnées du brise-roches. Une brève analyse des avantages et des inconvénients pour chacune des solutions sera présentée.

Le chapitre 3 a pour but de décrire le banc d'essai qui a été utilisé pour cette expérimentation. Tout d'abord la nécessité d'une telle expérimentation dans le cadre de l'automatisation d'un brise-roches sera expliquée. Par la suite, le principe de fonctionnement de l'expérimentation ainsi que les composantes matérielles et logicielles du banc d'essai développé seront décrits. La représentation du banc d'essai sera également présentée.

Le but du chapitre 4 est de décrire la partie du projet qui concerne le traitement d'images. Dans un premier temps, nous décrirons globalement l'algorithme de traitement d'images et les principales fonctions qui constituent celui-ci. Cet algorithme

traite des images de la scène éclairée par un éclairage diffus. Des exemples de résultats obtenus seront pas la suite présentés. Une analyse de ces résultats suivra afin de faire ressortir les caractéristiques de l'algorithme et des perspectives éventuelles.

Le chapitre 5 traite de l'utilisation du Rhino pour reproduire le travail d'un brise-roches avec l'aide d'un capteur tactile fixé à son extrémité. La modélisation du robot, du capteur tactile, de la caméra et du système d'acquisition de l'image y sont contenues. Les résultats d'un système utilisant un éclairage structuré seront également présentés afin de voir les performances d'une telle solution. Par la suite nous poursuivrons avec la stratégie utilisée pour faire le positionnement automatique du robot à partir de l'information de la vision passive et ainsi effectuer l'inspection tactile des roches. Un exemple de fonctionnement montrera l'implantation de cette stratégie en laboratoire et une analyse des résultats suivra.

L'annexe A vise à décrire la cinématique du Rhino XR-1. La première section couvre la cinématique directe tandis que la cinématique inverse se trouve dans la deuxième section.

Finalement, l'annexe B regroupe tous les paramètres décrits pour le modèle cinématique complet du brise-roches et donne les valeurs associées à ces paramètres dans le cadre du banc d'essai utilisé.

# Chapitre 2

# Solutions potentielles pour la détection et la localisation des roches

Beaucoup de techniques sont aujourd'hui disponibles afin de permettre à un robot d'acquérir de l'information sur son environnement. Dans ce chapitre nous présenterons les solutions les plus susceptibles d'être utilisées dans le cadre de l'automatisation d'un brise-roches. Il s'agit ici de capteurs externes qui peuvent être montés sur un robot ou en un lieu fixe. Certains de ces capteurs donnent une information très partielle sur la présence d'une roche alors que d'autres peuvent fournir de riches données sur l'orientation et la profondeur des roches dans le système de coordonnées du brise-roches (données de type $2\frac{1}{2}$-D).

## 2.1 Vision passive à l'aide d'une caméra

Cette solution requiert l'utilisation, sous sa forme la plus simple, d'une caméra située au-dessus du grizzli. Cette solution ne permet qu'une connaissance en deux dimensions des roches (dans le plan du grizzly); elle ne donne aucune information sur la hauteur des roches. Toutefois — et c'est là son grand avantage — elle permet d'iden-

tifier rapidement le contour des roches car l'acquisition de l'image est instantanée et son traitement peut être assez rapide.

L'étape première du processus de vision est de décomposer l'image en ses différentes parties ou objects. Cette tâche est la segmentation. Deux approches existent pour la segmentation d'images:

Détection d'arêtes: Extraction des changements d'intensité significatifs dans l'image pour ensuite y extraire des inférences concernant les arêtes physiques de la scène.

Extraction des régions: Partition de l'image en régions maximales par rapport à un critère d'homogénéité [Coh88].

Il est à noter que l'algorithme de traitement d'images doit permettre l'élimination du grillage de l'image pour ne faire ressortir que les roches. En conclusion cette technique, quoique ne donnant qu'une information partielle des roches, peut permettre la localisation rapide de celles-ci et servir de guide à un autre capteur qui complètera les connaissances acquises sur la roche.

L'utilisation de plusieurs caméras ou d'une caméra montée sur le brise-roches peut être possible mais ne permet pas d'extraire beaucoup plus d'information puisque l'image de la roche n'est qu'une projection de celle-ci et que le regroupement des données dans le cas où plusieurs caméras sont utilisées est très difficile à faire.

## 2.2 Vision stéréo (triangulation passive)

Cette solution exige l'utilisation de deux caméras placées à faible distance l'une de l'autre. Elle vise à reproduire la façon humaine de percevoir la profondeur. La figure 2.1 montre le principe général de la vision stéréo dans le cadre de la vision

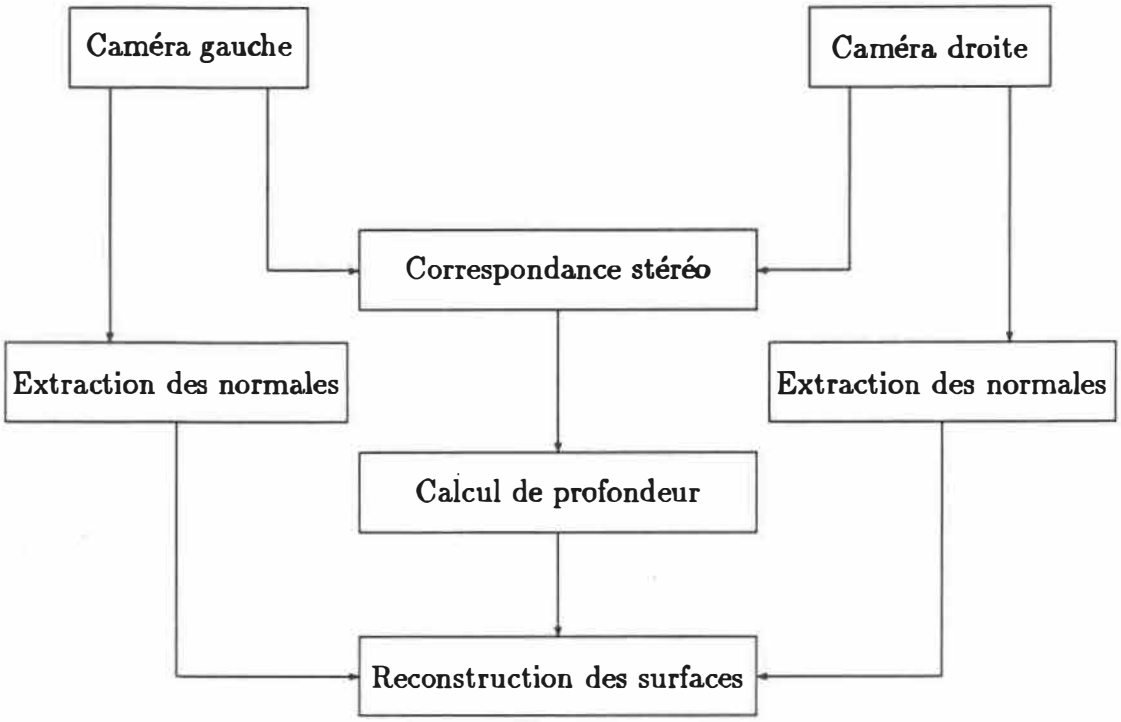



Figure 2.1: Vision stéréo

artificielle [Bou87].

La *correspondance* a pour but de déterminer des points dans chacune des deux images qui proviennent du même point physique. Celle-ci se fait à plusieurs niveaux de résolution en partant d'un niveau grossier à fin. À partir de la connaissance des relations entre les deux caméras, *le calcul de profondeur* peut être effectué. Le désavantage de cette approche est que l'information de profondeur est éparse et se situe uniquement au niveau des arêtes de la scène. C'est pourquoi, si l'information est trop partielle, il est nécessaire d'effectuer une *reconstruction des surfaces*, en combinant l'information de profondeur des arêtes avec celle provenant de *l'extraction des normales*, qui sont trouvées par l'étude de la réflectance de l'image. Cette reconstruction permet de déterminer les surfaces de la roche.

L'extraction des normales exige la connaissance de la direction de la source de

lumière et la connaissance du type de réflexion de la roche. Étant donné la grande étendue d'un grizzly, plus d'une source d'éclairage devraient être requises, de même que plusieurs types de roches, qui sont en plus non uniformes, vont se trouver sur le grizzly, rendant ainsi la reconstruction complète irréalisable. Il est toutefois possible, étant donné que les roches sont loin d'être lisses, que l'information de profondeur obtenue sur les seules arêtes de la scène puissent donner une information assez riche pour déterminer la forme de la roche. Il pourrait être possible également d'utiliser un éclairage structuré pour accroître les arêtes de la scène.

La vision stéréo est certainement promise à un grand avenir mais elle est peu utilisée jusqu'à maintenant à l'extérieur des laboratoires de recherche. Il faut noter également que les algorithmes de stéréo sont très exigeants au point de vue des ressources associées au calcul.

## 2.3 Capteurs de distance

Un capteur de distance mesure la distance d'un objet de la scène, situé dans le champ d'opération du capteur, par rapport à un point de référence. L'objectif de cette solution est de bâtir une carte de profondeur de la scène au complet. Pour ce faire, cette technique repose sur l'utilisation d'un laser afin d'obtenir une information ponctuelle. Trois méthodes, décrites plus bas, sont possibles pour ce type de solution: la *triangulation active*, le *temps de propagation* et la *projection au foyer (focusing)*.

### 2.3.1 Triangulation active

Le principe de la triangulation est que le point lumineux apparaissant sur l'objet est imagé sur le détecteur tel que montré à la figure 2.2. Une relation géométrique relie la position lue sur le détecteur à l'information de profondeur. En utilisant deux

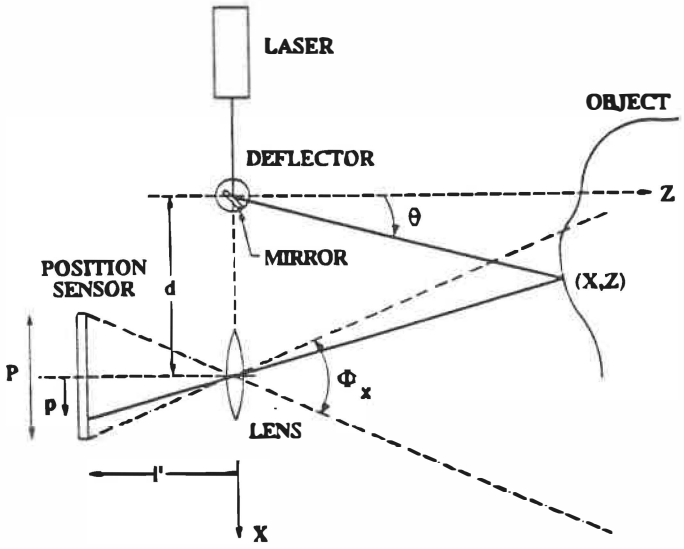



Figure 2.2: Principe de base de la triangulation active. Tirée de [DB87].

miroirs et en synchronisant la source lumineuse et le détecteur (figure 2.3), il est possible de couvrir l'ensemble d'une vaste scène [DB87].

### 2.3.2 Temps de propagation

Cette approche utilise la technologie du laser pulsé. Le temps que prend une impulsion de lumière pour revenir directement à son point de départ après avoir frappé une surface détermine la distance entre le capteur et la surface. La résolution est déterminée par le plus petit intervalle de temps que le système peut mesurer. Ce genre de système est particulièrement efficace pour de grandes distances où l'erreur obtenue est faible par rapport à la distance mesurée. Dans le cas de petites distances, l'erreur est importante [MM83].

Une alternative au laser pulsé est l'utilisation d'un laser au faisceau continu mais modulé dont on mesure le changement de phase entre le signal envoyé et celui reçu. Ce déphasage détermine la distance parcourue par l'onde. Jusqu'à maintenant de bons résultats ont été obtenus mais pour de courtes distances [DR88].

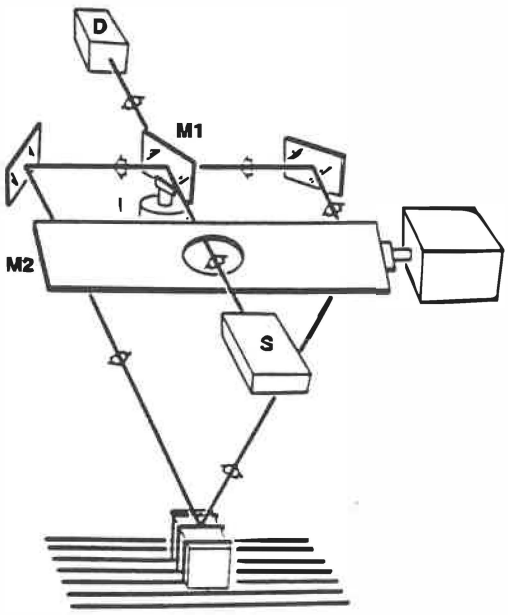



Figure 2.3: Triangulation active avec synchronisation. Tirée de [DR88].

### 2.3.3 Projection au foyer (focusing)

En utilisant un masque à deux ouvertures placé devant une caméra CCD (figure 2.4), un point $B$ sera projeté hors foyer au point $B'$ et créera deux points $b'$ sur le détecteur. La distance entre ces deux points $b'$ détermine la distance par rapport à l'objet [DR88].

Cette approche est peu couteuse et a comme grand avantage d'être très robuste aux vibrations et aux chocs [DR88]. Toutefois cette approche est limitée au niveau de la précision par rapport à la profondeur de champ.

### 2.3.4 Caractéristiques générales

Le problème des capteurs de distance — peu importe la méthode — réside dans le fait qu'il n'existe pas présentement sur le marché un appareil qui puisse permettre le balayage de tout un grizzly avec une précision adéquate. Un tel appareil pourrait

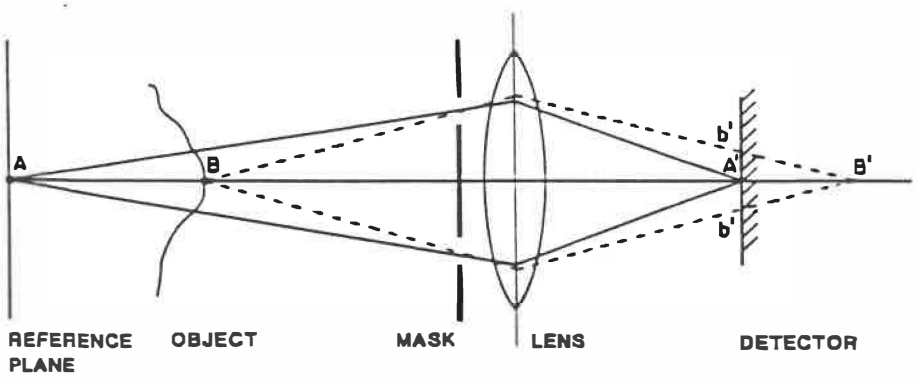



Figure 2.4: Principe de la projection au foyer. Tirée de [DR88].

être conçu mais à un coût fort élevé. De plus, quoique l'information de la scène est très complète, il peut arriver que certains points de la scène ne seront pas détectés par le télémètre à cause de l'occlusion ou de l'absorption de la surface. Par ailleurs, le balayage est relativement lent, du moins par rapport à la vision passive. Par rapport à la vision stéréo, les données de profondeur obtenues sont plus riches mais par contre on n'a pas les informations de la vision passive telles que la réflectance et la texture des objets (à moins d'utiliser la triangulation active où ces informations peuvent être obtenues mais pour la lumière du laser au lieu d'un éclairage normal).

## 2.4 Éclairage structuré

Cette approche consiste à projeter un patron de lumière sur la scène et d'utiliser la distorsion du patron pour calculer la profondeur. Le plus simple patron est un plan de lumière qui peut être généré par une lentille cylindrique ou une fente étroite. Sur une scène lisse, ce genre de patron génère une ligne, toutefois, en présence d'un objet, la ligne subit des déformations. La connaissance de ces déformations permet le calcul (par triangulation) de la hauteur de l'objet à cet endroit (figure 2.5). En balayant la scène avec le patron de lumière, il est possible de connaître la profondeur de celle-ci

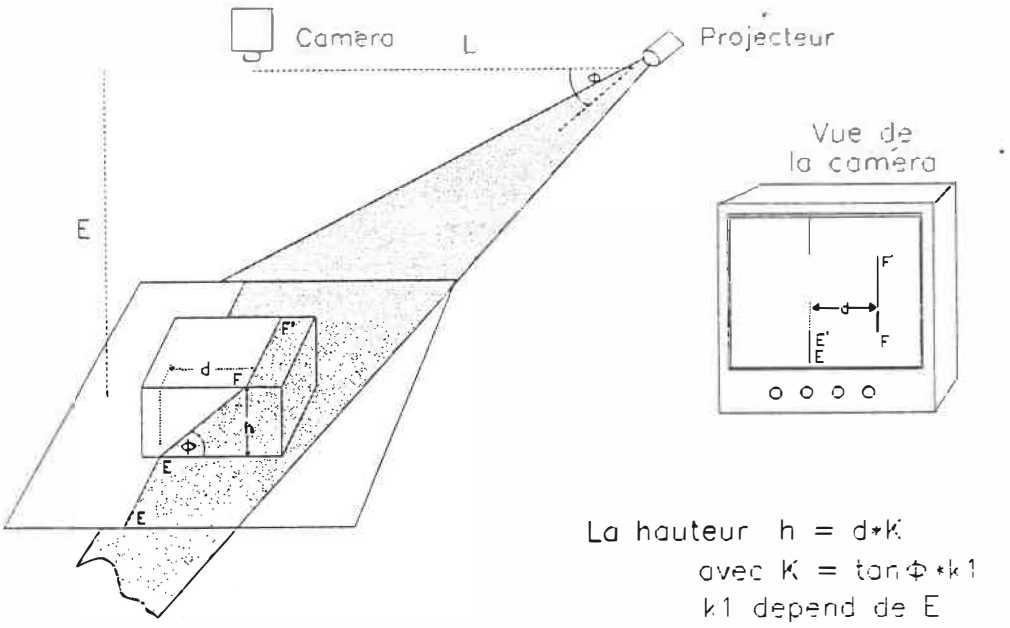



Figure 2.5: Eclairage structuré. Tirée de [HCNP89].

à tout point de la scène. Un tel balayage est toutefois lent.

On peut également utiliser un patron de plans parallèles ou même quadrillés. Par ces techniques, l'image entière peut être saisie d'un coup; ce qui donne une connaissance de la hauteur sur l'ensemble de l'image. Le problème de cette approche est que lorsqu'il y a plusieurs discontinuités, il n'y a pas de ligne continue sur la scène, on retrouve plutôt plusieurs segments de ligne. La difficulté qui se présente alors est de faire la correspondance entre les lignes du patron de lumière et les segments générés sur la scène. Différentes approches ont été développées pour résoudre ce problème de correspondance en effectuant un encodage particulier des lignes [WA88]. Généralement ce genre de patron est formé de peu de plans afin de faciliter le regroupement des segments. Avec des patrons projetés qui sont fixes, les données obtenues sont éparses et à des positions arbitraires.

Dans le cas d'un patron de lumière de type quadrillé, il est possible d'obtenir l'orientation des surfaces sans passer par le calcul des coordonnées de la projection

du plan, mais de déduire l'orientation des surfaces par l'analyse des patrons créés sur la scène [WMA87], [SS89], ce qui élimine la tâche de correspondance. Il faut noter toutefois que seule la hauteur relative des roches peut être connue et non pas leur hauteur réelle.

Le principal inconvénient de l'éclairage structuré est sa sensibilité aux ombrages: il est fréquent de perdre la projection de la lumière. Il est par ailleurs impossible d'obtenir de l'information complète sur toute la scène puisque des zones de l'image seront ombragées ou encore, selon la position de la caméra, ne pourront être vues. Le choix de cette solution repose sur le développement éventuel d'un émetteur permettant de projeter le patron de lumière sur toute la largeur d'un grizzly.

## 2.5 Capteurs de proximité

Ce type de capteur, contrairement aux capteurs de distance, ne donne pas les coordonnées tri-dimensionnelles de toute une scène, mais tout simplement la distance approximative entre un objet de la scène et le capteur. La distance est approximative car la résolution de ce type d'appareil est généralement grossière et ainsi la distance mesurée n'est pas celle d'un point précis de la scène. De plus on verra que ce type d'appareil peut donner des valeurs faussées.

Parmi les nombreuses méthodes qui existent pour évaluer la proximité, certaines ne peuvent être appliquées dans le cas de la détection de roches, puisque le principe est basé sur la présence de métal ou de substances magnétiques; ce qui n'est pas le cas de tous les types de roches. D'autres, les capteurs capacitifs, sont trop sensibles pour être efficaces dans un environnement minier. Deux approches ont été retenues: les *capteurs ultrasoniques* et les *capteurs électro-optiques.*

### 2.5.1 Capteurs ultrasoniques (sonars)

Cette catégorie rejoint la section relative au *temps de propagation* dans la mesure où la distance est déterminée par la mesure du temps de propagation d'une onde mais, dans ce cas-ci, des ondes ultrasons au lieu de la lumière sont utilisées.

A cause de la largeur du faiseau, les appareils à ultrasons possèdent une faible résolution. De plus, ils donnent des mesures faussées lorsque la surface, sur laquelle l'onde est réfléchie, possède une inclinaison supérieure à 40 degrés; les ondes ont alors tendance à dévier de la direction originale [Jar83]. C'est pourquoi ce genre de capteur ne peut servir à bâtir la carte de profondeur d'une scène au complet.

### 2.5.2 Capteurs optiques

La plupart des capteurs optiques utilisent une diode électroluminescente (LED) [FGL87]. La distance est déterminée par l'intensité du signal lumineux capté sur le détecteur après réflexion sur l'objet. Généralement ce type de capteur est conçu de façon à donner une réponse binaire, indiquant si oui ou non l'objet est à l'intérieur d'une certaine distance; ce qui se produit lorsque l'intensité de la lumière reçue dépasse un certain seuil. Quoiqu'il est possible de calibrer l'intensité du signal lumineux reçu comme une fonction de la distance, il faut alors tenir compte de l'orientation de l'objet et de ses caractéristiques de réflexion; ce qui est impossible à faire dans le cas de cette application.

Quoique d'autres méthodes plus précises existent, telles que celles reposant sur l'utilisation d'un laser (par exemple avec triangulation), leur utilité est limitée à donner la distance d'un point de l'objet uniquement et non pas de toute la scène comme les capteurs de distance.

### 2.5.3 Caractéristiques générales

Étant donné la difficulté de calibrer un capteur de proximité dans le cas d'un brise-roches, l'utilité d'un tel appareil se limite à déterminer la présence d'un objet (roche) dans le voisinage d'une certaine zone. Un tel capteur peut être monté près de l'extrémité du brise-roche et indiquerait la présence d'une roche près de l'extrémité du marteau. Dans le cas où un capteur optique de précision est utilisé, ce capteur pourrait donner la hauteur de la roche à un endroit précis sans toucher à celle-ci.

## 2.6 Capteurs tactiles

Dans le cas du brise-roches, la notion de capteur tactile se limite à un capteur de type binaire, c'est-à-dire qui indiquera la présence ou non d'un contact avec la roche. Étant donné que la pointe du marteau sert à casser les roches, il ne peut être question d'installer un capteur directement sur la pointe. Par contre, il faut noter que le marteau des brises-roches est fait de façon à ce que la pointe s'enfonce un peu lors du contact avec la roche. Un interrupteur pourrait alors être placé à l'intérieur de l'enveloppe du marteau et servirait à détecter l'enfoncement du marteau lors d'un contact avec une roche.

## 2.7 Conclusion

Trois solutions permettent d'obtenir une information assez complète sur les roches déposées sur le grizzly. Il s'agit des capteurs de distance, de la vision stéréo et de l'éclairage structuré. Pour chacune de ces solutions de nombreux systèmes ont été développés et utilisés ces dernières années. Toutefois aucune ne peut être employée directement au cas particulier du brise-roches. De plus le développement de tels

capteurs peut demander de nombreuses années de recherche. L'intérêt de ces solutions repose toutefois sur leur avantage indéniable par rapport aux solutions explorées dans ce chapitre: l'information 2 $\frac{1}{2}$-D des roches est disponible.

Parmi les autres solutions étudiées, la vision passive à une caméra permet l'identification rapide des roches dans le plan du grizzly. Quoique donnant une information très partielle des roches, il faut retenir que cette solution peut être surtout efficace pour guider rapidement un autre capteur ou même le brise-roches vers des roches détectées par vision.

Les autres capteurs, tels que le capteur tactile, le capteur ultrason ou le capteur optique, peuvent être classés comme des capteurs à une dimension. Les capteurs de proximité permettent de connaître de façon généralement appoximative la distance entre deux points. Quoique les capteurs de proximité évitent de toucher à la roche pour connaître la présence d'une roche, il peut être plus utile, surtout dans le cas du contrôle du brise-roches, de munir celui-ci d'un capteur tactile.

L'évaluation des solutions possibles présentées ici doit dépendre, non seulement de l'évaluation du capteur lui-même, mais également des algorithmes utilisés pour le traitement des informations en provenance du capteur. Par exemple dans le cas de l'utilisation de capteurs permettant l'acquisition de données 2 $\frac{1}{2}$-D , il est nécessaire de grouper ces données en différentes surfaces qui possèdent des caractéristiques propres (segmentation 3-D). La connaissance de l'orientation des surfaces permet, en autres, de déterminer l'angle d'attaque de la roche. Or s'il s'avère qu'il n'est pas possible d'avoir un algorithme efficace pour effectuer la segmentation des surfaces, l'utilisation de ce type de capteur pour connaître l'angle d'attaque est à revoir. Des essais approfondis pourront permettre une meilleure évaluation des solutions proposées dans ce chapitre.

# Chapitre 3

# Description du banc d'essai

Ce chapitre a pour but de décrire le banc d'essai qui a été utilisé pour cette expérimentation. Tout d'abord nous expliquerons la nécessité d'une telle expérimentation dans le cadre de l'automatisation d'un brise-roches. Par la suite, nous décrirons le principe de fonctionnement de l'expérimentation ainsi que les composantes matérielles et logicielles du banc d'essai développé. La représentation du banc d'essai sera également présentée.

## 3.1 Nécessité de l'expérimentation

À la suite des options potentielles pour la détection des roches vues au chapitre précédent, on se rend compte que la robotique offre plusieurs avenues de solutions possibles pour reproduire les tâches réalisées par l'opérateur d'un brise-roches. Par exemple, le brise-roches peut, dans le scénario le plus simple, exécuter de façon répétitive une série de mouvements élémentaires qui ont été pré-programmés. Chaque trou du grizzly est alors exploré systématiquement et le contrôleur du brise-roches tente de briser les roches en opérant à l'aveuglette. Ce schème entraîne une diminution de la productivité du brise-roches, causée par une perte de temps dans des mouvements

superflus [HCP89].

Un scénario de solution plus complexe, nécessiterait au préalable l'utilisation d'un système d'acquisition 2 $\frac{1}{2}$-D (capteur de distance, vision stéréo ou éclairage struturé) permettant de réaliser la modélisation complète de l'espace de travail: identification des roches et des amas de roches, modélisation des surfaces et peut-être même modélisation de la géométrie tri-dimensionnelle des roches. À partir de ces informations, le positionnement du marteau est réalisé précisément aux points identifiés [HCNP89]. Cette dernière solution permet d'obtenir beaucoup plus d'information sur les roches. Toutefois on peut se demander si toute cette information est requise. Si la première solution amène une diminution de la productivité, il n'est pas évident que la deuxième solution, en entraînant une meilleure productivité, serait rentable financièrement étant donné l'équipement sophistiqué qui est requis. De plus que doit-on penser d'une solution intermédiaire ?

En fait, le problème qui ressort ici est qu'il n'existe aucun moyen permettant de déterminer la quantité et la qualité des informations nécessaires pour automatiser un brise-roches. Seule l'expérimentation permet de procéder à l'évaluation des différentes approches et à sélectionner la meilleure solution. Pour être en mesure de progresser dans ce processus, il convient donc de décomposer la tâche à automatiser en différentes fonctions et d'utiliser un banc d'essai pour expérimenter les différentes solutions techniques envisageables.

Dans le cadre de ce projet, nous avons développé un banc d'essai qui permet d'étudier, dans des conditions de laboratoire, les problèmes de détection des roches et la détermination de leurs caractéristiques géométriques par l'utilisation de la vision passive. Il permet également de reproduire le positionnement du marteau sur les roches. Toutefois, il n'est pas possible de les fracturer.

## 3.2 Principe de fonctionnement

Le schéma de la figure 3.1 illustre en termes généraux le principe de fonctionnement d'un brise-roches automatique tel qu'il a été exploré dans ce projet. Le système de commande du brise-roches possède deux fonctions principales:

1. **Analyse d'images:** La première fonction a pour objectif de modéliser les roches présentes sur le grizzly; il s'agit alors de détecter et de localiser les roches et les amoncellements de roches sur le grizzly. Pour ce faire un traitement d'images est effectué sur l'image de la scène qui est sous l'influence d'un éclairage diffus. Ce traitement vise en premier lieu à extraire le contour des roches. La dimension dans le plan du grizzly et les points d'appui sur le grizzly peuvent également être déterminés.

2. **Inspection tactile:** L'objectif de la deuxième fonction est d'extraire la hauteur des roches par l'entremise d'un capteur tactile. Pour ce faire, le robot est dirigé par le contrôleur, à des positions pré-déterminées sur la roche jusqu'au contact du capteur tactile avec la roche. La hauteur des roches est connue à ces points lors du contact du robot avec la roche. Un modèle tri-dimensionnel des roches est ainsi bâti en combinant l'information de la première fonction avec les hauteurs obtenues dans cette partie.

Les différents problèmes reliés à ces deux grandes fonctions du système de contrôle d'un brise-roches seront étudiés séparément dans les deux chapitres qui suivent. Ces fonctions seront de plus évaluées quant à leur potentiel à résoudre la tâche globale de l'automatisation.

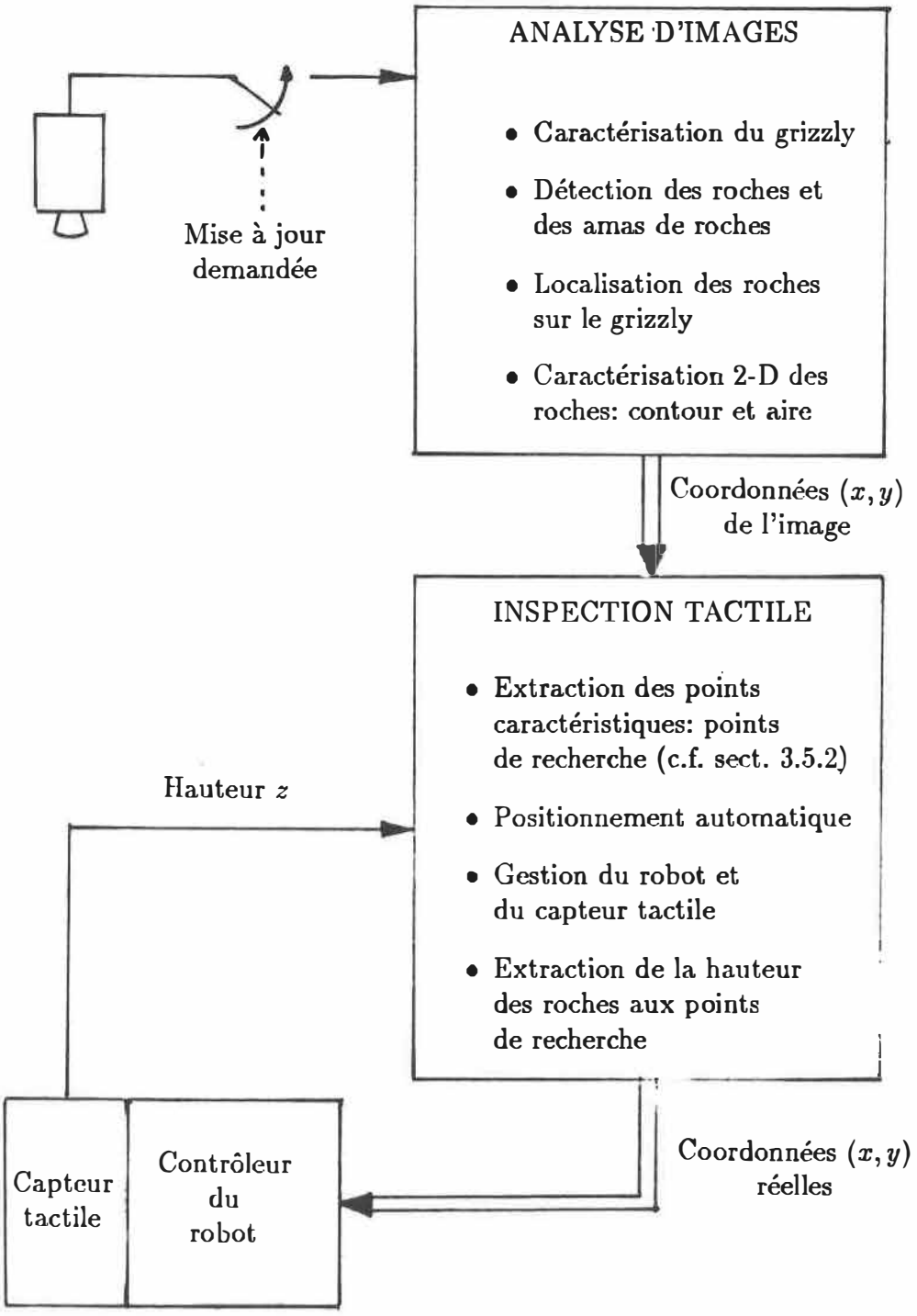



Figure 3.1: Schéma général pour l'automatisation d'un brise-roches

## 3.3 Composantes matérielles du banc d'essai

Le banc d'essai est constitué principalement, du point de vue matériel, d'un modèle réduit du grizzly, d'un robot manipulateur, soit le Rhino XR-1 pour reproduire le brise-roches, d'un système de vision et d'un capteur à contact. Le contrôle de l'expérimentation est assuré par un micro-ordinateur de type IBM-XT. La figure 3.2 illustre le schéma d'ensemble du banc d'essai pendant que la figure 3.3 montre l'installation du laboratoire. Nous décrirons maintenant les principales composantes matérielles de ce banc d'essai.

### 3.3.1 Grizzly

Nous avons utilisé un modèle réduit d'un grizzly. Celui-ci mesure 38 par 32 cm. Il est constitué de 20 trous (5x4) dont la dimension moyenne de ceux-ci est de 5.7 par 5.95 cm. Le grizzly utilisé est de couleur blanche. L'usage de cette couleur vise à reproduire l'aspect d'un grizzly réel recouvert de poussière tel qu'on le retrouve dans certaines mines. Le fond sous le grillage est quant à lui de couleur noire; ce qui correspond assez bien à la réalité.

### 3.3.2 Robot

Le robot Rhino XR-1, photographié à la figure 3.3, possède 5 degrés de liberté [XR 86]. Toutefois dans le but de reproduire le manipulateur utilisé dans une vraie installation de brise-roches, seulement 4 axes de rotation ont été utilisés. Ainsi il n'y a pas de rotation sur le dernier joint du Rhino. Le Rhino a une portée de 57 cm et peut soulever une charge de 1 kg.. Les articulations sont actionnées par des moteurs à courant continu de 12 volts sur lesquels sont montés des encodeurs optiques. Le contrôleur d'origine du Rhino est utilisé pour actionner les moteurs de celui-ci. La

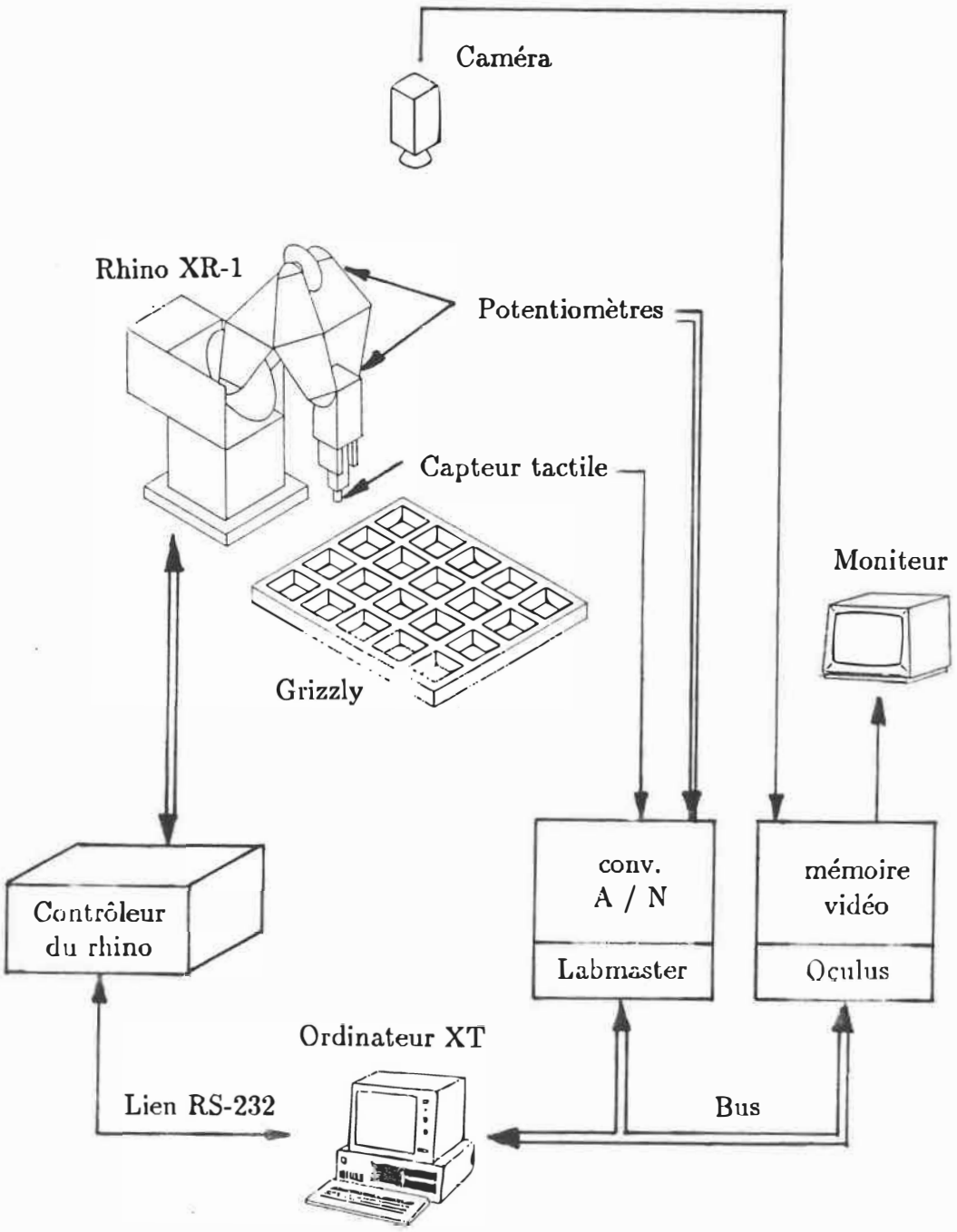



Figure 3.2: Schéma d'ensemble du banc d'essai

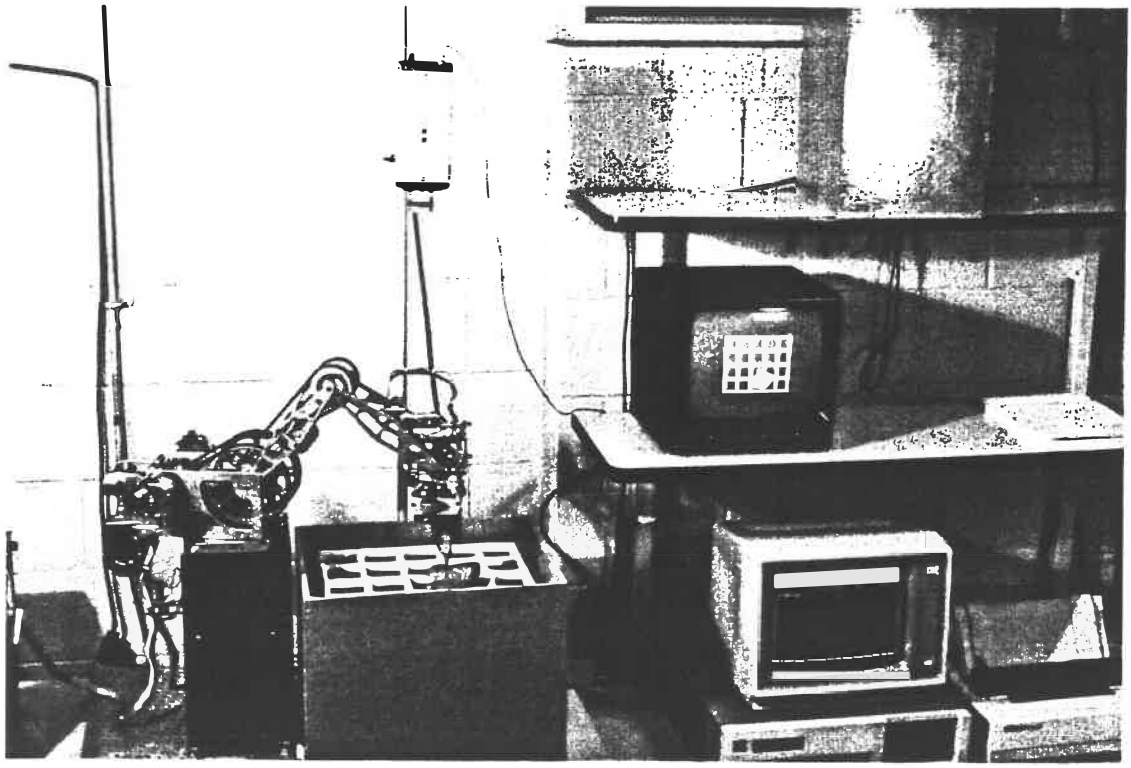


Figure 3.3: Banc d'essai

loi de commande utilisé par le contrôleur est de type tout ou rien (bang-bang). Le déplacement de chaque moteur s'effectue en spécifiant au contrôleur, à travers un lien RS-232, le nombre d'impulsions dont on veut faire tourner l'encodeur monté sur ce moteur (figure 3.4).

Des potentiomètres ont été ajoutés sur chaque joint du Rhino afin de connaître la position initiale de celui-ci. Il est alors possible de placer celui-ci à une position précise à l'initialisation. Une carte Lab Master [Lab85] est utilisée pour la conversion analogique / numérique des potentiomètres.

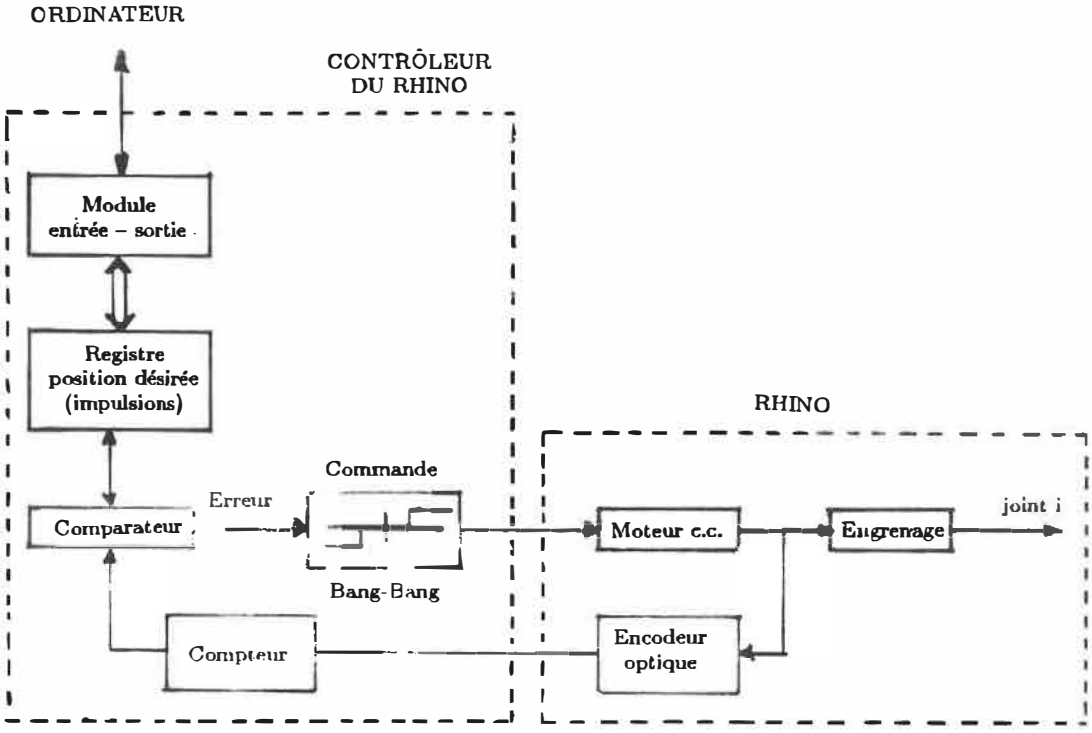



Figure 3.4: Diagramme fonctionnel du Rhino et de son contrôleur

### 3.3.3 Système de vision

Le système de vision est constitué des éléments suivants: une caméra, une carte d'acquisition d'images branchée dans l'ordinateur et un moniteur pour la visualisation des résultats. L'acquisition d'images est faite par la carte Coreco Oculus-200 [Ocu86] qui permet la numérisation d'images d'une résolution de 480 par 512 pixels sur 8 bits. Un schéma du système de vision est montré à la figure 3.5. Une carte de mémoire supplémentaire est également utilisée pour mémoriser des images et ainsi accélérer le traitement d'images.

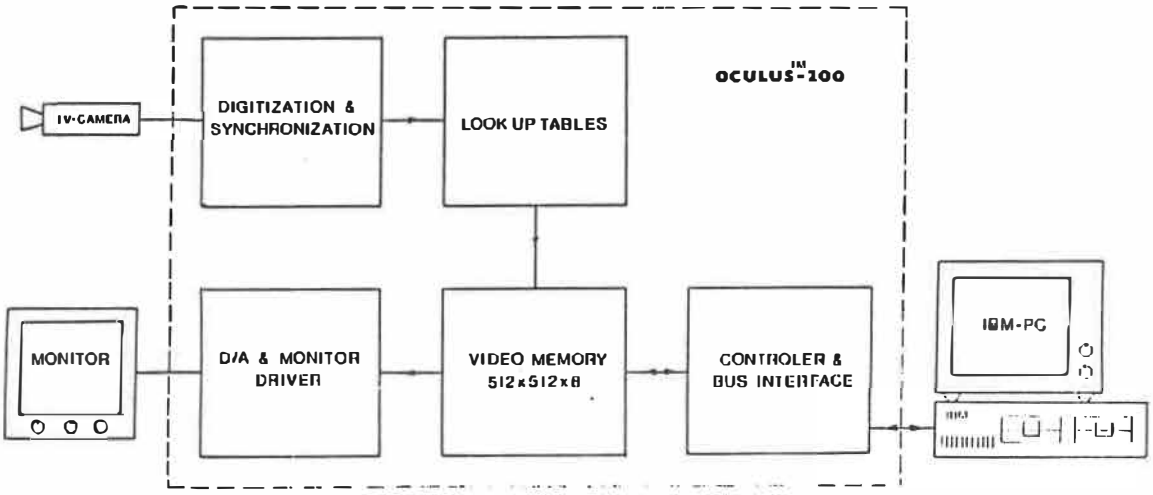



Figure 3.5: Diagramme fonctionnel du système de vision. Tirée de [Ocu86].

### 3.3.4 Capteur tactile

Le capteur tactile est fixé à l'extrémité du robot dans la pince de ce dernier. Il s'agit d'un capteur de type ponctuel constitué tout simplement d'un interrupteur de type bipolaire. Dans le cas où le capteur touche la surface d'une roche, l'interrupteur se ferme; dans le cas contraire, il est ouvert. Il est possible de connaître son état par l'entremise d'un convertisseur analogique / numérique de la carte Lab Master. Le capteur est montré à la figure 3.6. Le capteur utilisé est similaire au marteau d'un brise-roches étant donné que le poussoir de l'interrupteur peut, comme la pointe d'un marteau, s'enfoncer légèrement lors d'un contact avec la roche. Cet enfoncement détermine donc la présence d'un contact.

## 3.4 Composantes logicielles du banc d'essai

Le logiciel développé est constitué principalement des deux fonctions décrites ci-haut: c'est-à-dire l'analyse d'images et l'inspection tactile. L'exécution de chacune

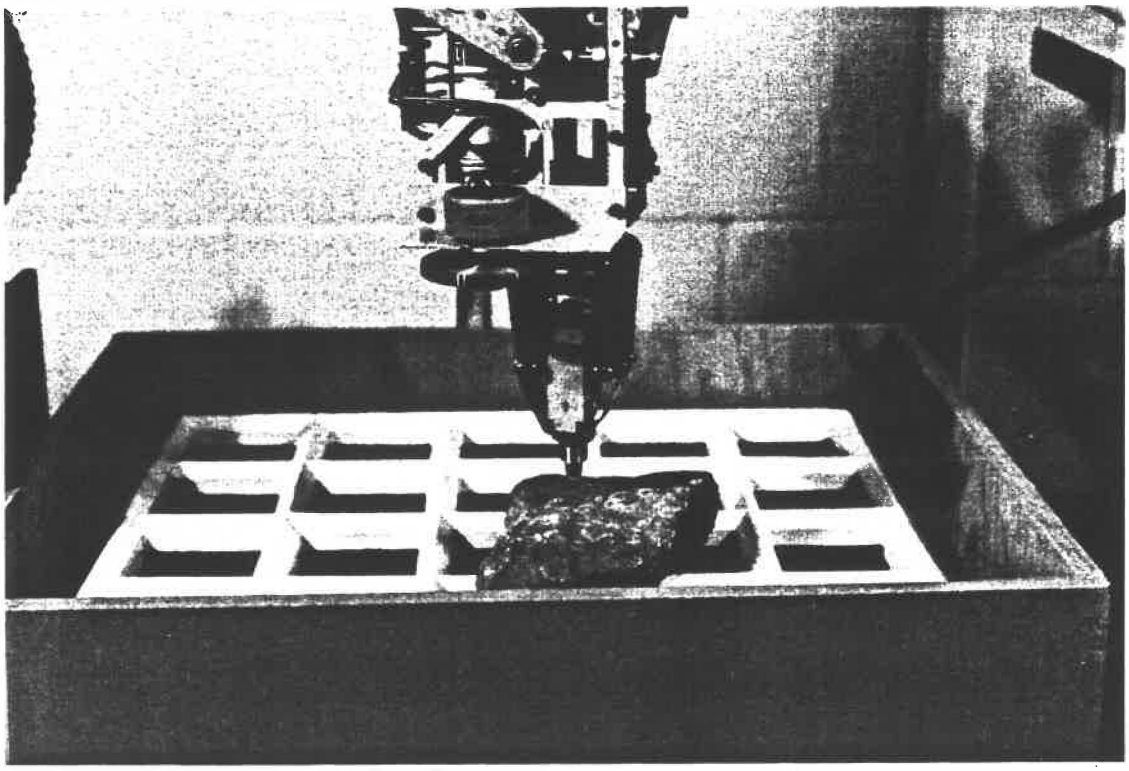


Figure 3.6: Capteur à contact

de ces fonctions doit toutefois se faire en deux phases. On retrouve tout d'abord une phase de pré-traitement ou d'initialisation et dans un deuxième temps une phase de traitement proprement dite (c.f. figure 3.7). La phase d'initialisation est généralement faite une seule fois ou dans des cas précis à la suite d'une demande de l'usager. La deuxième phase peut être répétée à volontée: à toutes les fois qu'il est nécessaire de connaître l'état du grizzly, à savoir si des roches sont bloquées à sa surface et qu'on désire connaître les caractéristiques de ces roches. Les tâches effectuées par la phase d'initialisation de chacune des deux fonctions sont présentées dans le tableau 3.1.

La plupart des tâches décrites au tableau 3.1 exigent finalement peu de traitement, elles ne sont donc pas décrites davantage, à l'exception de celles qui font référence à une section où elles y seront expliquées. Notons que l'extraction des coordonnées du grizzly est effectué par traitement d'images car elle n'a pas recours à une intervention

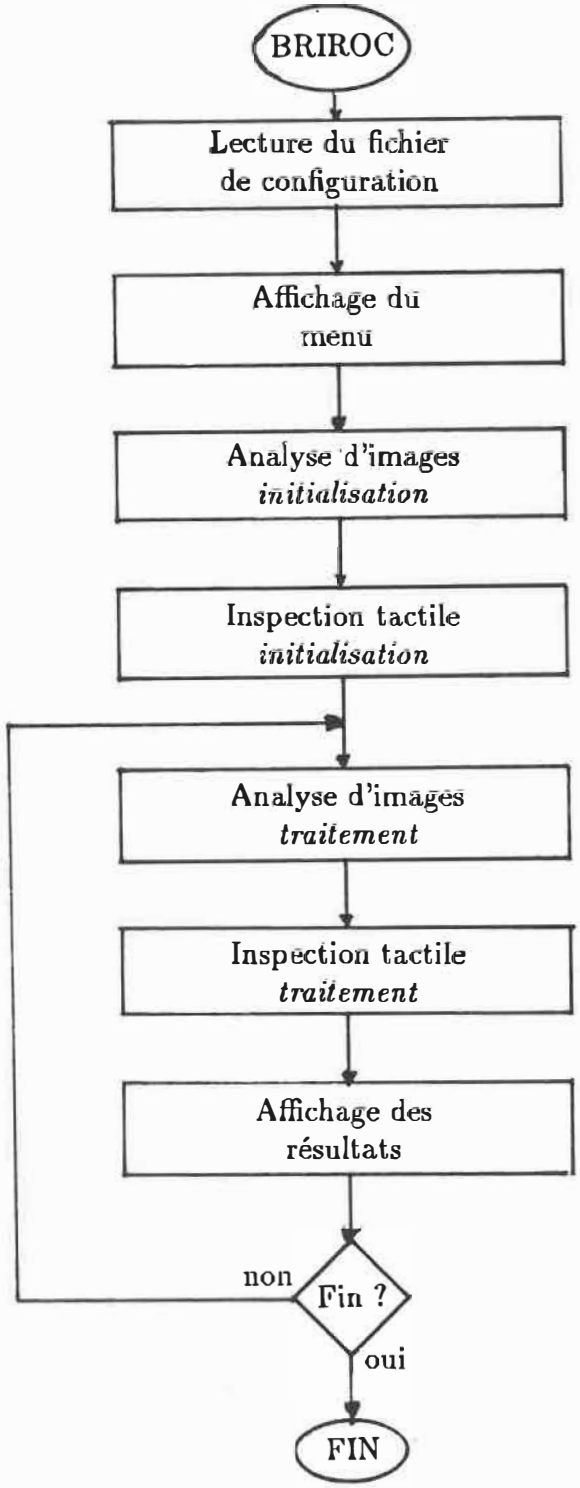



Figure 3.7: Diagramme simplifié du programme BRIROC

| Composantes | Tâches de la phase d'initialisation |
|---|---|
| Traitement d'images | - Initialisation de la carte Oculus<br>- Ajustement des paramètres du traitement d'images<br>- Ajustement de la fenêtre de travail (sect. 4.2.1.1)<br>- Extraction des coordonnées du grizzly (sect. 4.2.1.1)<br>- Mise en mémoire du grizzly sans roche (sect. 4.2.1.2)<br>- Calcul des paramètres du traitement d'images |
| Inspection tactile | - Ajustement des paramètres de l'inspection tactile<br>- Calcul des paramètres de l'inspection tactile<br>- Initialisation du lien RS-232<br>- Initialisation du Rhino |

Tableau 3.1: Tâches de la phase d'initialisation

de l'usager. Il faut préciser de plus que pour interfacer la carte Oculus, nous avons utilisé les fonctions de la librairie Gray [Gra86] qui a été développée pour cette carte.

Parmi les autres tâches du programme développé, une concerne la lecture des paramètres par défaut du programme qui est en fait la lecture du fichier de configuration. Cette tâche est effectuée dès le lancement du programme. Certains paramètres peuvent être changés lors des phases d'initialisation de chacune des deux fonctions. Une dernière tâche concerne l'affichage des résultats. Parmi ces résultats, on retouve des résultats numériques, qui indiquent le nombre de roches sur le grizzly et l'aire des roches. On retrouve également les résultats du système de vision: le contour des roches est tracé sur le moniteur du système de vision. De plus, une reconstitution des roches est montrée sur le moniteur de l'ordinateur. Une librairie de fonctions graphiques [Gra88] a été utilisée pour bâtir cette reconstruction.

Le logiciel pour l'expérimentation a été développé en langage C. Le programme créé se nomme BRIROC. Un argument est requis lors de l'appel du programme. Cet argument est le nom du fichier de configuration qui contient les valeurs par défaut des paramètres du programme. La figure 3.8 montre le menu principal du programme.

Le programme exige l'intervention de l'utilisateur pour lancer l'exécution de cha-

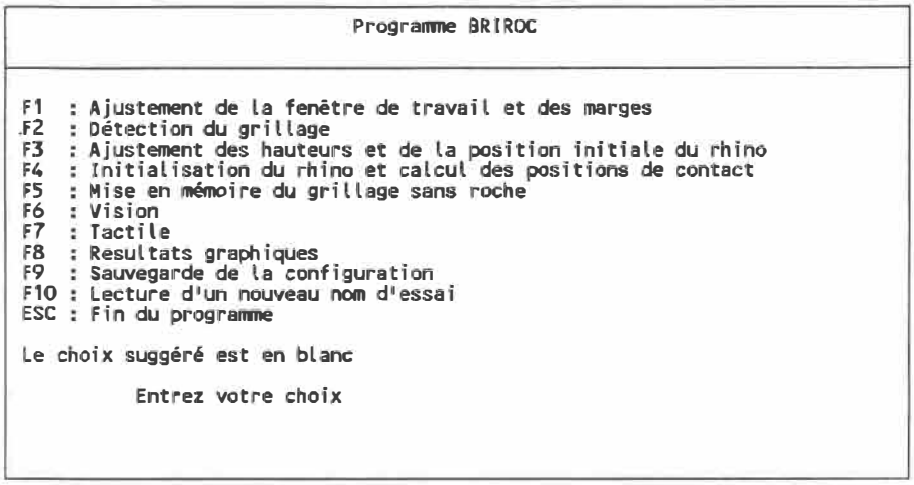



Figure 3.8: Menu principal du programme BRIROC

cune des tâches du programme. En effet il revient à l'usager de déterminer, par exemple, quand il faut lancer une nouvelle analyse de l'image (il s'agit de la fonction *vision* dans le menu) et quand il faut enclencher l'inspection tactile (fonction *tactile*). Il en est de même pour les tâches d'initialisation qui peuvent être reprises à la demande de l'usager. Le programme pourrait être modifié pour qu'il soit entièrement automatique en autant que des conditions de sécurité puissent être prises pour éviter tout problème lors de l'exécution.

## 3.5 Représentation du banc d'essai

### 3.5.1 Assignation des référentiels

Pour modéliser le banc d'essai, nous avons recours à des référentiels, ou systèmes de coordonnées, qui sont associés aux principales composantes du banc d'essai. La figure 3.9 montre l'assignation des principaux référentiels. Ainsi on retrouve un référentiel fixé à un coin du grizzly et à sa surface. Celui-ci est le référentiel de base auquel les autres composantes se refèrent. Ce référentiel est nommé référentiel du *grizzly*, $\{G\}$. Un référentiel est associé à la *base du robot*, $\{BR\}$, tandis qu'un autre

correspond à *l'extrémité du robot*, $\{ER\}$. Au *capteur tactile* est fixé le référentiel $\{T\}$. De plus le référentiel *image* $\{I\}$ est joint à l'image en provenance de la caméra. Ce dernier référentiel est un système de coordonnées à deux dimensions.

Des référentiels intermédiaires sont également utilisés pour décrire des transformations complexes dans les cas où il faut passer du référentiel $\{I\}$ à $\{G\}$ ainsi que de $\{ER\}$ à $\{BR\}$. Ceux-ci seront décrits au chapitre 5.

La connaissance des transformations entre les référentiels permet des transferts faciles d'informations d'une composante du banc d'essai à l'autre.

### 3.5.2 Extraction de l'information

L'information extraite sur les roches et sur le grizzly est décrite dans différents référentiels. Ainsi le référentiel $\{I\}$ permet la description du contours des roches, des coordonnées des parties (trous et barres) du grizzly et les coordonnées d'un certain nombre de points caractéristiques où l'information de hauteur sera recherchée. Ces points sont nommés *points de recherche.* Les coordonnées de ces points sont fonction du grizzly tel que montré à la figure 3.10. Pour trouver les points de recherche d'une roche, il suffit de trouver parmi les points de recherche du grizzly ceux qui se trouvent à l'intérieur du contour de la roche.

Les coordonnées $(x, y)$ de ces points sont éventuellement calculées dans le référentiel du grizzly, $\{G\}$. De cette façon, on obtient les coordonnées vers lequel le robot est déplacé. La hauteur du point de recherche dans $\{G\}$ est trouvée en fonction de la position du poussoir dans le référentiel du capteur tactile, $\{T\}$. Les points trouvés sont regroupés trois par trois selon le patron de la figure 3.11. Des plans de roches sont ainsi définis et peuvent permettre de connaître de façon approximative la surface de la roche.

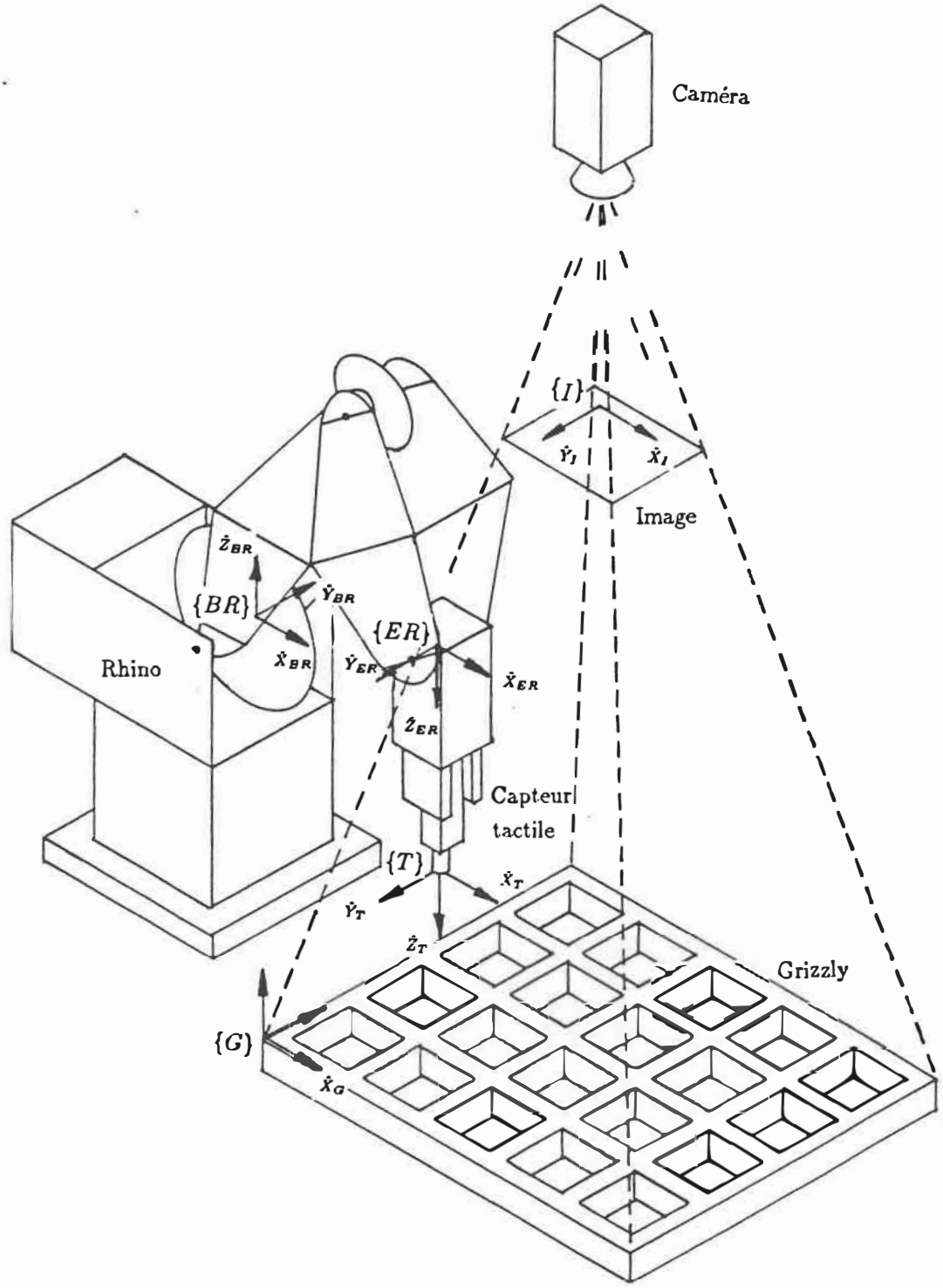



Figure 3.9: Assignation des référentiels aux principales composantes du banc d'essai

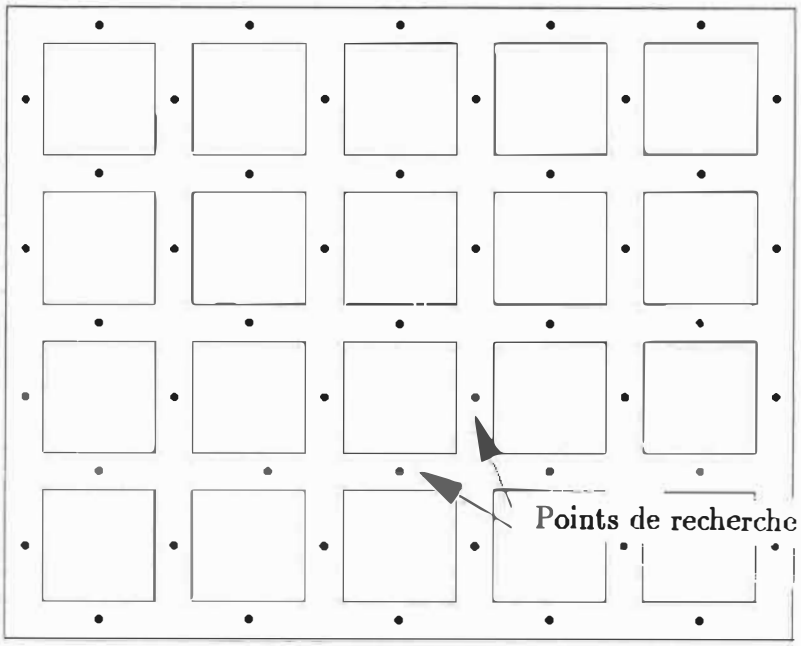



Figure 3.10: Points de recherche sur le grizzly

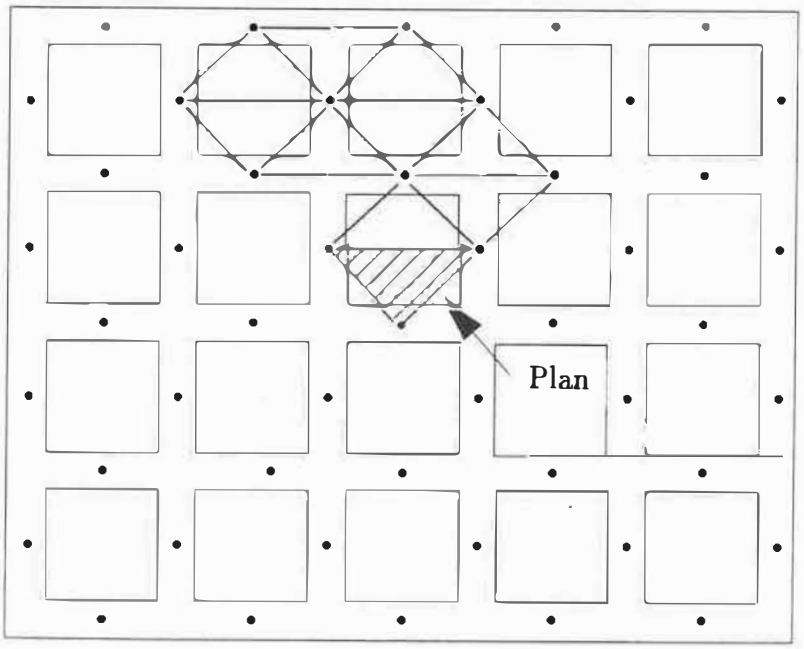



Figure 3.11: Définition des plans à partir des points de recherche

## 3.6 Conclusion

Seule l'expérimentation peut nous permettre d'étudier les besoins de l'automatisation d'un brise-roches et d'évaluer les méthodes vues au chapitre précédent. C'est pourquoi un banc d'essai a été développé en laboratoire. Celui-ci est composé d'un grizzly, du robot Rhino XR-1, d'un système de vision et d'un capteur tactile. Un programme a été développé et celui-ci est constitué de deux fonctions. La première, l'analyse des images d'un système de vision passive, permet de connaître le nombre de roches et leur contour. La deuxième est l'inspection tactile, par laquelle la hauteur des roches en certains points caractéristiques est extraite. Le programme développé permet une automatisation partielle puisque l'usager est requis pour superviser le système en cas de problèmes et lors de l'initialisation.

Des référentiels sont associés aux principales composantes du banc d'essai: au grizzly, à la base et à l'extrémité du robot, à l'image du système de vision et au capteur tactile. Le référentiel de l'image contient des informations relatives aux roches et au grillage. Certains points caractéristiques des roches, les points de recherche, sont calculés dans le référentiel du grizzly et permettent de connaître les mouvements nécessaires au robot pour se rendre jusqu'à la roche. Lorsque le capteur tactile touche la roche, les coordonnées de ce point peuvent être calculées toujours par rapport au grizzly et ainsi évaluer, en regroupant ces points, la surface de la roche.

# Chapitre 4

# Analyse d'images pour la détection des roches

Le but de ce présent chapitre est de décrire la partie du projet qui concerne le traitement d'images. Dans un premier temps, nous décrirons globalement l'algorithme de traitement d'images et les principales fonctions qui constituent celui-ci. Cet algorithme traite des images de la scène éclairée par un éclairage diffus. Des exemples de résultats obtenus seront pas la suite présentés. Une analyse de ces résultats suivra afin de faire ressortir les caractéristiques de l'algorithme et des perspectives éventuelles.

## 4.1 Objectifs de l'algorithme

Le but de l'algorithme de traitement d'images est de faire ressortir les caractéristiques suivantes:

- Coordonnées des barres et des trous du grizzly
- Nombre de roches ou amas de roches
- Contour des roches ou amas de roches

- Aire des roches ou amas de roches
- Coordonnées dans le plan image des points de recherche $\left({}^{I}P_{R_x}, {}^{I}P_{R_y}\right)$

## 4.2 Description de l'algorithme

Comme il fut spécifié au chapitre précédent, le traitement d'images dans son ensemble s'effectue en deux étapes majeures: 1° une initialisation ou un pré-traitement effectuée à partir d'images du grizzly sans roche et 2° le traitement de l'image du grizzly avec des roches. Cette dernière étape sera répétée tant qu'il sera nécessaire d'obtenir des informations sur des roches potentiellement bloquées sur le grillage.

### 4.2.1 Initialisation

L'étape d'initialisation ou de pré-traitement effectue les tâches suivantes:

#### 4.2.1.1 Extraction des coordonnées du grizzly

Cette tâche permettra de connaître les coordonnées des trous du grillage de même que les coordonnées des barres du grillage dans le référentiel de l'image, $\{I\}$. Pour réaliser cette tâche, les fonctions suivantes sont réalisées:

**Ajustement de la fenêtre de travail:** Cette tâche requiert l'intervention de l'opérateur. Celui-ci doit ajuster la fenêtre de travail de façon à ce que le programme ne traite que la partie de l'image qui constitue le grizzly.

Cette étape a également un deuxième objectif qui est l'alignement des référentiels. En ajustant la *fenêtre de travail* aux limites du grizzly, l'usager s'assurera que le référentiel de l'image, $\{I\}$, correspond au côté du grizzly. Cet ajustement

a une influence directe sur le facteur de conversion de l'image ou le rapport du nombre de pixels sur les dimensions réelles. Les détails relatifs au facteur de conversion sont donnés à la section 5.2.2. Il est à noter que les dimensions réelles du grizzly prises dans le référentiel $\{G\}$ sont lues dans le fichier de configuration.

**Prise d'une image binaire et segmentation:** En se basant sur les caractéristiques du grizzly utilisé dans le cadre de ce projet, il est relativement simple de distinguer les barres du grizzly des trous de celui-ci. En effet l'image du grizzly sur lequel aucune roche n'est déposée apparaîtra sous forme bimodale, i.e. une partie blanche qui constitue le grizzly en soi et une partie noire qui constitue les trous du grizzly. Le seuillage de l'image est tout à fait approprié pour ce type d'images. Une image seuillée $I_s(x, y)$ est définie, à partir de l'image originale $I_o(x, y)$, de la manière suivante:

$$I_s(x,y) = \begin{cases} 127 & \text{si } I_o(x,y) > S \\ 0 & \text{si } I_o(x,y) \leq S \end{cases} \tag{4.1}$$

où S est le seuil.

Le seuil est trouvé sur la base de la méthode du pourcentage: le seuil est calculé selon le pourcentage ($p$) de l'espace occupé par les trous relativement à l'espace total du grizzly. Ce pourcentage est connu dans le cas du grizzly. Le seuil est donc défini comme étant le plus haut niveau de gris qui permet à $p$ % des pixels de l'image d'être considérés comme faisant partie des trous dans l'image seuillée. Avec cette valeur de seuil, une image binaire est prise et les trous sont donc facilement identifiables.

**Identification des parties du grizzly:** On distingue trois parties au grizzly tel que montré à la figure 4.1 :

1. les trous du grizzly
2. les barres horizontales du grizzly

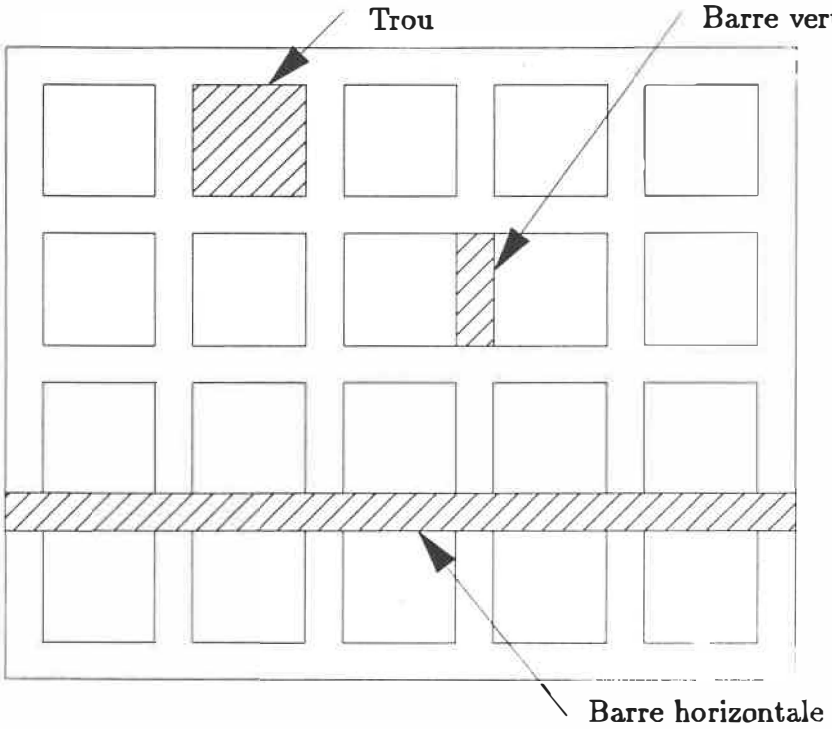



Figure 4.1: Parties du grizzly

3. les barres verticales du grizzly

Cette distinction est importante car la zone de l'image vis-à-vis d'un trou possède des caractérisques fort différentes de la zone vis-à-vis d'une barre du grizzly. Des traitements distincts sont effectués dans chacune de ces zones. Les barres verticales et les barres horizontales possèdent évidemment les mêmes caractéristiques. Toutefois elles sont considérées comme des parties distinctes car on désire traiter uniquement des zones de l'image qui sont rectangulaires; les procédures de traitement d'images seront beaucoup plus simples de cette façon.

**Calculs des coordonnées des parties du grizzly:** La détection des trous étant effectuée, les coordonnées des trous du grizzly peuvent maintenant être déduites. Il en sera de même pour les barres horizontales et verticales. Ces coordonnées sont identifiées dans le référentiel $\{I\}$ et se calculent en pixels. Ces coordonnées

serviront également à calculer les coordonnées des points de recherche montrés à la figure 3.10.

#### 4.2.1.2 Mise en mémoire de l'image du grizzly sans roche

Cette tâche consiste à mémoriser l'image du grizzly sans roche. Cette image servira de référence dans le traitement éventuel et toute nouvelle image sera comparée avec celle-ci dans le but de détecter des roches sur le grizzly.

### 4.2.2 Traitement de l'image du grizzly avec des roches

L'algorithme utilisé pour la détection et la localisation des roches est basé sur l'extraction des régions. Cette approche vise à extraire de l'image des régions qui possèdent une certaine homogénéité en ce qui a trait aux niveaux de gris. Ces régions sont évidemment les roches ou amas de roches bloqués sur le grizzly. Toutefois dans le cas qui nous intéresse ici, ces régions ne peuvent être identifiées de la même façon selon qu'elles se trouvent sur les barres du grizzly ou vis-à-vis des trous du grizzly. En effet, dans le cas où une fraction d'une roche est située sur une barre du grizzly, l'ensemble des pixels de cette fraction de roche, qui constituent la région à identifier, possèdent une intensité lumineuse inférieure aux pixels des barres du grizzly. Il en est tout autrement dans le cas où la fraction de la roche est située vis-à-vis d'un trou du grizzly; les pixels de la roche transmettent une intensité supérieure aux pixels des trous. Cette caractérisque fait ressortir les difficultés inhérentes au fait d'extraire les roches d'une image dont le fond est un grillage qui possède des parties distinctes.

Dans le développement de l'algorithme de détection des roches, nous avons tenu compte du fait que l'image du grizzly sans roche est connue et qu'elle peut être mémorisée, tel que nous l'avons vu à la section précédente. Ainsi le principe de l'algorithme

consiste à comparer l'image à traiter à une image du grizzly sans roche. Toute différence importante entre les deux images permettra d'identifier la présence de roches sur le grizzly. Les régions seront ainsi extraites beaucoup plus facilement. Cette détection des régions sera faite de façon distincte pour les trous du grizzly et pour les barres du grizzly étant donné leurs différentes caractéristiques. Par la suite, ces différentes régions seront regroupées pour obtenir une roche ou un amas de roches complet.

La figure figure 4.2 illustre le schéma de l'algorithme qui permettra de détecter les roches. Chacune des différentes étapes de l'algorithme sera décrite ci-dessous.

#### 4.2.2.1 Soustraction

Le module effectue la soustraction pixel par pixel de l'image initiale à traiter $I_i(x, y)$ avec l'image sans roche $I_{sr}(x, y)$. L'image résultante $I_r(x, y)$ s'obtient ainsi:

$$I_r(x, y) = |I_i(x, y) - I_{sr}(x, y)| \tag{4.2}$$

#### 4.2.2.2 Segmentation de l'image résultante

L'analyse de l'image résultante de la soustraction amène les conclusions qui suivent. Si pour un pixel donné, le résultat de la différence des images dépasse un seuil pré-fixé, on peut conclure que ce pixel peut fort probablement faire partie d'une région qui est une fraction de la roche si évidemment le bruit des images est faible et que les conditions d'éclairage d'une image à l'autre ont peu changé. Dans le cas contraire, on concluera qu'il n'y a pas de roches à cet endroit précis. Étant donné les caractéristiques des parties du grizzly décrites ci-haut, deux valeurs de seuil doivent être établies, une valeur pour la partie de l'image qui concerne les trous du

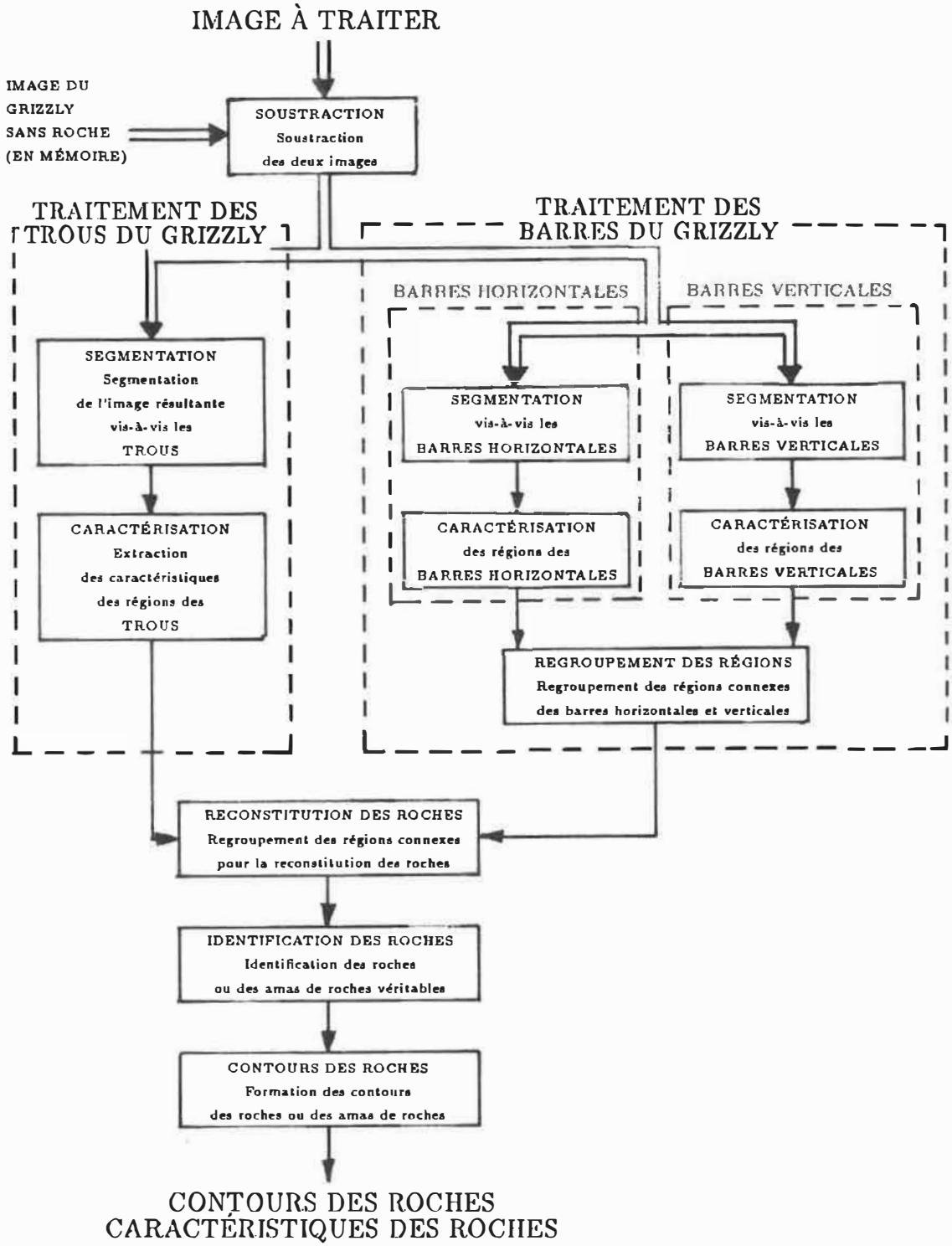



Figure 4.2: Algorithme de traitement d'images

grizzly ($S_T$) et une autre pour les barres du grizzly ($S_B$). Ces valeurs sont déterminées expérimentalement.

Il s'agit d'une approche relativement simple, mais qui donne de bons résultats dans le cadre d'une expérimentation en laboratoire où les conditions sont bien contrôlées. De plus amples détails sur ces résultats seront décrits dans la section 4.4.

Il faut noter toutefois qu'un problème se pose lorsqu'on analyse les pixels situés dans la zone à la limite des trous et des barres du grizzly (voir figure 4.3). À cet endroit, on retrouve de l'ombrage et une réflectance très variable; ce qui fait que les résultats de la soustraction ne peuvent être interprétés avec autant de précision que dans les autres zones de l'image. En effet la brillance dans cette zone peut être similaire, soit à la brillance des points d'une roche, soit à celle des points du grizzly. Dans ce cas le résultat de la soustraction ne peut entraîner de conclusions valables. Étant donné cette situation les zones concernées ne sont donc pas inclues dans la segmentation de l'image. Les trous et les barres sont donc amputés de cette zone dont la largeur est déterminée expérimentalement. Les zones traitées sont montrées à la figure 4.4.

La segmentation de l'image s'effectue de façon distincte vis-à-vis des trous et vis-à-vis des barres, tant horizontales que verticales. Dans chacune de ces trois parties, les pixels susceptibles de faire partie d'une roche sont identifiés comme tels de même que les pixels dont la soustraction donne une valeur près de zéro sont marqués comme n'étant pas des roches.

#### 4.2.2.3 Caractérisation des régions

Cette étape vise à représenter de façon plus pratique les pixels sujets à faire partie des roches, à identifier les régions trouvées et à caractériser ces régions.

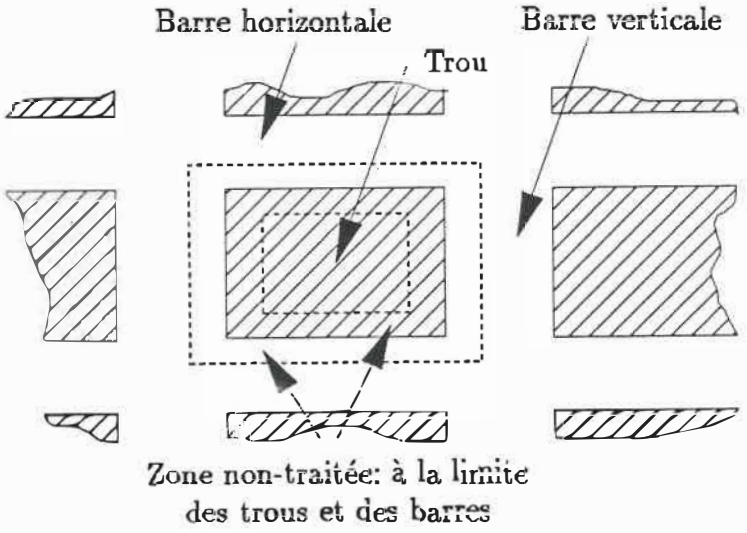



Figure 4.3: Zone non-traitée de l'image

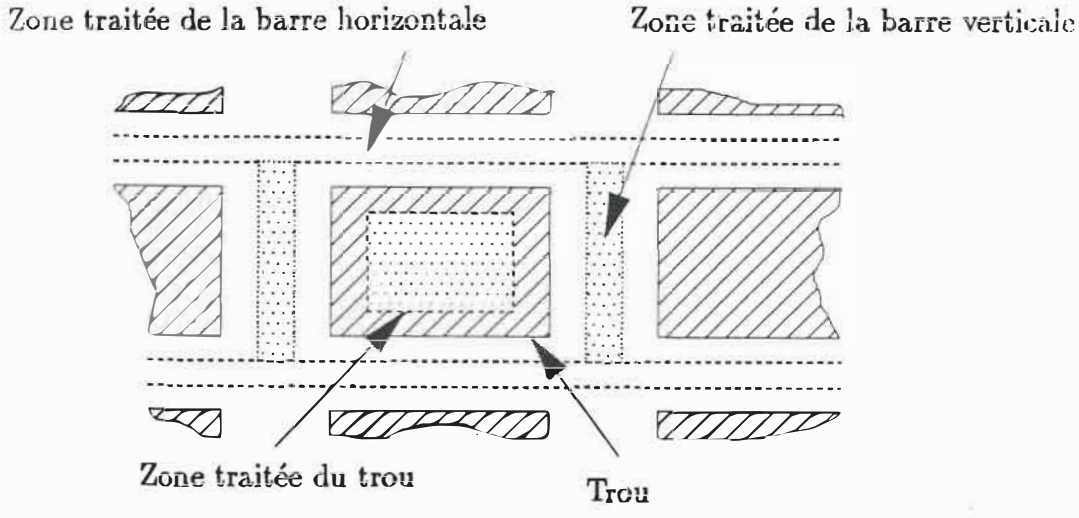



Figure 4.4: Zones traitées de l'image

Tout d'abord au niveau de la représentation, le résultat de la segmentation est exprimé sous forme de "run-length" [RK82] [Hor86]. Cette méthode exploite le fait que le long de chaque ligne de l'image - ou de la partie de l'image dans notre cas - on retouve habituellement une longue série ("run") de pixels appartenant à la région. Au lieu de mémoriser chaque pixel de la ligne, on mémorise le début et la fin de la série de pixels ainsi que le numéro de la ligne. Cette approche permet de réduire de beaucoup l'espace mémoire nécessaire pour conserver l'information sur les fractions de roches. Toutefois le but premier de cette approche est de représenter les régions trouvées sous une forme concise, ordonnée et simple à utiliser.

Dans chacune des parties du grizzly, chaque ligne est analysée et des run-lengths sont créés à toutes les fois qu'est trouvée une série de pixels identifiés comme étant susceptibles de faire partie d'une roche. Les séries de pixels sont regroupées selon leurs relations avec leurs voisins, i.e. selon qu'elles sont connexes et qu'elles appartiennent ou non à la même région. À la fin de cette étape, on retouve un certain nombre de régions qui correspondent à des fractions de roches dans chacune des parties du grizzly. Chacune des régions des parties est numérotée. Les séries de pixels sont de plus identifiées du numéro de la région auxquelles elles appartiennent. Il faut noter que dans chaque partie du grizzly, on peut retrouver plus d'une région pouvant de plus appartenir à des roches différentes; il est donc essentiel de distinguer à quelle région chaque série appartient.

La représentation des régions étant établies de même que leur identification, il faut s'intéresser à la caractérisation des régions détectées. Cette étape vise à faire ressortir les caractéristiques suivantes:

**Contact avec les côtés des parties:** Pour chaque région détectée, on va vérifier si cette région touche à la limite de la partie dans laquelle la région se trouve. On va extraire tous les points où la région touche au côté de la partie. L'ensemble

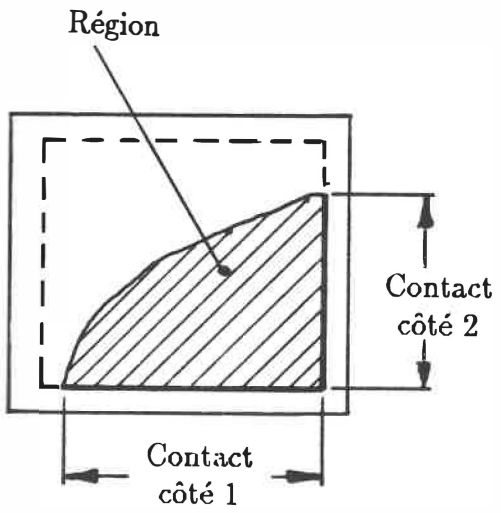



Figure 4.5: Contact des régions avec les côtés des parties

de ces points sur chacun des côtés de la partie est appelé le contact entre la région et le côté de la partie. La figure 4.5 montre une région touchant aux limites de la partie ainsi que les informations extraites dans ce cas précis. Ces informations permettront de déterminer très rapidement quelles régions ont besoin d'être regroupées ensemble pour former une roche ou un tas de roches.

**Aire:** L'aire des régions est calculée et cette information sera utilisée pour calculer l'aire totale de la roche. Il faut noter également que les régions de faible importance ou celles qui ne touchent pas aux limites des parties sont rejetées n'étant pas significatives, étant généralement causées par du bruit dans l'image.

#### 4.2.2.4 Regroupement des régions des barres

Les barres horizontales et les barres verticales du grizzly ont jusqu'à maintenant été traitées de façon séparées. Ce phénomène ne visait qu'à simplifier le traitement en se limitant à des zones rectangulaires.

Afin de décrire réellement la situation des fractions de roche situées sur les barres du grizzly, on regroupe les régions connexes des barres horizontales et verticales. Ce regroupement est effectué en se servant de l'information des contacts trouvée précédemment. À la figure 4.6, on voit des régions, une sur une barre horizontale et quatre sur des barres verticales, qui doivent être regroupées étant donné qu'elles sont vis-à-vis l'une de l'autre. Par la suite un même numéro est associé aux régions groupées et l'aire de la région totale est ajustée en conséquence. En conclusion, à la fin de cette étape, on se retrouve avec un certain nombre de régions sur les barres du grizzly qui seront groupées à la prochaine étape avec les régions des trous.

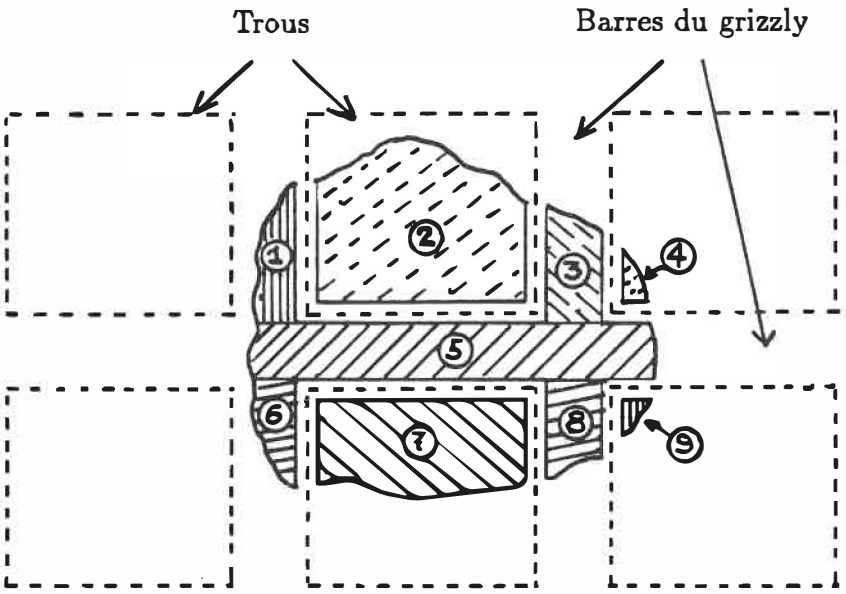
#### 4.2.2.5 Reconstitution des roches

Une roche ou un amas de roches est généralement constitué de plusieurs régions situées dans les trous et sur les barres. Dans cette étape on regroupera les régions de parties adjacentes, c'est-à-dire un trou et les morceaux des barres autour de ce trou. Pour que deux régions puissent être éventuellement regroupées, elles doivent au moins toucher au bord de leur partie respective et être vis-à-vis l'une de l'autre. Notons également que la longueur du contact doit être au moins supérieure à une valeur minimale pré-fixée (de l'ordre de quelques pixels).

Lorsque deux régions sont groupées, leur identification devient commune de même que toutes les régions qui auraient déjà été associées à une de ces régions.

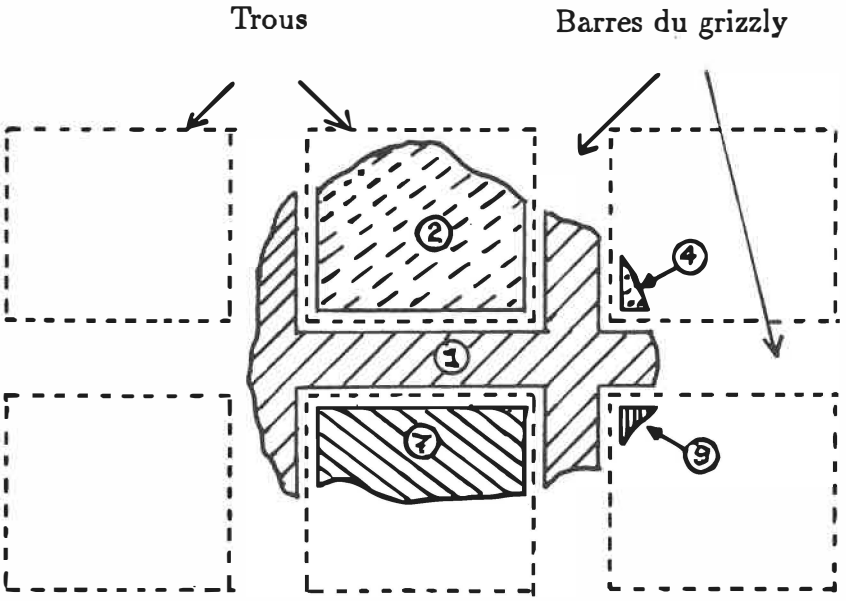
Trois phases permettent d'effectuer, s'il y a lieu, le regroupement complet des régions. À l'intérieur de chaque phase, des tests sont effectués sur les régions, deux par deux, dans le but de vérifier la possibilité que les régions puissent être regroupées.

1. Les régions dont la longueur de contact entre elles est supérieure à la dimension d'un côté du trou sont regroupées. Une fois que toutes les possibilités de re-




Regroupement des régions: 1 et 5, 3 et 5, 5 et 6, 5 et 8

a) Avant le regroupement




b) Après le regroupement

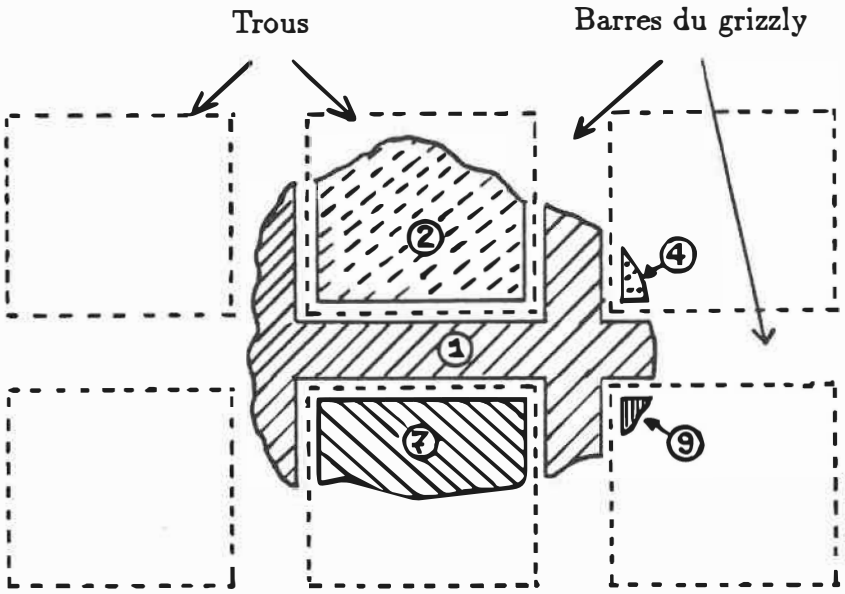
Figure 4.6: Regroupement de régions connexes sur les barres du grizzly

groupement ont été effectées, l'aire des régions groupées est mise à jour. Cette phase a pour but de regrouper les régions dont l'association ne fait aucun doute. En effet seules les régions dont la longueur du contact est passablement élevée pourront ainsi être groupées. La figure 4.7 montre le regroupement des régions avant et après cette première phase.

2. On peut maintenant regrouper une région non encore groupée avec une autre région de même type ou encore avec les régions nouvellement créées à la phase précédente. Le regroupement peut se faire si les régions respectent les conditions suivantes: l'aire d'une des deux régions à grouper est faible et chacune des régions n'a pas d'autres possibilités de regroupement. L'aire des régions touchées est ajustée à la fin de cette phase. Cette phase vise le regroupement de petits morceaux de roches à de grandes régions, tel que montré à la figure 4.8.

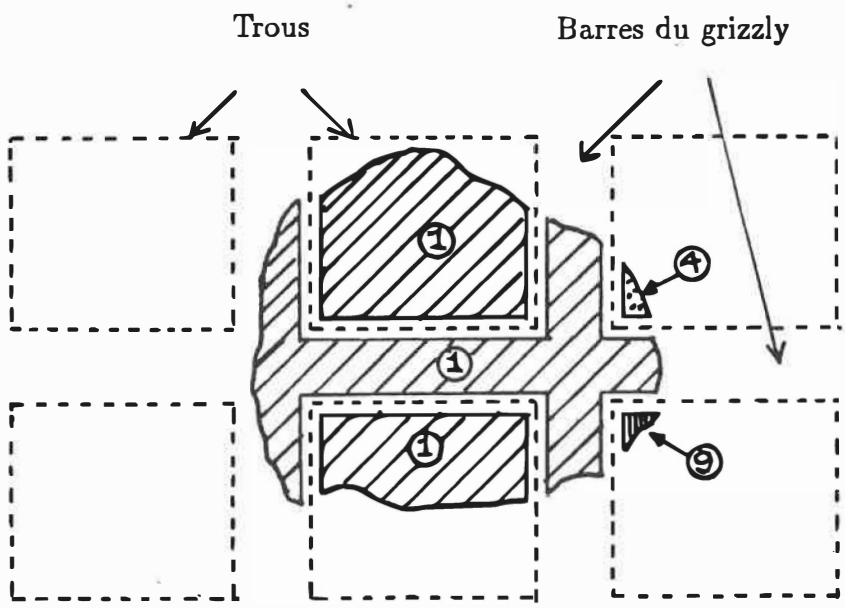
3. La dernière phase permet de regrouper ensemble des régions non encore groupées, ou des régions nouvellement créées, ou une combinaison des deux. Pour une région donnée, on la regroupe s'il y a lieu à la région qui fournit la plus grande longueur de contact et ce si une des deux régions à grouper possède une aire de faible importance. L'aire des régions communes ainsi créées est réajustée après chaque regroupement. Cette phase, tout en essayant de grouper tout ce qui possible de grouper, empêchera l'association de vastes régions dont la longueur du contact est faible. Concrètement deux grandes roches ne seront pas groupées ensemble si elles ont un contact faible entre elles. Un exemple de cette situation sera montré à la section suivante.

Les règles décrites ci-haut permettent la reconstitution des roches de façon fort efficace. Des résultats seront présentés à la section suivante.



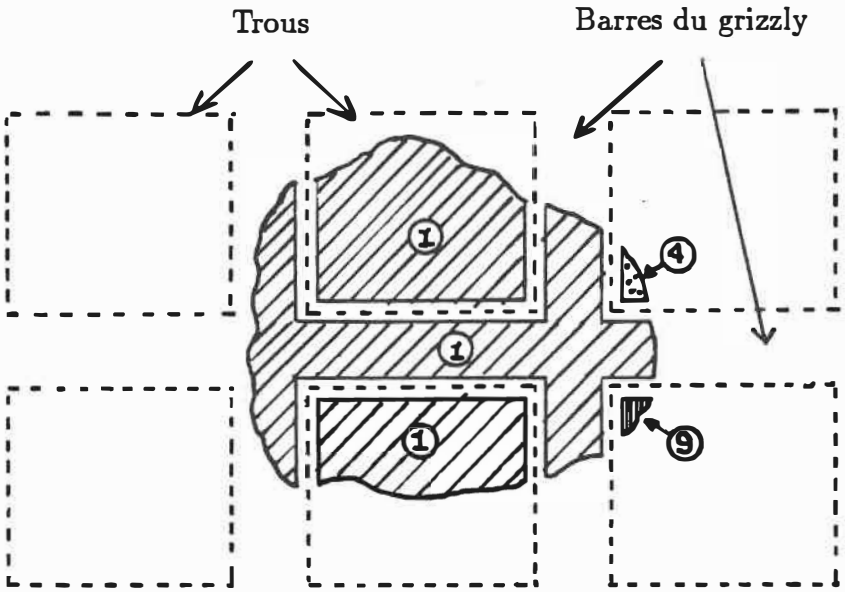

Regroupement des régions: 1 et 2, 1 et 7

a) Avant le regroupement



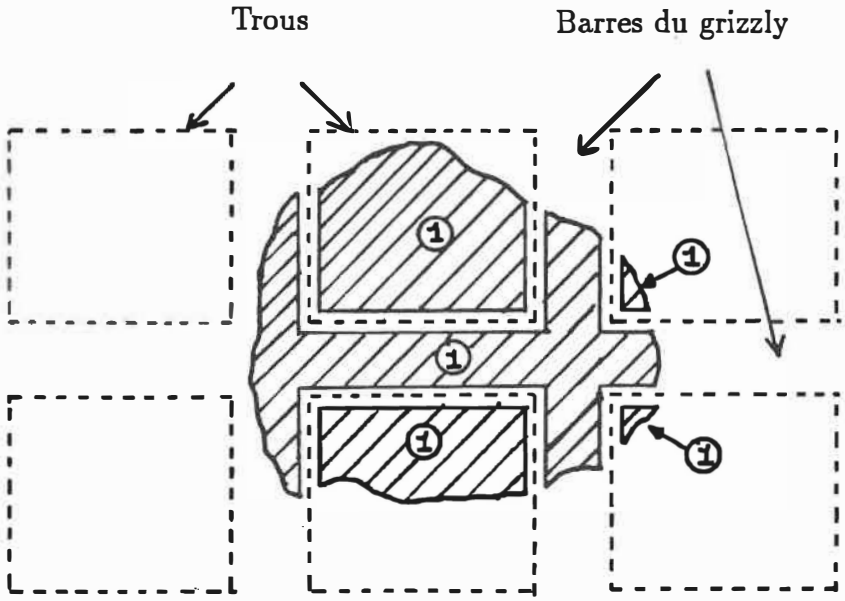

b) Après le regroupement

Figure 4.7: Regroupement de régions connexes selon la première phase




Regroupement des régions: 1 et 4, 1 et 9

a) Avant le regroupement




b) Après le regroupement

Figure 4.8: Regroupement de régions connexes selon la deuxième phase

#### 4.2.2.6 Caractérisation des roches

Jusqu'à maintenant une roche est constituée d'un ensemble de run-lengths issus de régions différentes. Le but de cette étape est de représenter la roche non plus par un ensemble de régions mais sous la forme d'une région unique. L'approche adoptée pour représenter la roche est la même que ce qui fut utilisée dans la caractérisation des régions des parties du grillage (c.f. section 4.2.2.3), i.e. les runs-lengths. Le but de cette étape est de regrouper les run-lengths de plusieurs régions en un nombre réduit. En effet, sur une ligne déterminée, il est possible de trouver plusieurs run-lengths provenant de différentes régions et par le fait même de parties différentes mais constituant une même et unique roche.

La procédure suivie pour ce regroupement est tout d'abord de mettre en ordre de lignes, les run-lengths de toutes les régions de la roche. Un algorithme de tri rapide est utilisé pour ce faire ([HAU87]). Par la suite, ligne par ligne de nouvelles séries sont créées pour remplacer les séries de différentes parties. De plus un remplissage est effectué pour combler les zones non-traitées entre les barres horizontales et verticales lorsque nécessaire. Au contour de la roche, une interpolation est effectuée pour les mêmes raisons. Finalement l'aire totale de la roche est calculée. Si des régions finales ne possèdent pas une aire suffisamment importante, elles seront éliminées. De tels cas se produisent si l'image est affectée d'un niveau de bruit élevé.

#### 4.2.2.7 Contour des roches

L'étape précédente a permis de décrire la roche au complet comme une seule et unique région et sa localisation est entièrement déterminée dans le plan du grizzly. Cette description permet d'identifier, pour chaque ligne de l'image où la roche se situe, le début et la fin de la présence de la roche. Maintenant le but de cette étape est d'obtenir le contour de la roche, c'est-à-dire une série de points ordonnés montrant

les limites de la roche. Le contour n'est utile en fait que pour l'affichage des résultats puisque la roche est déjà définie sous forme de run-lengths. L'algorithme utilisé est décrit dans [Pav78].

## 4.3 Résultats du traitement d'images

Tout d'abord la détection des parties du grizzly sera présentée avant de montrer les résultats exprimant différents cas pouvant survenir dans le cadre de la détection des roches sur le grizzly. Deux cas sont particulièrement intéressants et résument d'ailleurs assez bien cette situation: 1° des roches isolées sont déposées sur le grizzly et 2° un amas de roches obstrue un certain nombre de trous du grizzly.

### 4.3.1 Détection des parties du grizzly

L'initialisation de l'analyse d'images exige l'extraction des coordonnées des différentes parties du grizzly, c'est-à-dire les barres horizontales, les barres verticales et les trous (c.f. section 4.2.1.1). Chacune de ces parties a été amputée d'une certaine zone qui n'est pas traitée pour les raisons évoquées à la section 4.2.2.2. La figure 4.9 montre les zones du grizzly qui seront traitées. Sur cette figure, on peut également voir les coordonnées des points de recherche qui sont marqués d'une croix.

### 4.3.2 Cas des roches isolées

En ce qui concerne le traitement de l'image du grizzly avec des roches, une des situations qui peut survenir, c'est le cas où une ou quelques roches sont déposées sur le grizzly. Les roches sont dites "isolées", par comparaison à un amas, lorsqu'il est possible de les distinguer les unes des autres. Cette distinction est facilement effectuée lorsque des roches sont séparées les unes des autres et ne se touchent pas.

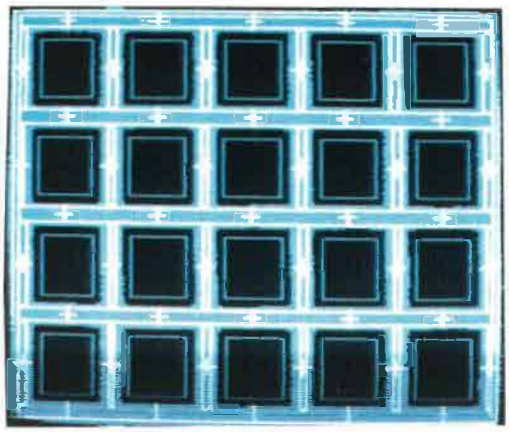


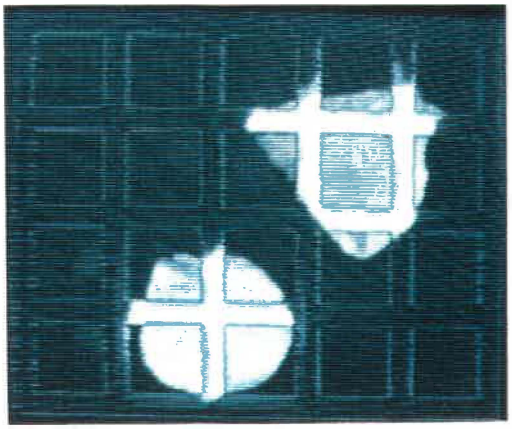
Figure 4.9: Zones traitées et points de recherche du grizzly

Un exemple d'une telle situation est montré à la figure 4.10a. La soustraction de l'image avec des roches de l'image sans roche est reproduite à la figure 4.10b. On peut remarquer que les zones entre les trous et les barres du grizzly ne sont pas significatives de la présence d'une roche. La segmentation de cette image est donc effectuée dans chacune des zones à traiter. Les pixels identifiés comme pouvant faire partie d'une roche sont identifiés en blanc à la figure 4.10c tandis que les pixels dont la soustraction a donné une valeur près de zéro sont noirs. Après la caractérisation des régions et l'élimination des régions non significatives (sans doute générée par du bruit dans les images), on retrouve les étapes de regroupement des régions et de reconstitution des roches. Le résultat obtenu est le contour des deux roches complètes qui est montré à la figure 4.10d. Les croix indiquent les points de recherche de la roche (c.f. section 5.4.1.2).

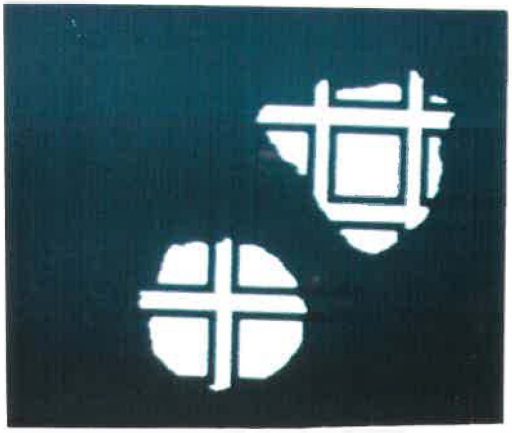
Dans le cas où deux ou plusieurs roches se touchent, le programme considère généralement ces roches comme formant un amas. Toutefois comme il fut expliqué à la troisième phase du regroupement décrit à la section 4.2.2.5, l'algorithme a la possibilté lors du regroupement des régions de ne pas grouper deux grandes régions qui n'ont qu'un faible contact entre elles. Un tel exemple est montré à la figure 4.11a. Il s'agit ici d'un cas particulier car le contact des roches se situe vis-à-vis d'une zone non-traitée,



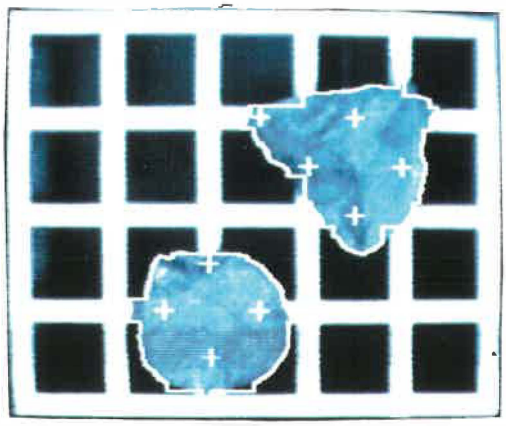
a) Deux roches séparées sur le grizzly.



b) Résultat de la soustraction.



c) Résultat de la segmentation.



d) Contour des roches.
Les points de recherche
sont marqués d'une croix.

Figure 4.10: Différentes étapes relatives au traitement du cas de roches séparées

laissant une interprétation possible lors du regroupement des régions. Les différentes régions trouvées par segmentation (figure 4.11b) sont regroupées progressivement jusqu'au moment où on ne retrouve que deux grandes régions qui correspondent à chacune des roches. Ces deux régions pourraient être regroupées mais comme elles ne possèdent qu'un faible contact, l'algorithme a été conçu de façon à les considérer comme distinctes (figure 4.11c). Dans tous les autres cas, lorsque le contact entre deux roches n'est pas vis-à-vis d'une zone non-traitée, elles forment une seule et même région et sont considérées comme formant un amas.

### 4.3.3 Cas d'un amas de roches

Un exemple d'un amas de roche est montré à la figure 4.12. On peut noter que toutes les régions de la figure 4.12b sont entièrement groupées et que le contour obtenu (figure 4.12c) englobe l'ensemble des roches. Les résultats obtenus ne permettent pas de distinguer individuellement les roches. On remarquera, à cause des effets d'ombrage causés par l'amas de roches, que l'algorithme croit détecter des trous dans l'amoncellement de roches.

## 4.4 Analyse de l'algorithme

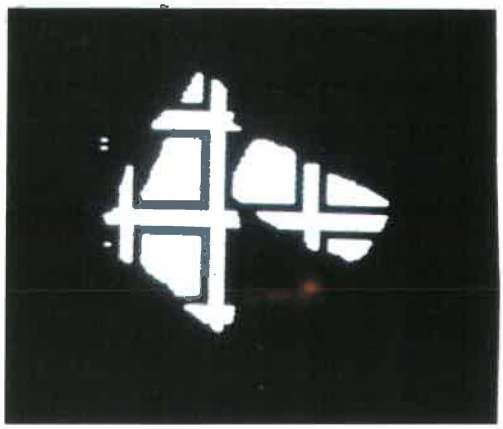
Dans un premier temps, nous relèverons les caractéristiques de l'algorithme et nous étudierons ses performances. Les remarques ainsi générées permettront de tirer des conclusions sur des perspectives éventuelles.

### 4.4.1 Caractéristiques de l'algorithme

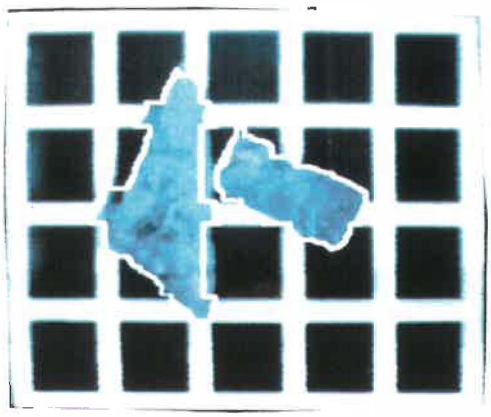
À partir des résultats décrits à la section précédente et selon d'autres essais effectués sur le banc d'essai, nous pouvons maintenant faire ressortir les caractéristiques



a) Deux roches avec un contact entre elles.



b) Résultat de la segmentation.
Il y a contact entre les régions de roches différentes.

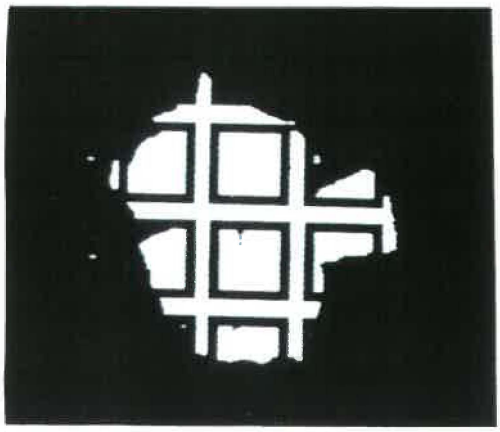


c) Contour des roches.
Les roches ont été séparées par l'algorithme lors du regroupement des régions.

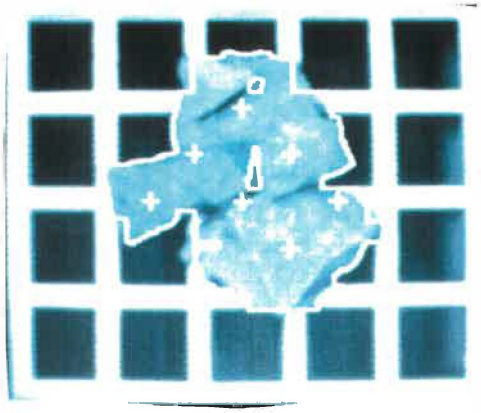
Figure 4.11: Séparation de deux roches effectuée par l'algorithme



a) Un amas de roches sur le grizzly.



b) Résultat de la segmentation.



c) Contour de l'amas de roches.
Les points de recherche
sont marqués d'une croix.

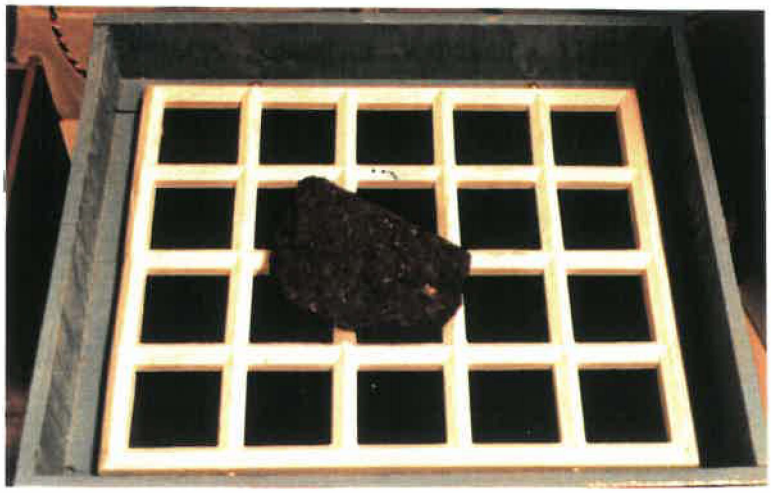
Figure 4.12: Exemple pour un amas de roches

de l'algorithme développé dans le cadre de ce projet et nous pourrons ainsi analyser ses performances.

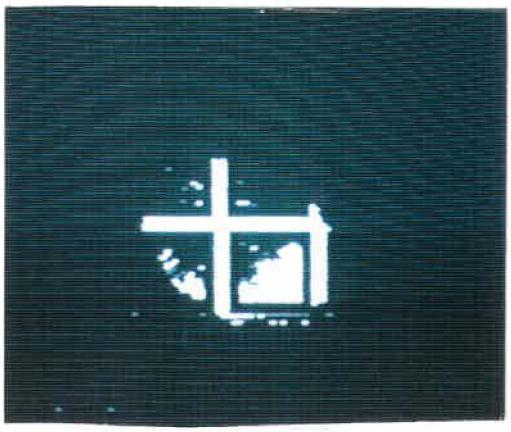
#### 4.4.1.1 Influence de contrastes faibles

La segmentation de l'image, de par sa définition, est dépendante des contrastes de réflectance entre les roches et le fond de l'image, c'est-à-dire le grizzly et le dessous de celui-ci. C'est particulièrement vrai pour l'approche utilisée dans ce projet où les pixels d'une image avec des roches sont directement comparés (soustraction et seuillage) aux pixels correspondant dans l'image sans roche. Advenant le cas où les contrastes entre les différentes composantes des deux images ne sont pas marqués, des problèmes peuvent survenir. C'est le cas de l'exemple montré à la figure 4.13 où une roche noire est déposée sur la surface du grizzly. Les résultats obtenus sont loin de correspondre à la réalité. De la même façon, la figure 4.14 illustre le cas d'une roche presque blanche, donc de réflectance semblable à celle du grizzly. Le résultat obtenu fait part d'une roche avec des trous vis-à-vis les barres du grizzly. Des résultats similaires peuvent être obtenus lorsque les conditions d'éclairage sont mauvaises: soit un éclairage trop puissant causant une réflectance exagérée des roches (roches blanches) ou encore un mauvais éclairage faisant paraître les roches noires.

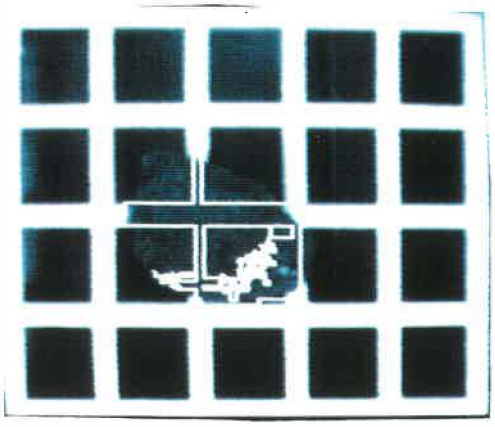
Une manière de résoudre ce problème est de développer un algorithme qui peut s'adapter à des conditions différentes. Notre algorithme n'est pas en mesure de s'adapter automatiquement à ce genre de problème mais une modification des paramètres de seuillage par l'usager peut entraîner de meilleurs résultats que ceux qui sont montrés aux figures 4.13 et 4.14. Par ailleurs, le fait d'avoir séparé le traitement de l'image vis-à-vis des trous de celui vis-à-vis des barres du grizzly est un grand avantage pour adapter le programme aux variations de contraste. Ainsi le seuil correspondant aux barres du grizzly peut être différent de celui associé aux trous. L'algorithme exige



a) Une roche noire sur le grizzly.



b) Résultat de la segmentation.
Les régions détectées sont surtout vis-à-vis des barres du grizzly.

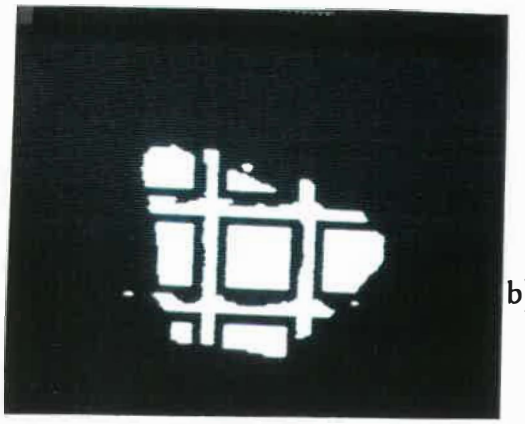


c) Contour de la roche.
Le contour est effectué autour des régions détectées de la roche.

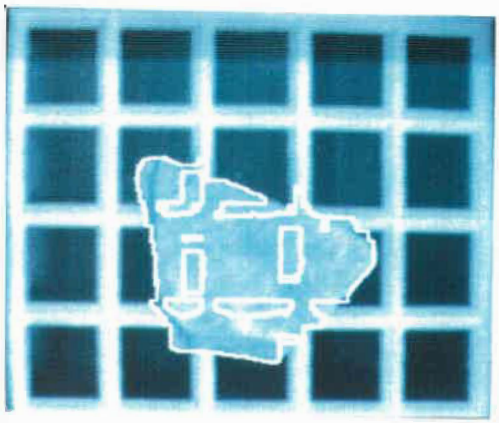
Figure 4.13: Exemple d'une roche noire



a) Une roche blanche sur le grizzly.



b) Résultat de la segmentation.
Il manque des morceaux de la roche vis-à-vis des barres du grizzly.



c) Contour de la roche.
L'algorithme croit détecter des trous vis-à-vis des barres du grizzly.

Figure 4.14: Exemple d'une roche blanche

toutefois que les roches déposées sur sa surface possèdent une réflectance similaire durant toute une exécution du programme. Sans cela, on obtiendra les résultats montrés précédemment.

#### 4.4.1.2 Influence de l'ombrage

Sur les différentes images montrées jusqu'à présent, on remarque l'influence de l'ombrage. On a déjà noté qu'à l'intérieur d'un amas, certaines roches génèrent de l'ombre sur d'autres roches de l'amas mais, plus fréquemment, des ombrages apparaissent sur les barres du grizzly. À ces endroits, l'ombrage de la roche projeté sur le grizzly est confondu avec la roche elle-même; ce qui entraîne un acroissement local des dimensions de la roche. Sur plusieurs des images présentées préalablement, on peut remarquer une "bosse" dans le contour de la roche à certains endroits vis-à-vis du grizzly. Si plusieurs sources lumineuses avaient été disposées verticalement au-dessus de la scène et autour de la caméra, les effets d'ombrage apparaissant dans les images, auraient été nettement moins importants. Toutefois, il est très difficile de les éliminer complètement.

En effectuant un lissage ou en approximant le contour vis-à-vis des barres du grizzly à partir du contour trouvé dans les trous, il serait possible de retrouver un contour de la roche plus conforme avec la réalité. Par ailleurs, ce problème n'est pas très critique dans le cas où on ne désire pas obtenir le contour parfait de la roche — ce qui est le cas de ce projet. Il peut arriver que le contour trouvé excède en certains endroits le contour réel de la roche ou encore que des trous soit générés par des ombrages, mais dans l'ensemble la forme de la roche dans le plan du grizzly est assez bien connue.

#### 4.4.1.3 Utilisation de la soustraction

On peut se demander si la soustraction est une bonne méthode pour distinguer la présence des roches. Est-ce que l'utilisation de méthodes autres pour la segmentation, que ce soit la détection d'arêtes ou l'extraction des régions, sur la seule image du grizzly avec des roches, peuvent permettre d'obtenir de meilleurs résutats? La comparaison entre une image sans roche et une image avec roche indique bien la présence ou non de roches. Pour ce faire, il faut une différence entre la brillance des roches dans l'image et la brillance du grizzly ou des trous. Cette différence peut donc être directement détectée dans la seule image du grizzly avec des roches. Avec un algorithme approprié, les résultats obtenus seront certes supérieurs à l'utilisation de la soustraction. En effet comme l'image traitée ne provient pas du résultat d'une opération sur deux images comme dans la soustraction, le niveau de bruit sur les données sera moins important et l'image traitée sera indépendante d'une image du grizzly qui ne représente peut-être pas la situation du moment actuel.

Toutefois l'utilisation de la soustraction permet une détection rapide des roches avec une implantation assez simple. Dans le cas où le seuillage est utilisé comme c'est le cas ici, la soustraction sert alors de pré-traitement et permet de rendre le seuillage indépendant — dans une certaine mesure — de l'éclairage de la scène puisque le seuil est basé sur le contraste entre les deux images. Ce contraste ou cette différence peut rester constant pour différents éclairage. Tandis que si l'image des roches était directement seuillée, dans le cas où l'éclairage changerait entre deux exécutions du programme, les valeurs des seuils devraient être modifiées; les contrastes n'étant pas les mêmes. Il faut toutefois que l'éclairage utilisé puisse permettre une distinction correcte des éléments de l'image.

L'utilisation de la soustraction impose, pour que la détection des roches soit valable, que l'éclairage de la scène demeure constant et que la caméra par rapport au

grizzly ne soit pas déplacée entre la prise de l'image sans roche et la prise des images à traiter. Durant les essais effectués en laboratoire, même avec un délai prolongé (3 à 4 heures) entre l'initialisation et le traitement des images, aucun problème n'a été relevé lorsque que les conditions précédentes furent respectées. Si ces conditions n'étaient pas respectées, il suffirait alors de re-mémoriser une nouvelle image sans roche. Cette tâche toutefois ne peut être possible que s'il ne reste pas de roches sur le grizzly.

#### 4.4.1.4 Complexité et robustesse de l'algorithme

Quoique la segmentation, qui est basée sur la soustraction et le seuillage, est assez simple et facile d'implantation, le fait que certaines zones de l'image ne sont pas traitées rend le programme complexe. En effet, il est alors nécessaire de reconstituer la roche en regroupant des régions trouvées dans différentes zones ou parties du grizzly. D'ailleurs la gestion du regroupement et de la reconstitution des roches est compliquée par la disposition des parties, où on a une barre horizontale pour plusieurs barres verticales et pour plusieurs trous. Il aurait peut-être été plus efficace de séparer la barre horizontale en autant de morceaux qu'il y a de barres verticales et de trous le long de celle-ci. Le regroupement aurait été fait sur le même principe peu importe la zone dans laquelle se situe la région à regrouper. Cette méthode aurait permis de simplifier le développement sans toutefois ralentir l'exécution du programme. Notons qu'au niveau du temps d'exécution pour la détection complète du contour des roches sur le grizzly, le temps obtenu tourne aux environs de 5 à 7 secondes selon le nombre de roches sur le grizzly. Ce temps est mesuré sur un ordinateur d'une puissance comparable à celle d'un IBM AT et en affichant les résultats intermédiaires. Sans l'affichage des résultats le temps d'exécution est réduit d'environ 3 secondes.

Dans l'ensemble, le programme est robuste et permet une détection efficace et

une localisation assez précise des roches. Toutefois, vu la méthode de segmentation utilisée, cette information se situe au niveau des pixels. Cela a pour conséquence que le contour généré est très sensible aux moindres variations d'intensité des pixels. De plus, si quelques pixels à l'intérieur de la roche ne sont pas détectés comme faisant partie de la roche, le programme croit alors détecter un trou. Pour éliminer ce cas, il suffirait de modifier le programme de façon à combler les trous de petites dimensions en supposant qu'il est peu probable que ce soit réellement de vrais trous. Toutefois dans le cadre des essais effectués au laboratoire, ce genre de phénomène ne cause pas de problème au bon fonctionnement du reste du programme.

### 4.4.2 Perspectives éventuelles

Parmi les perspectives éventuelles à observer, il pourrait être nécessaire d'améliorer la segmentation surtout au niveau des barres du grizzly. Car dans le cas où des essais correspondant d'avantage à la réalité d'un grizzly seraient effectués, on notera que le grizzly n'est pas uniformément blanc mais qu'il prend souvent l'aspect des roches, puisque de la poussière de roches est déposée à sa surface. Dans ce cas, il peut s'avérer très difficile de distinguer les limites d'une roche vis-à-vis des barres du grizzly. Dans certaines situations, si la segmentation n'était pas possible sur les barres du grizzly, il faudrait alors recourir à une segmentation vis-à-vis des trous du grizzly et, dans une phase ultérieure, compléter les roches en faisant des suppositions sur la forme des roches au-dessus des barres.

Il serait intéressant d'effectuer des essais approfondis sur la détection d'arêtes pour effectuer la segmentation de l'image. Des essais ont été effectués avec un Sobel sur les images du banc d'essai. Toutefois ces essais n'avaient pas permis de retenir cette solution: certaines fissures dans les roches apparaissaient davantage que le contour de la roche et, pour une arête physique de la scène, on pouvait retrouver des arêtes dédoublées, rendant complexe le suivi de contour. L'utilisation d'une approche analy-

tique, basée sur la sélection d'échelle tel que l'approche de Marr [Coh88], permettrait de résoudre les problèmes du Sobel. On remarquera toutefois que la connaissance des fissures et des craques dans la roche ne sont pas des données utiles pour casser des roches, du moins d'après la connaissance de la tâche de l'opérateur. L'extraction de ces données ne serait donc pas requise.

Dans le cas où on utiliserait une segmentation basée sur l'extraction directe des régions, le résultat de cette segmentation devrait être indépendant de l'échelle de l'image et des pixels eux-mêmes. À ce moment-là, une représentation sous forme de run-length, n'est plus appropriée. Dans ce sens, il serait bon de recourir à une autre méthode pour représenter les roches. Par exemple les roches pourraient être décrites sous forme de polygones. La méthode de représentation des roches choisie devrait favoriser l'étude des formes de la roche. On peut trouver deux avantages à étudier la forme des roches. Premièrement il pourrait être possible d'effectuer une séparation de roches qui autrement seraient considérées comme formant un tas. Deuxièmement par l'étude de la forme de la roche, le programme pourrait être en mesure de détecter des cas problématiques. Par exemple, il est possible de détecter que le contraste est incorrect lorsque des cas comme ceux présentés à la section 4.4.1.1 sont détectés, étant donné que la forme de ces roches ne correspond pas à la forme normale d'une roche.

## 4.5 Conclusion

Ce chapitre avait pour but de présenter l'ensemble de l'algorithme de traitement d'images dont le but principal est de connaître le nombre de roches sur le grizzly et d'extraire le contour des roches trouvées. Le coeur de l'algorithme est basé sur la soustraction entre l'image du grizzly à traiter — dont on veut savoir si des roches s'y trouvent — et une image mémorisée du grizzly sans roche. Le résultat de cette

soustraction est seuillée de façon différente pour les barres du grizzly par rapport aux trous du grizzly car ces parties possèdent des caractéristiques différentes. Comme une certaine zone n'est pas traitée aux limites des trous, un ensemble de règles a été établi pour permettre le regroupement de régions dans des parties voisines. Par le regroupement de différentes régions, des roches ou des amas de roches peuvent alors être reconnus et leur contour extrait.

Ce chapitre a par ailleurs permis de présenter des résultats du traitement d'images. Dans des conditions contrôlées, l'algorithme a fait ses preuves, tels qu'en font foi les résultats présentés avec des roches isolées ou encore regroupées dans un amas. La détection de plusieurs roches se fait avec un temps inférieur à 5 secondes. Certaines améliorations pourraient être apportées comme par exemple de réduire l'influence de l'ombrage sur les barres du grizzly dans la génération du contour et d'éliminer des trous de petites dimensions qui sont générés à l'intérieur de la roche et ne correspondant pas à la réalité.

Dans le cas où l'algorithme aurait à être utilisé dans un environnement plus difficile, les méthodes utilisées auraient besoin d'être repensées afin de rendre l'algorithme plus robuste et capable de d'adapter à des situations changeantes. Il faudrait dans ce cas rendre la segmentation indépendante de l'échelle de l'image ou autrement dit des pixels de l'image. De plus, l'algorithme de détection des roches devrait tenir compte du fait que le contraste entre les roches et les barres du grizzly peut être très faible et qu'il pourrait alors être nécessaire d'analyser spécialement la texture de l'image à ces endroits ou d'un autre côté d'approximer la roche à partir des informations trouvées vis-à-vis des trous. L'utilisation d'une méthode efficace de représentation de la roche et l'analyse de la forme de celle-ci pourraient aider à développer un programme plus robuste et adaptatif.

# Chapitre 5

# Inspection tactile

Ce chapitre traite de l'utilisation du Rhino pour reproduire le travail d'un brise-roches avec l'aide d'un capteur tactile fixé à son extrémité. Tout d'abord nous décrirons la modélisation du robot, du capteur tactile, de la caméra et du système d'acquisition de l'image. Nous présenterons les résultats d'un système utilisant un éclairage structuré afin de voir les performances d'une telle solution. Par la suite nous poursuivrons avec la stratégie utilisée pour faire le positionnement automatique du brise-roches à partir de l'information de la vision passive et ainsi effectuer l'inspection tactile des roches. Un exemple de fonctionnement montrera ce qui a été implanté en laboratoire et une analyse des résultats suivra.

## 5.1 Modélisation du robot et du capteur tactile

Cette section a pour but de décrire les équations relatives au robot — dans ce cas-ci, le Rhino XR-1 — et celles permettant de décrire le capteur tactile par rapport au robot. À la fin de cette section, il sera possible de décrire la position de l'extrémité du capteur par rapport au référentiel du grizzly. Les modèles décrits sont basés sur la représentation dans des coordonnées homogènes.

### 5.1.1 Modélisation cinématique du Rhino XR-1

Deux problèmes se posent dans la cinématique d'un robot. Tout d'abord, on retrouve la *cinématique directe* qui, à partir de la connaissance des angles des joints du robot et des paramètres géométriques des segments du robot, permet la connaissance de la position et de l'orientation de l'extrémité du robot par rapport à sa base. Et deuxièmement la *cinématique inverse* qui constitue le problème inverse: il s'agit de calculer les angles du robot qui permettent d'atteindre une position et une orientation données. Le problème de la cinématique du Rhino-XR-1 a été exposé pour la première fois dans [DeS86].

#### 5.1.1.1 Cinématique directe

Pour décrire les relations de translations et de rotations entre les segments adjacents d'un robot, nous utilisons la méthode de Denavit et Hartenberg (D-H) qui est basée sur l'assignation d'un référentiel à chacun des segments articulés et qui permet de décrire les coordonnées du référentiel d'un segment par rapport à son précédent. L'utilisation de matrices homogènes 4 x 4 permet de représenter ces transformations. A partir de transformations séquentielles, l'extrémité du robot, exprimée dans les coordonnées de la main du robot, peut être transformée et décrit dans le référentiel de base.

On définit un référentiel à chacun des segments. L'approche utilisée ici est celle décrite dans [Cra86] qui peut être différente de conventions adoptées par d'autres auteurs. Elle se distingue par le fait que le référentiel $\{i\}$ est attaché au segment $i$ et a son origine sur l'axe du joint $i$. La figure 5.1 montre l'assignation des référentiels pour le Rhino.

La représentation de D-H dépend de quatre paramètres géométriques associés à

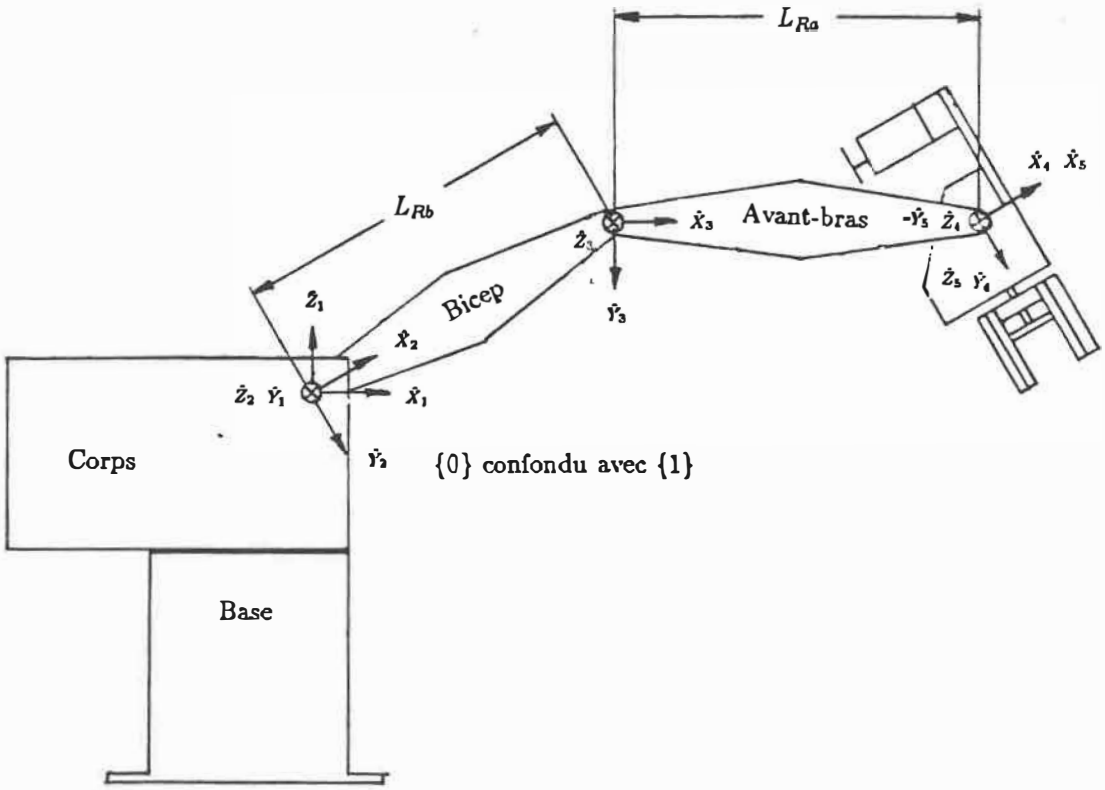



Figure 5.1: Assignation des référentiels et paramètres cinématiques pour le Rhino XR-1

chacun des segments:

$\alpha_{i-1}$ : l'angle entre $\hat{Z}_{i-1}$ et $\hat{Z}_i$ mesuré autour de $\hat{X}_{i-1}$
$a_{i-1}$ : la distance entre $\hat{Z}_{i-1}$ et $\hat{Z}_i$ mesuré le long de $\hat{X}_{i-1}$
$d_i$ : la distance entre $\hat{X}_{i-1}$ et $\hat{X}_i$ mesuré le long de $\hat{Z}_i$
$\theta_i$ : l'angle entre $\hat{X}_{i-1}$ et $\hat{X}_i$ mesuré autour de $\hat{Z}_i$

La transformée (translation et rotation) qui définit le référentiel $\{i\}$ par rapport au référentiel $\{i-1\}$ est définie par la matrice homogène [1] suivante:

$$ {}^{i-1}_{i}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i\, c\alpha_{i-1} & c\theta_i\, c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1}\, d_i \\ s\theta_i\, s\alpha_{i-1} & c\theta_i\, s\alpha_{i-1} & -c\alpha_{i-1} & -c\alpha_{i-1}\, d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.1} $$

où $c\theta_i$ représente $\cos\theta_i$ et $s\theta_i$ représente $\sin\theta_i$

De façon générale, pour un robot à $N$ degrés de liberté, la transformée permettant de décrire l'extrémité du robot (référentiel $\{N\}$) par rapport à sa base (référentiel $\{0\}$) est définie par le produit des matrices intermédiaires:

$$ {}^{0}_{N}\boldsymbol{T} = {}^{0}_{1}\boldsymbol{T}\, {}^{1}_{2}\boldsymbol{T}\, {}^{2}_{3}\boldsymbol{T} \ \ldots\ {}^{N-1}_{N}\boldsymbol{T} \tag{5.2} $$

Le tableau 5.1 montre les paramètres décrivant les segments du Rhino qui est un robot à 5 degrés de liberté:

| Joint $i$ | $\alpha_{i-1}$ | $a_{i-1}$ | $d_i$ | $\theta_i$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | -90 | 0 | 0 | $\theta_1$ |
| 2 | 0 | 0 | 0 | $\theta_2$ |
| 3 | 0 | $L_{Rb}$ | 0 | $\theta_3$ |
| 4 | 0 | $L_{Ra}$ | 0 | $\theta_4$ |
| 5 | -90 | 0 | 0 | $\theta_5$ |

Tableau 5.1: Paramètres cinématiques des segments du Rhino

[1] Les matrices homogènes sont représentées en caractères gras.

Dans ce tableau, on notera que $L_{Rb}$ correspond à la longueur du bicep du Rhino et $L_{Ra}$ équivaut à la longueur de l'avant bras du Rhino. Quoique les longueurs de ces segments sont égales, elles sont notées différemment pour les distinguer dans les calculs subséquents.

Dans cette application, nous utilisons le Rhino sous forme de robot à 4 degrés de liberté, i.e. que le joint numéro 5 est fixe et ainsi la valeur de $\theta_5$ est posée égale à 0. La matrice de transformation obtenue pour ramener le référentiel de l'extrémité du Rhino (référentiel $\{ER\}$) au référentiel de la base (référentiel $\{BR\}$) est décrit à l'équation 5.3. Les calculs requis pour obtenir cette matrice de transformation sont décrits à la section A.2.

$$
{}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} c_1\,c_{234} & s_1 & -c_1\,s_{234} & L_{Ra}\,c_1\,c_{23} + L_{Rb}\,c_1\,c_2 \\ s_1\,c_{234} & -c_1 & -s_1\,s_{234} & L_{Ra}\,s_1\,c_{23} + L_{Rb}\,s_1\,c_2 \\ -s_{234} & 0 & -c_{234} & -L_{Ra}\,s_{23} - L_{Rb}\,s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.3}
$$

où $c_1$ est la forme abrégée de $\cos\theta_1$, $s_1$ celle de $\sin\theta_1$, $c_{234}$ celle de $\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)$ et ainsi de suite.

#### 5.1.1.2 Cinématique inverse

Dans le cas où on désire placer l'extrémité du robot à une position et à une orientation donnée par rapport au référentiel de la base du robot, il est nécessaire de connaître quelles seront les valeurs des angles des joints du robot qui permettront d'atteindre cette position, advenant le cas évidemment où c'est possible.

Soit ${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}_d$, étant, sous forme matricielle, la position et l'orientation désirées de l'extrémité du robot par rapport au référentiel de la base, on désire résoudre l'équation suivante:

$$\overset{ER}{BR}\boldsymbol{T}_d = \overset{ER}{BR}\boldsymbol{T} \tag{5.4}$$

où

$$\overset{ER}{BR}\boldsymbol{T} = \overset{0}{1}\boldsymbol{T}\,\overset{1}{2}\boldsymbol{T}\,\overset{2}{3}\boldsymbol{T}\,\overset{3}{4}\boldsymbol{T}.$$

La tâche est de déterminer les quatre inconnues — dans le cas où $\theta_5$ est fixe —, c'est-à-dire $\theta_1$, $\theta_2$, $\theta_3$ et $\theta_4$, en fonction des composantes de la matrice $\overset{ER}{BR}\boldsymbol{T}_d$ et des paramètres du Rhino. On peut résoudre le problème de cinématique inverse tout simplement en développant l'équation 5.4, tel que:

$$\begin{bmatrix} n_{x_d} & o_{x_d} & a_{x_d} & p_{x_d} \\ n_{y_d} & o_{y_d} & a_{y_d} & p_{y_d} \\ n_{z_d} & o_{z_d} & a_{z_d} & p_{z_d} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.5}$$

La partie droite de l'équation 5.5 est la matrice calculée à l'équation 5.3. En égalant les termes de ces 2 matrices, on se rend compte qu'il existe plus d'équations que d'inconnues, ce qui nous amène à conclure qu'il existe plusieurs solutions. Des critères seront établis afin de choisir une solution lorsque plus d'une est possible.

La solution détaillée de la cinématique inverse du Rhino XR-1 est située à la section A.1 . Les angles sont donnés par les équations suivantes:

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_{y_d}}{p_{x_d}}\right) \tag{5.6}$$

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{\psi(L_{Ra}c_3 + L_{Rb}) - \phi L_{Ra}s_3}{\phi(L_{Ra}c_3 + L_{Rb}) + \psi L_{Ra}s_3}\right) \tag{5.7}$$

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sqrt{(2L_{Ra}L_{Rb})^2 - (\phi^2 + \psi^2 - L_{Ra}^2 - L_{Rb}^2)^2}}{(\phi^2 + \psi^2 - L_{Ra}^2 - L_{Rb}^2)}\right) \tag{5.8}$$

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{-a_{x_d}}{-a_{z_d}}\right) - \theta_3 - \theta_2 \tag{5.9}$$

où

$$\phi = c_1 p_{x_d} + s_1 p_{y_d} \tag{5.10}$$

et

$$\psi = -p_{z_d} \tag{5.11}$$

La solution retenue doit respecter les limites d'angles décrites au tableau A.1 de la section A.1. De plus il est possible que la solution de ces équations ne soit pas unique. En effet plusieurs configurations du Rhino peuvent atteindre un même point. Le choix de la solution la plus appropriée est basé sur le fait que le coude du robot doit être le plus possible orienté vers le haut, de façon à minimiser les risques de heurter le grizzly ou les roches. De plus, la solution retenue doit minimiser les mouvements effectués par le robot.

#### 5.1.1.3 Relation par rapport au grizzly

Le robot peut être décrit par rapport à un référentiel global, qui est ici le référentiel du grizzly, par une matrice de transformation entre la base du robot et le référentiel $\{G\}$. Un choix approprié des référentiels a permis de réduire cette transformation à une simple translation telle que montrée à la figure 5.2. La transformation entre la base du robot et le grizzly est:

$$ {}^{G}_{BR}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & {}^{G}_{BR}T_x \\ 0 & 1 & 0 & {}^{G}_{BR}T_y \\ 0 & 0 & 1 & {}^{G}_{BR}T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.12} $$

### 5.1.2 Modélisation du capteur tactile

Il s'agit d'exprimer le capteur tactile sous la forme d'une transformée homogène. La figure 5.3 expose le capteur tactile rattaché à l'extrémité du robot. La transformée — uniquement une translation — entre le référentiel du capteur tactile situé à l'extrémité de celui-ci et le référentiel $\{ER\}$ s'exprime ainsi:

$$ {}^{ER}_{T}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & {}^{ER}_{T}T_x \\ 0 & 1 & 0 & {}^{ER}_{T}T_y \\ 0 & 0 & 1 & {}^{ER}_{T}T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.13} $$

Il est à noter que le référentiel $\{T\}$ est situé à *la position de l'extrémité du poussoir lorsque celui-ci est relâché* et qu'il est fixe par rapport au corps du capteur et non par rapport au poussoir.

Ainsi, selon que le poussoir est enfoncé ou non, la position de son extrémité varie par rapport au référentiel $\{T\}$. La position et l'orientation de l'extrémité du poussoir par rapport à $\{T\}$, ${}^{T}\boldsymbol{P}_P$, sont données par la matrice suivante:

$$ {}^{T}\boldsymbol{P}_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -E_P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.14} $$

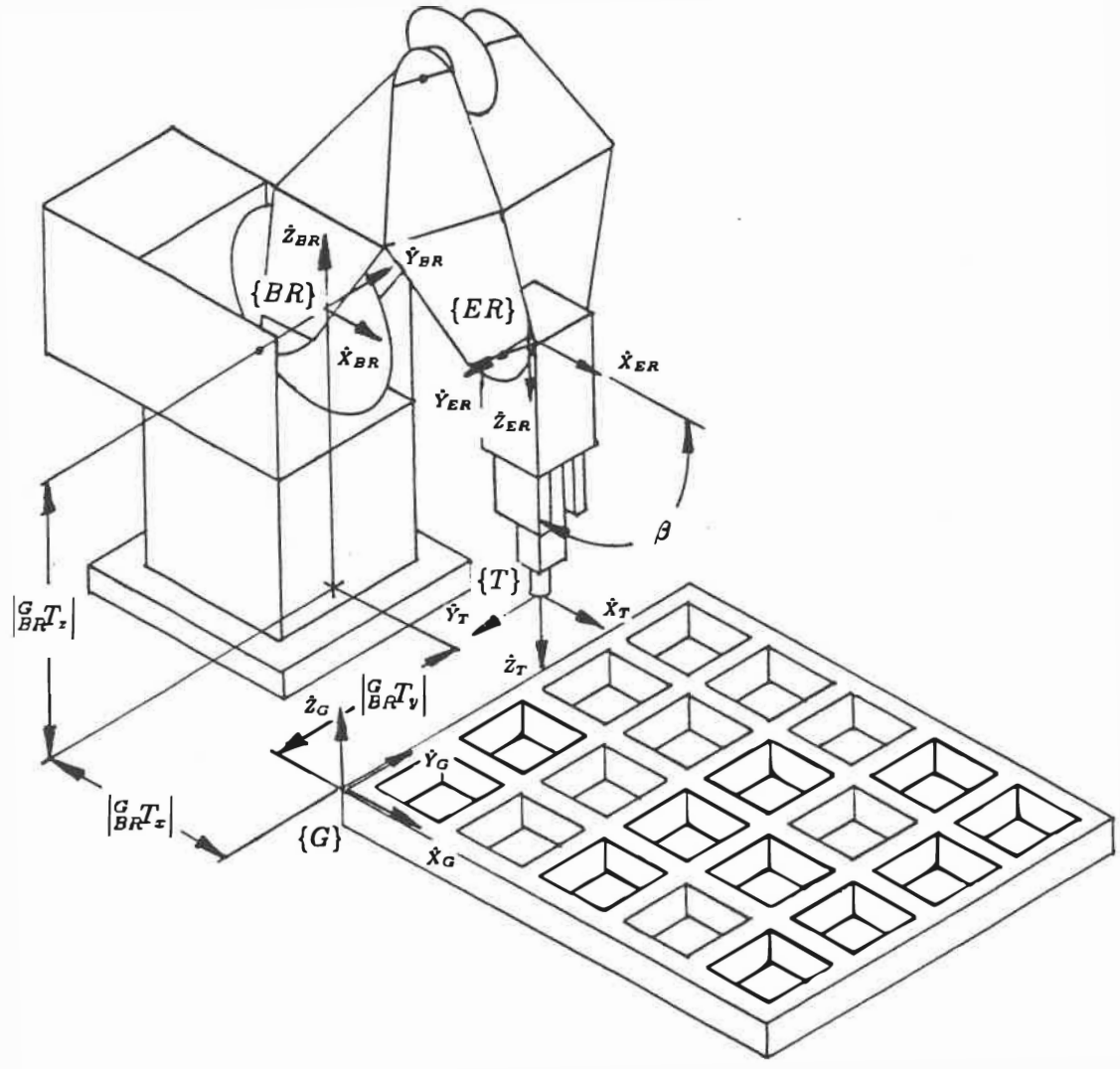



Figure 5.2: Paramètres cinématiques pour le banc d'essai

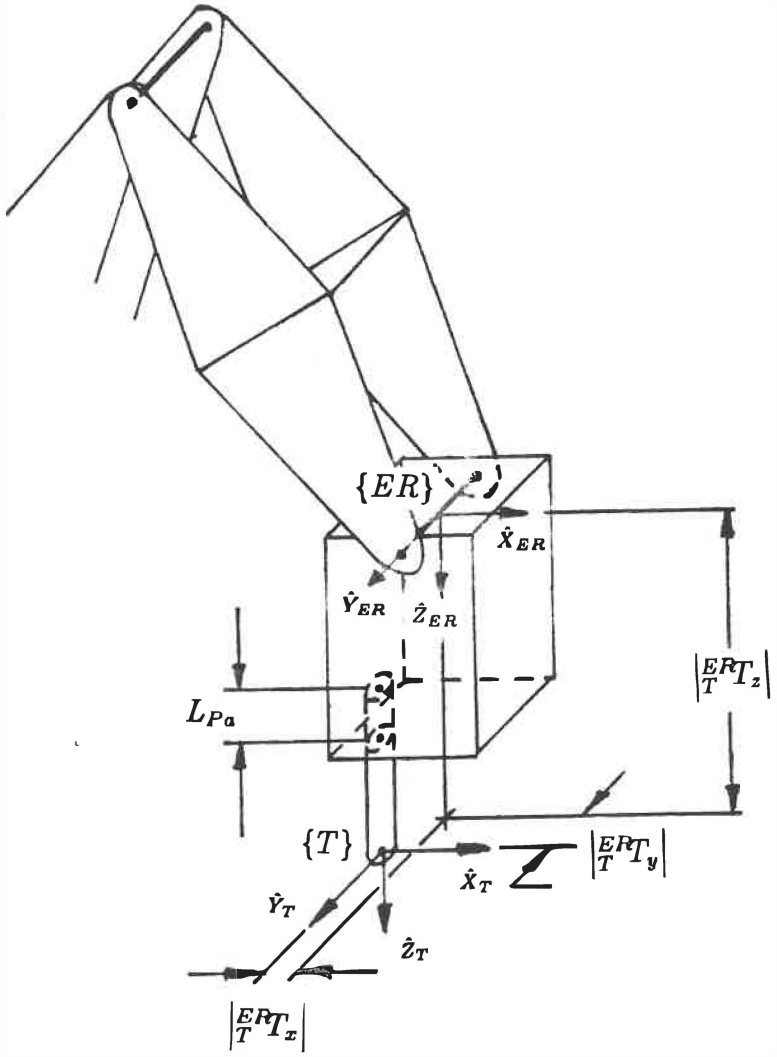



Figure 5.3: Capteur tactile et ses paramètres cinématiques

où $E_P$ est l'enfoncement du poussoir qui a deux valeurs possibles selon qu'il y ait contact ou non avec la surface:

$E_P = 0$ lorsque le poussoir est relâché, i.e. qu'il n'y a pas de contact
$E_P = L_{Pa}$ lorsque le poussoir est enfoncé suite à la présence d'un contact

où $L_{Pa}$ est la longueur du déplacement requis pour atteindre le point d'action de l'interrupteur.

### 5.1.3 Modèle global

On cherche ici à exprimer la relation complète entre la position du poussoir du capteur tactile et le référentiel du grizzly, $\{G\}$. La position et l'orientation du poussoir sont définies par le produit des matrices de transformations suivantes:

$$ {}^{G}\boldsymbol{P}_{P} = {}^{G}_{BR}\boldsymbol{T}\,{}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}\,{}^{ER}_{T}\boldsymbol{T}\,{}^{T}\boldsymbol{P}_{P} \tag{5.15} $$

La matrice ${}^{G}\boldsymbol{P}_{P}$ peut être décomposée de la façon suivante:

$$ {}^{G}\boldsymbol{P}_{P} = \begin{bmatrix} & & & \vdots & {}^{G}P_{P_x} \\ & {}^{G}_{T}R_{P} & & \vdots & {}^{G}P_{P_y} \\ & & & \vdots & {}^{G}P_{P_z} \\ \cdots & \cdots & \cdots & & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \end{bmatrix} \tag{5.16} $$

où ${}^{G}P_{P_x}$, ${}^{G}P_{P_y}$, ${}^{G}P_{P_z}$ sont les coordonnées de l'extrémité du poussoir par rapport à $\{G\}$. La matrice ${}^{G}_{T}R_{P}$ exprime l'orientation du capteur tactile ou du poussoir par rapport au référentiel du grizzly. Une représentation sous la forme des angles d'Euler (Euler $\hat{X}$ - $\hat{Y}$ - $\hat{Z}$) est utilisée. De cette façon, uniquement trois angles ($\alpha$, $\beta$ et $\gamma$) sont requis pour décrire toute orientation dans l'espace.

Comme le Rhino est un robot à 5 degrés de liberté, les possibilités d'orientation de son extrémité sont limitées. C'est ainsi que l'angle $\gamma$ est posé nul et l'angle $\alpha$, qui correspond au mouvement de rotation du robot, est égal à l'angle $\theta_1$. L'angle $\beta$ correspond à l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale telle que montrée à la figure 5.2.

Dans le cadre de l'inspection tactile, deux problèmes se posent. Dans un premier temps, lorsque le robot possède une configuration connue, c'est-à-dire qu'on connait

les valeurs des angles associés à ses articulations, on veut alors connaître la position et l'orientation de l'extrémité du poussoir par rapport au référentiel $\{G\}$. Il suffit alors de résoudre l'équation 5.15 en calculant en autres la matrice ${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}$, qui est en fait solution de la cinématique directe du robot. Par la suite le résultat est décomposé tel que décrit à l'équation 5.16 pour obtenir un vecteur position et l'orientation qui plus simplement s'exprime sous la forme de deux angles ($\alpha$ et $\beta$). La solution de ce problème est appelée la *solution complète de la cinématique directe.*

On est également intéressé à diriger le robot à une position et à une orientation précises par rapport au référentiel $\{G\}$. Pour diriger le robot à cette position, il faut connaître les valeurs des angles des articulations du robot. La première étape pour la solution de ce problème consiste à bâtir la matrice ${}^{G}\boldsymbol{P}_{P}$ de l'équation 5.16 avec les angles et la position désirés. En substituant cette matrice dans l'équation 5.15, on trouve la matrice ${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}$ désirée:

$$ {}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}_{d} = {}^{G}_{BR}\boldsymbol{T}^{-1}\ {}^{G}\boldsymbol{P}_{P}\ {}^{T}\boldsymbol{P}^{-1}_{P}\ {}^{ER}_{T}\boldsymbol{T}^{-1} \tag{5.17} $$

La solution de ${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}_{d}$ correspond à la cinématique inverse du Rhino et permet d'obtenir les valeurs des angles pour placer le poussoir du capteur à la position et à l'orientation désirées. La solution de l'équation 5.17 nous donne ce qui est appelée la *solution complète de la cinématique inverse* et se résoud, pour les angles $\theta_1$ à $\theta_4$, à partir des équations 5.6 à 5.9.

## 5.2 Modèle de la caméra et du système d'acquisition de l'image

Cette section décrit le modèle de la caméra et du système d'acquisition de l'image. Dans un premier temps, un modèle général sera présenté et par la suite, les équations

générales seront regroupées et appliquées au cas particulier de ce projet; ce qui permettra de décrire la transformation causée par la caméra et le système d'acquisition de l'image d'une manière simplifiée.

### 5.2.1 Description du modèle

À la section 3.5.1, le référentiel de l'image (référentiel $\{I\}$) a été défini comme étant celui dans lequel les coordonnées de la roche sont décrites après le traitement de l'image. Ces coordonnées doivent être transférées au référentiel du grizzly (référentiel $\{G\}$) — qui est notre référentiel global. Pour faciliter cette transformation, d'autres référentiels, tels que montrés à la figure 5.4, sont utilisés.

Les distorsions de l'image, causées par la lentille, ne sont pas considérées dans le développement du modèle de la caméra présenté ici. Les phénomènes de distorsion, qui sont nuls au centre du plan image, ne prennent de l'importance que sur les bords de l'image. Dans le cadre de ce projet, la caméra fut ajustée de façon à ce que la partie de l'image qui a besoin d'être traitée ne dépasse pas le quart de la surface totale de l'image et que la zone à traiter soit le plus centrée possible. De cette façon, aux limites de la partie de l'image à traiter, la distorsion est assez faible (inférieure à un pixel pour la zone de l'image à traiter). C'est pourquoi dans le développement subséquent, l'effet des distorsions n'a pas été considéré.

Afin de décrire la transformation qui permet d'amener les points extraits du traitement de l'image dans le référentiel $\{G\}$, il est plus simple de décrire dans un premier temps la transformée inverse. C'est-à-dire qu'un point $P$ de la scène, décrit par rapport au référentiel $\{G\}$ sera amené par transformations successives dans le référentiel $\{I\}$, qui est le référentiel de l'image à deux dimensions. Les coordonnées 3D de ce point sont décrites dans le référentiel $\{G\}$ par le vecteur ${}^{G}P = \left({}^{G}P_x, {}^{G}P_y, {}^{G}P_z\right)^T$. Dans le cas où les effets de distorsions de la lentille sont négligés, trois étapes de

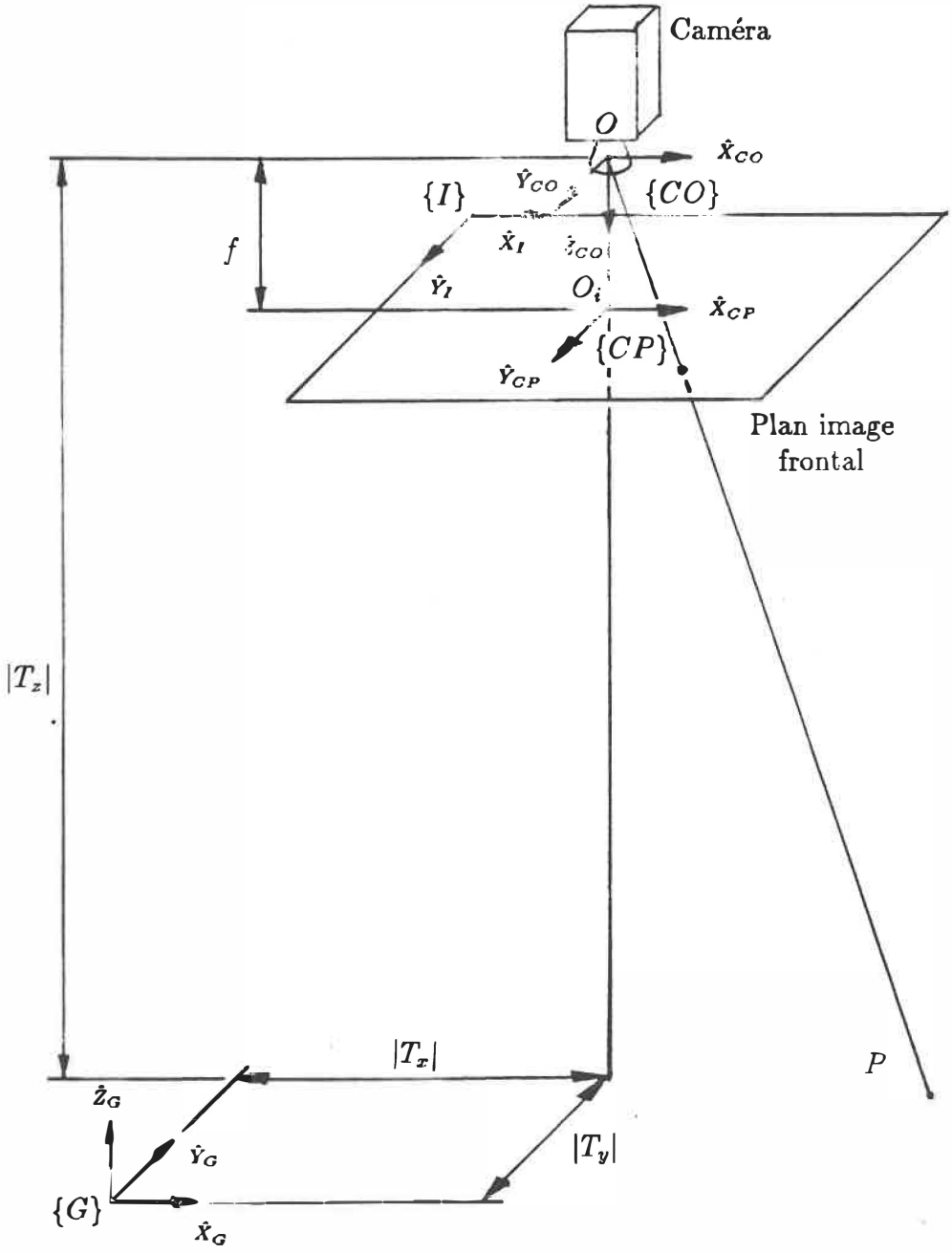



Figure 5.4: Assignation des référentiels pour le modèle de la caméra

transformation sont requises.

**Étape 1:** Tout d'abord il faut décrire le point $P$ de la scène dans le référentiel du centre optique de la caméra (référentiel $\{CO\}$). Ce référentiel est centré au centre optique $O$ de la caméra avec l'axe $\hat{Z}_{CO}$ coïncidant avec l'axe optique. Les coordonnées du point $P$ par rapport à ce référentiel sont ${}^{CO}P = \left({}^{CO}P_x, {}^{CO}P_y, {}^{CO}P_z\right)^T$. La transformation homogène qui permet de passer du référentiel $\{G\}$ au référentiel $\{CO\}$ est donnée par:

$$\begin{bmatrix} {}^{CO}P \\ \cdots \\ 1 \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc:c} & {}^{CO}_{G}R & & \begin{matrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{matrix} \\ \hdashline \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array}\right] \begin{bmatrix} {}^{G}P \\ \cdots \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.18}$$

où ${}^{CO}_{G}R$ est une matrice de dimensions 3x3.

**Étape 2:** Maintenant, nous définirons le référentiel du plan image de la caméra, nommément $\{CP\}$, qui est un système de coordonnées à deux dimensions $(\hat{X}_{CP}, \hat{Y}_{CP})$ centré au point $O_i$ (intersection de l'axe optique $\hat{Z}_{CO}$ et du plan image frontal) et parallèle aux axes $\hat{X}_{CO}$ et $\hat{Y}_{CO}$. On notera $f$ la distance entre le plan image et le centre optique de la caméra. En utilisant une projection en perspective basée sur la géométrie d'une caméra constituée uniquement d'un trou (lentille idéale), la transformation des coordonnées 3D dans le référentiel $\{CO\}$ aux coordonnées de l'image idéale dans le référentiel $\{CP\}$ est décrite par:

$${}^{CP}P_x = f \frac{{}^{CO}P_x}{|{}^{CO}P_z|} \tag{5.19}$$

$${}^{CP}P_y = f \frac{{}^{CO}P_x}{|{}^{CO}P_z|} \tag{5.20}$$

Le signe des coordonnées projetées dans le plan image frontal étant déterminé par leurs coordonnées respectives décrites dans le référentiel $\{CO\}$, seule la grandeur de ${}^{CO}P_z$ (tout comme pour $f$) doit être utilisée pour ne pas faire changer le signe des coordonnées recherchées.

**Étape 3:** Cette dernière étape permet de décrire les coordonnées du plan image dans le référentiel fixé au système d'acquisition de l'image (référentiel $\{I\}$). Dans un premier temps, on posera l'origine de ce référentiel vis-à-vis le coin du plan image. Toutefois il est possible de lui assigner une position arbitraire tel qu'il sera vu plus loin.

La transformation de cette étape permet d'effectuer une conversion des unités puisque les coordonnées de l'image dans le système d'acquisition se calculent en pixels. Ce facteur d'échelle est le rapport des coordonnées du système d'acquisitions (en pixels) sur les coordonnées réelles de l'image (en centimètres par exemple). Ce rapport est en autres fonction du nombre d'éléments du senseur de la caméra par rapport au nombre de pixels du système d'acquisition tel que décrit à l'équation 5.21. Cette équation s'applique plus particulièrement aux caméras de type CCD où il est facile de connaître le nombre d'éléments du senseur de la caméra; ce qui n'est pas le cas d'une caméra de type vidicon. Les coordonnées $\left({}^{I}P_x, {}^{I}P_y\right)$ sont données par:

$${}^{I}P_x = \frac{N_{A_x}}{N_{C_x} D_{C_x}} {}^{CP}P_x + {}^{I}C_x \tag{5.21}$$

$${}^{I}P_y = \frac{N_{A_y}}{N_{C_y} D_{C_y}} {}^{CP}P_y + {}^{I}C_y \tag{5.22}$$

où les paramètres sont:

$D_{C_x}$ : distance centre à centre entre deux éléments adjacents du senseur de la caméra sur une même ligne

$D_{C_y}$ : distance centre à centre entre deux éléments adjacents du senseur de la caméra sur une même colonne

$N_{C_x}$ : nombre d'élements du senseur sur une ligne

$N_{C_y}$ : nombre d'élements du senseur sur une colonne

$N_{A_x}$ : nombre de pixels échantillonnés par le système d'acquisition sur une ligne

$N_{A_y}$ : nombre de pixels échantillonnés par le système d'acquisition sur une colonne

${}^{I}C_x$ : numéro de la colonne du centre de l'image dans le référentiel $\{I\}$

${}^{I}C_y$ : numéro de la ligne du centre de l'image dans le référentiel $\{I\}$

### 5.2.2 Modèle global particulier au projet

Dans cette section, le modèle global de la caméra et du système d'acquisition de l'image sera présenté, et ce, pour le cas particulier de cette application où nous avons posé que la caméra est placée au-dessus de la scène et orientée vers le bas avec l'axe optique parfaitement perpenticulaire au grizzly.

En combinant les équations des deux dernières étapes décrites dans la section précédente (éq. 5.19 avec 5.21 et éq. 5.20 avec 5.22), les coordonnées $\left({}^{I}P_x, {}^{I}P_y\right)$ peuvent être reliées aux coordonnées 3D $\left({}^{G}P_x, {}^{G}P_y, {}^{G}P_z\right)^T$ du point $P$ par les équations suivantes:

$${}^{I}P_x = f\frac{N_{A_x}}{N_{C_x}D_{C_x}}\frac{{}^{CO}P_x}{|{}^{CO}P_z|} + {}^{I}C_x \tag{5.23}$$

$${}^{I}P_y = f\frac{N_{A_y}}{N_{C_y}D_{C_y}}\frac{{}^{CO}P_y}{|{}^{CO}P_z|} + {}^{I}C_y \tag{5.24}$$

La caméra a été placée de telle façon que le référentiel $\{CP\}$ soit orienté dans le même sens que le référentiel $\{I\}$, qui lui, est fixé par le système d'acquisition de

l'image. Par rapport à $\{G\}$, la caméra et son référentiel $\{CO\}$ n'ont subi qu'une seule rotation, de 180 degrés autour de l'axe $\hat{X}_G$. Le positionnement de la caméra, tel qu'utilisé dans ce projet, correspond à ce qui est montré à la figure 5.4. L'équation 5.18 devient:

$$\begin{bmatrix} {}^{CO}P_x \\ {}^{CO}P_y \\ {}^{CO}P_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & -1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & -1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^{G}P_x \\ {}^{G}P_y \\ {}^{G}P_z \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5.25}$$

où selon la figure 5.4 nous avons $T_x = -|T_x|$, $T_y = |T_y|$ et $T_z = |T_z|$.

En substituant cette dernière équation dans les équation 5.23 et 5.24, et en résolvant pour le couple de coordonnées $\left({}^{G}P_x, {}^{G}P_y\right)$, on obtient:

$${}^{G}P_x = \frac{N_{C_x} D_{C_x}}{N_{A_x} f} \left|T_z - {}^{G}P_z\right| \left({}^{I}P_x - {}^{I}C_x\right) - T_x \tag{5.26}$$

$${}^{G}P_y = -\frac{N_{C_y} D_{C_y}}{N_{A_y} f} \left|T_z - {}^{G}P_z\right| \left({}^{I}P_y - {}^{I}C_y\right) + T_y \tag{5.27}$$

Le calcul des coordonnées $\left({}^{G}P_x, {}^{G}P_y\right)$ exige la connaissance de la hauteur du point $P$ par rapport au référentiel $\{G\}$, coordonnée ${}^{G}P_z$. Évidemment lorsqu'on désire connaître les coordonnées d'une roche détectée à la suite d'un traitement d'images, la hauteur de la roche n'est pas connue à priori. Comme de plus la forme de l'élévation des roches est inconnue, le calcul des coordonnées réelles de la roche, se limite à l'évaluation des coordonnées correspondantes à la projection de la roche sur le grizzly: c'est-à-dire en posant ${}^{G}P_z$ égal à 0 dans les équations 5.26 et 5.27. Ainsi les coordonnées $\left({}^{G}P_x, {}^{G}P_y\right)$ extraites sont la projection d'un point $P$ de la roche sur le grizzly.

Dans le cas particulier de ce projet, deux approches s'offraient à nous pour déterminer les coordonnées réelles des points trouvés dans l'image.

La première approche consiste à calculer la position à partir des équations 5.26 et 5.27. Pour ce faire, il est essentiel de connaître les valeurs des paramètres qui forment ces équations. Les termes $f$, $N_{C_x}$, $N_{C_y}$, $D_{C_x}$ et $D_{C_y}$ peuvent être trouvés à partir des spécifications de la caméra; $N_{A_x}$, $N_{A_y}$ ${}^{I}C_x$ et ${}^{I}C_y$, selon les spécifications du système d'acquisition d'images. Les autres paramètres, $T_x$, $T_y$ et $T_z$ doivent être mesurés. On doit également s'assurer que l'orientation de la caméra soit correcte: elle doit être parfaitement verticale et orientée vers le bas. La principale difficulté de ce genre de mesure, c'est que la position du centre optique à l'intérieur de la caméra n'est pas connue; ce qui rend très difficile l'évaluation des paramètres de translation. Dans ce cas, afin d'obtenir une bonne précision, il pourrait être nécessaire de recourir à une procédure de calibration (c.f. [Tsa87]) qui peut permettre d'évaluer tous les paramètres du modèle.

La deuxième approche évite d'avoir recours à une prise de mesure directe. Pour ce faire, nous allons définir un facteur de conversion, $F_C$, qui remplace le rapport $\frac{N_{C_x} D_{C_x}}{N_{A_x} f} \left| T_z - {}^{G}P_z \right|$ de l'équation 5.26. Comme il s'agit du rapport des coordonnées réelles sur les coordonnées en pixels, on remplace ce rapport par une constante qui est définie pour des valeurs fixes de $T_z$ et de ${}^{G}P_z$ (dans ce cas-ci ${}^{G}P_z = 0$). Pour définir cette constante, il suffit de se servir d'un objet dont les dimensions réelles sont connues et d'effectuer le rapport du nombre de pixels qui correspondent à cet objet dans l'image sur les dimensions réelles. Dans le programme développé pour ce projet, on se sert des dimensions du grizzly qui sont connues à prime abord. L'usager intervient afin de positionner une fenêtre, nommée *fenêtre de travail*, juste autour du grizzly, de façon à ce que le programme puisse calculer les dimensions du grizzly en pixels. Le facteur de conversion est donc donné par:

$$F_C = \frac{\text{dimensions réelles du grizzly dans les coordonnées de } \{G\} \text{ (cm)}}{\text{dimensions de la fenêtre de travail (pixels)}} \qquad (5.28)$$

Deux facteurs de conversion, un pour les coordonnées en $x$ ($F_{C_x}$) et un autre pour

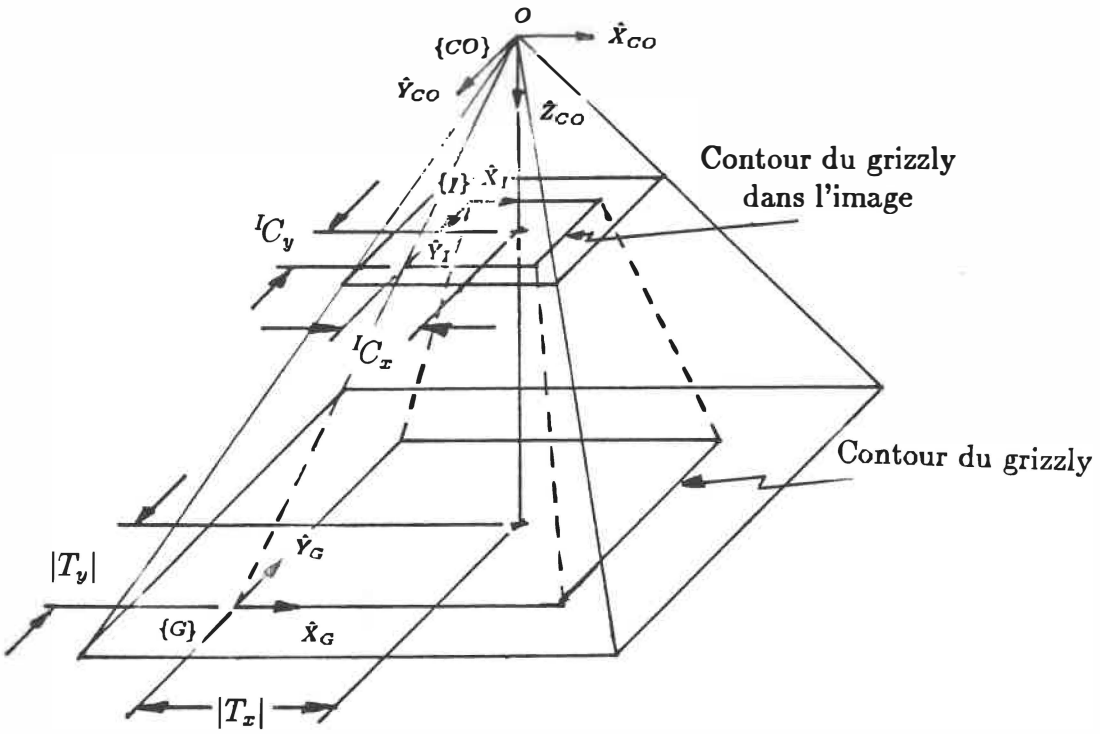



Figure 5.5: Position du référentiel de l'image (réf. $\{I\}$)

les coordonnées en $y$ ($F_{C_y}$), doivent être calculés. Les coordonnées réelles du point $P$ sont maintenant:

$$^GP_x = F_{C_x}{}^IP_x - F_{C_x}{}^IC_x - T_x \tag{5.29}$$

$$^GP_y = -F_{C_y}{}^IP_y + F_{C_y}{}^IC_y + T_y \tag{5.30}$$

Jusqu'à maintenant $\{I\}$ avait été placé dans le coin de l'image. En déplaçant celui-ci vers le coin supérieur gauche de la fenêtre de travail comme à la figure 5.5, d'autres simplifications sont possibles.

Pour les coordonnées en $\hat{X}_G$, les quantités $F_{C_x}{}^IC_x$ et $T_x$ sont de même grandeur mais de signe opposé, car $T_x$ est négatif; ce qui permet l'élimination de ces deux composantes. Maintenant pour les coordonnées en $\hat{Y}_G$, si le grizzly est bien centré au

centre de la fenêtre de travail, la grandeur et le sens de ${}^{F_{C_y}}C_y$ étant les mêmes que $T_y$, on obtient:

$$ {}^{F_{C_y}}C_y + T_y = 2\,{}^{F_{C_y}}C_y = L_{Ft_y} \tag{5.31} $$

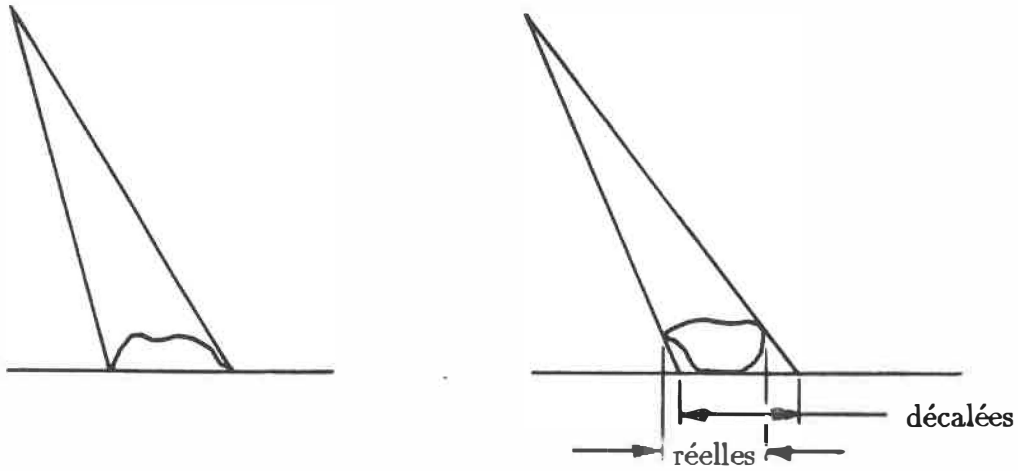
où $L_{Ft_y}$ est la largeur de la fenêtre de travail en pixels dans le sens de $\hat{Y}_I$. Finalement, les équations 5.29 et 5.30 se réduisent à:

$$ {}^{G}P_x = {}^{F_{C_x}}P_x \tag{5.32} $$

$$ {}^{G}P_y = F_{C_y}\left(L_{Ft_y} - {}^{I}P_y\right) \tag{5.33} $$

Évidemment ces dernières simplifications ne sont possibles que si la caméra n'a pas subi de rotation par rapport à $\{G\}$, que les distorsions de la lentille sont négligeables et qu'on ne s'intéresse qu'à la projection des roches sur le plan du grizzly. De plus il faut s'assurer que l'image du grizzly remplisse bien la fenêtre de travail. Cette tâche peut facilement être effectuée par l'usager en positionnant et en ajustant la grandeur de la fenêtre autour du grizzly (c.f. section 4.2.1.1). Au préalable, on aura soin de placer la caméra de façon à ce que le grizzly soit le plus possible au centre de l'image tout en éloignant la caméra de façon à ne pas utiliser les bords de l'image qui sont davantage affectés par les distorsions de la lentille.

Le grand avantage de cette approche est qu'elle ne nécessite aucune mesure; ce qui simplifie grandement la calibration et l'initialisation du programme. Évidemment les mesures obtenues n'ont pas la précision d'un modèle de caméra complet avec une procédure de calibration pour évaluer les paramètres du modèle. Toutefois dans le cadre d'une application de ce genre, où la position exacte des roches n'est pas d'une grande importance, les simplifications effectuées ne devraient pas avoir trop




a) Pas de décalage b) Avec un décalage sur les coordonnées

Figure 5.6: Influence de la projection sur les coordonnées des roches

d'importance. De toute façon, comme on va voir à la prochaine section, le fait de n'avoir que la projection des roches sur le grizzly nous donne à la base qu'une idée approximative des vraies coordonnnées de la roche.

### 5.2.3 Influence de la projection

Le fait que les coordonnées de la roche qui sont extraites sont celles provenant de la projection de celle-ci sur le plan du grizzly, il est probable que ces coordonnées diffèrent des coordonnées réelles de la roche. Ces erreurs, qui sont en fait un décalage entre les coordonnées réelles de la roche et celles mesurées, peuvent être plus ou moins importantes selon la forme de la roche. La figure 5.6 illustre ce phénomène en montrant une roche dont les coordonnées limites trouvées correspondent à la réalité et une autre dont les coordonnées sont décalées à cause de la projection.

À partir des équations 5.26 et 5.27, il est possible de calculer le décalage causé par la projection par rapport aux coordonnées réelles de la roche, ${}^{G}D_{P}$, qui est également montré à la figure 5.7:

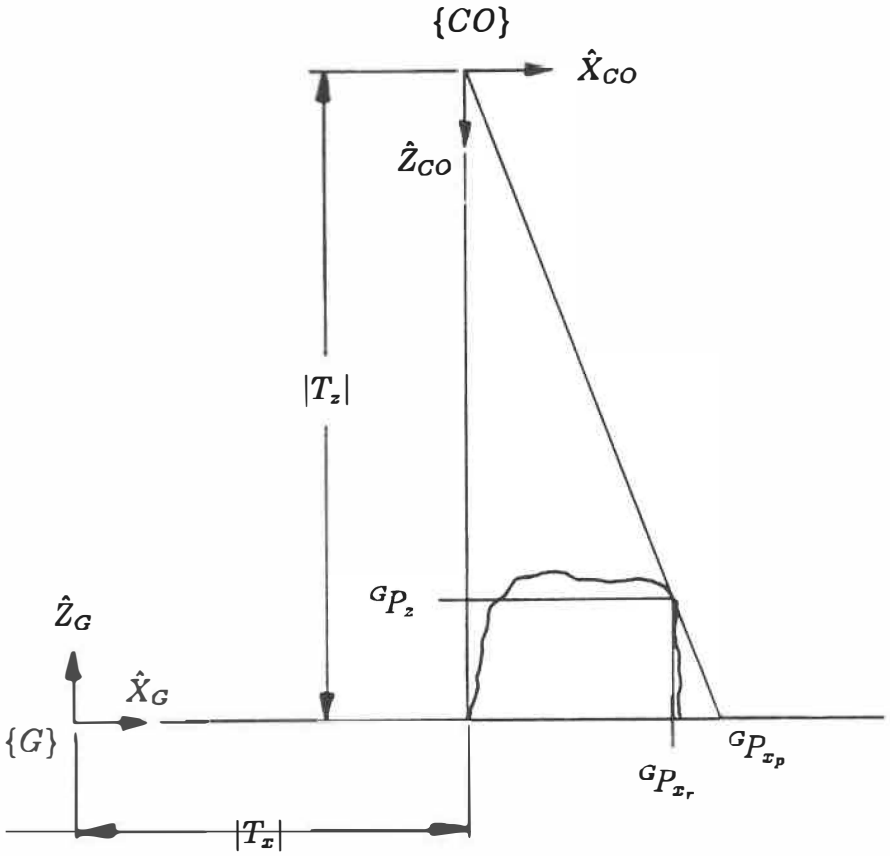



Figure 5.7: Calcul de l'erreur de projection

$$ {}^GD_{P_x} = {}^GP_{x_p} - {}^GP_{x_r} = \left({}^GP_{x_p} + T_x\right)\left[1 - \frac{\left|T_z - {}^GP_z\right|}{|T_z|}\right] \tag{5.34} $$

$$ {}^GD_{P_y} = {}^GP_{y_p} - {}^GP_{y_r} = \left({}^GP_{y_p} - T_y\right)\left[1 - \frac{\left|T_z - {}^GP_z\right|}{|T_z|}\right] \tag{5.35} $$

où $\left({}^GP_{x_r}, {}^GP_{y_r}\right)$ sont les coordonnées réelles de la roche et $\left({}^GP_{x_p}, {}^GP_{y_p}\right)$ celles projetées sur le plan du grizzly et ${}^GP_z$ est la hauteur de la roche en ce point.

Pour une hauteur de caméra fixe, le décalage sera maximal lorsqu'une roche de hauteur importante est située sur les côtés du grizzly, c'est-à-dire que les coordonnées en $x$ ou en $y$ sont grandes. Les valeurs des paramètres pour le banc d'essai sont montrées au tableau 5.2.

| Paramètres | Valeurs (cm) |
|---|---|
| $T_x$ | -19 |
| $T_y$ | 16 |
| $T_z$ | 90 |
| ${}^{G}P_x$ maximum | 38. |
| ${}^{G}P_y$ maximum | 32. |
| ${}^{G}P_z$ maximum [2] | 6. |

Tableau 5.2: Valeurs des paramètres du banc d'essai pour le calcul du décalage maximal dû à la projection

Les décalages maximaux pour le banc d'essai, dans le pire des cas, sont:

$$\left|{}^{G}D_{P_x}\right| maximale = 1.3cm$$

$$\left|{}^{G}D_{P_y}\right| maximale = 1.1cm$$

.

## 5.3 Éclairage structuré

Dans la section précédente, le modèle de la caméra a été présenté. Avec une seule caméra et un éclairage diffus, il n'est pas possible de connaître la hauteur des roches. Tout au plus, est-il possible de connaître la position des roches dans le plan du grizzly. En utilisant toujours une seule caméra mais avec un éclairage structuré, il est possible de connaître la hauteur des roches. En utilisant certains éléments du banc d'essai décrit au chapitre 3, un programme a été développé et des essais ont été effectués sur des roches [NH90]. Une brève description du travail réalisé et les résultats obtenus seront présentés dans cette section.

[2] Il s'agit la hauteur maximale des roches ($Hr_{max}$) qui ont été déposées sur le grizzly

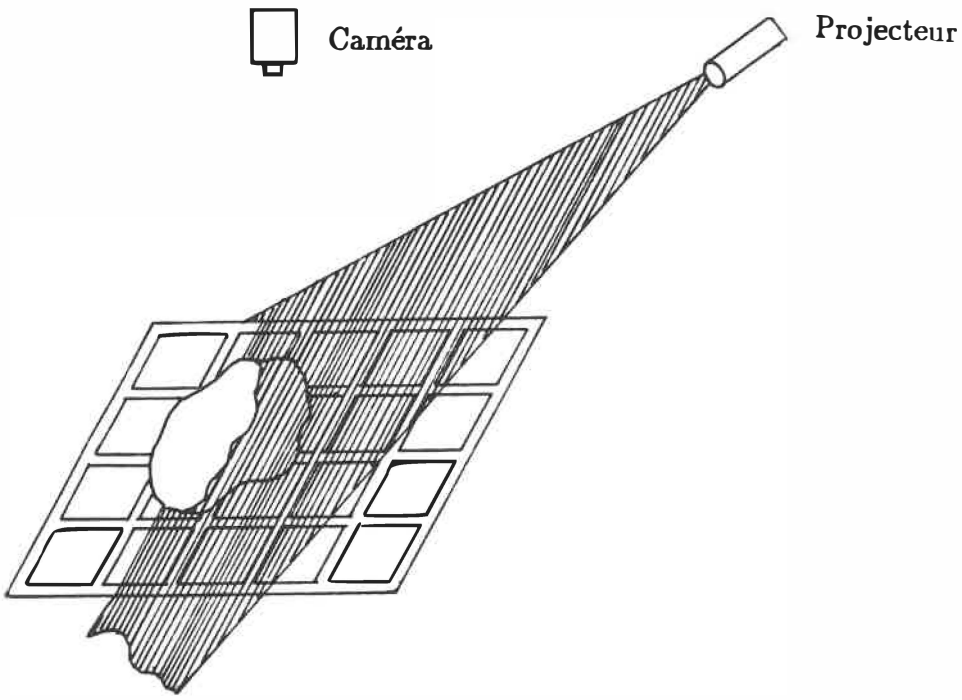



Figure 5.8: Installation utilisée pour l'éclairage structuré

La figure 5.8 montre l'installation utilisée. Un projecteur éclaire la scène d'un plan de lumière. La déformation de la ligne projetée sur la scène rend possible le calcul de la hauteur de la roche par triangulation. Le projecteur est monté sur un plateau tournant, contrôlé par ordinateur, de sorte qu'il est possible de balayer toute la scène avec le plan de lumière.

Le fonctionnement du système est résumé par la figure 5.9. Le système est basé sur la prise d'une image, de son traitement pour extraire les déformations du plan projeté sur la scène et finalement du déplacement du faisceau afin de balayer toute la scène. Il est à noter que le traitement d'images relatif à cette solution est simple et se limite à une binarisation de l'image permettant d'extraire facilement les coordonnées de la ligne. Un tableau de données de type $2\frac{1}{2}$-D est généré en combinant l'information de toutes les lignes traitées.

La figure 5.10 illustre une roche frappée par le plan de lumière tandis que la

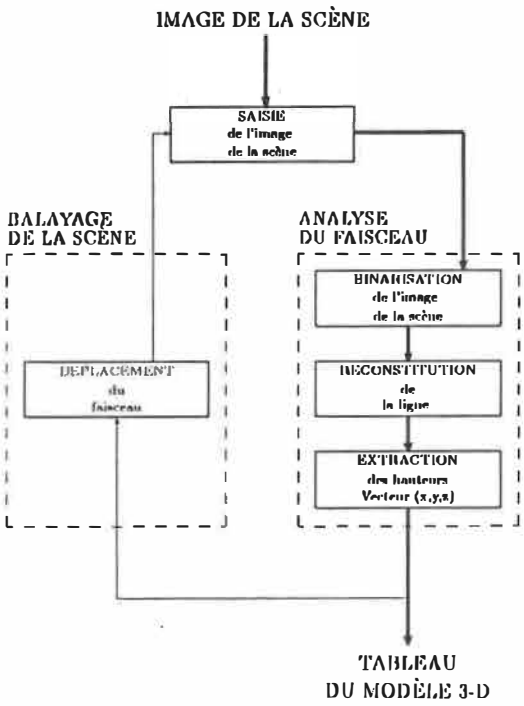



Figure 5.9: Fonctionnement général du système d'éclairage structuré

figure 5.11 montre une reconstruction de la scène suite à un balayage complet de celle-ci.

La précision obtenue est assez bonne compte tenu surtout que les calculs de triangulation sont basés sur des mesures directes des paramètres et qu'aucune calibration n'est effectuée. Celle-ci est de l'ordre de 4% au centre de l'image.

Compte tenu des appareils utilisés pour cette expérimentation, les résultats sur la hauteur des roches sont très satisfaisants. Toutefois des améliorations sont possibles. Ainsi une procédure de calibration avec un modèle complet de la caméra devrait permettre une évaluation plus précise des coordonnées surtout aux limites du grizzly. De plus il serait bon d'utiliser un projecteur plus précis. Comme la distance entre le projecteur et l'endroit où la lumière frappe la scène varie selon l'orientation de celui-ci, il devrait être nécessaire de permettre un ajustement de la mise au point de façon à ce que l'épaisseur du plan de lumière sur la scène soit constant pour toutes les positions

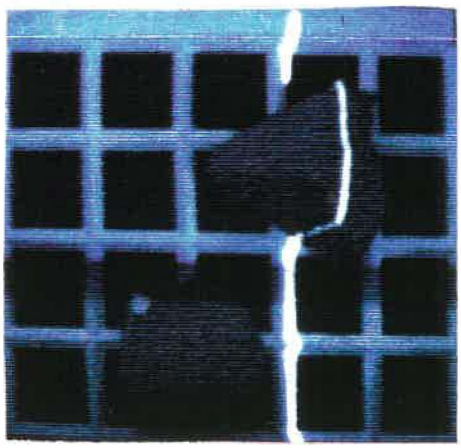


Figure 5.10: Roche frappée par le plan de lumière

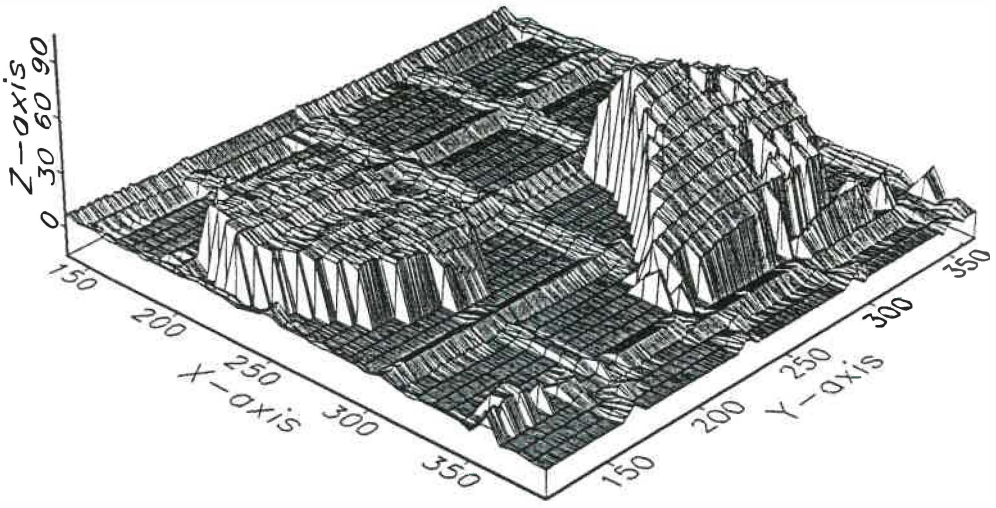



Figure 5.11: Recontruction de la scène suite à un balayage

sur la scène. Dans le cas d'une installation réelle d'un brise-roches, le développement d'un projecteur demendera beaucoup de travail car les distances parcourues par le plan de lumière sont beaucoup plus grandes, entraînant beaucoup de contraintes.

Ayant la hauteur des objets, la détection du contour d'une roche est, comparativement à la vision passive, plus facile à faire. Toutefois selon l'angle du projecteur, le contour de certaines roches ne pourra être déterminé avec précision. De plus l'information de hauteur de certaines zones de la roche ne sont pas disponibles étant donné que ces zones sont dans l'ombre. Une des difficultés de cette approche est de déterminer les positions du projecteur et de la caméra afin d'obtenir le maximum d'informations sur la scène. Toutefois, puisque l'information sur la hauteur des roches est disponible, l'éclairage structuré fourni donc une solution plus complète que la vision passive.

Dans le reste de ce chapitre nous décrirons une stratégie permettant d'extraire la hauteur des roches, au moins en certains points en utilisant uniquement la vision passive sans avoir recours à l'éclairage structuré.

## 5.4 Stratégie d'inspection

Cette section a pour but d'expliquer la stratégie développée pour l'inspection tactile des roches, après avoir trouvé celles-ci par traitement d'images. Cette stratégie se résume en trois étapes principales qui seront décrites en détails dans les sous-sections qui suivent. La première étape, qui est *l'extraction des points de recherche*, permet, à partir de la connaissance du contour d'une roche, de déterminer des points de recherche de la roche. Les coordonnées de ces points de recherche, qui sont à prime abord connues dans l'image, sont par la suite calculées dans le référentiel du grizzly. La deuxième étape consiste à diriger le robot au dessus des points de recherche calculés et de le descendre tranquillement vers la roche jusqu'au contact du capteur tactile avec celle-ci. Cette étape est appelée le *positionnement automatique*. Une *mise en*

*commun de l'information* comme dernière étape a pour but, tout d'abord de calculer la hauteur de la roche à partir de la connaissance de la position du robot et ensuite, de regrouper l'information disponible sur toute une roche. Un cycle complet de la stratégie est montré à la figure 5.12.

### 5.4.1 Extraction des points de recherche pour les roches

Un certain nombre de points caractéristiques, les points de recherche furent définis à la section 3.5.2 et sont montrés à la figure 3.10.

#### 5.4.1.1 Choix des points de recherche

La fonction de ces points est de permettre la connaissance de la hauteur des roches en un certain nombre de points de celles-ci. En regroupant ces points, il est possible de connaître approximativement l'état de la surface de la roche. Évidemment plus ces points sont nombreux, meilleure sera l'évaluation de la surface des roches. Toutefois un grand nombre de points a pour conséquence de ralentir considérablement le traitement. Le temps requis pour le déplacement du robot d'un point de recherche à l'autre en touchant à la surface de la roche est relativement long, plus de 20 secondes. Dans le cadre de ce projet, on s'est limité à un nombre minimal de points, nous permettant d'avoir qu'une connaissance très approximative de la surface de la roche. Nous verrons plus loin dans ce chapitre, que le manque de précision dans le déplacement du Rhino et la faible vitesse de de celui-ci nous limitait passablement. Il faut noter également, que le fait de toucher à la roche peut entraîner le déplacement de celle-ci. Les chances de déplacement augmentant avec le nombre de contact, il n'est pas nécessairement avantageux d'avoir un grand nombre de points de contact. En effet, une fois que le roche est déplacée, comme il n'est pas possible de connaître le mouvement de celle-ci, toute l'information, tant visuelle que tactile, est modifiée et

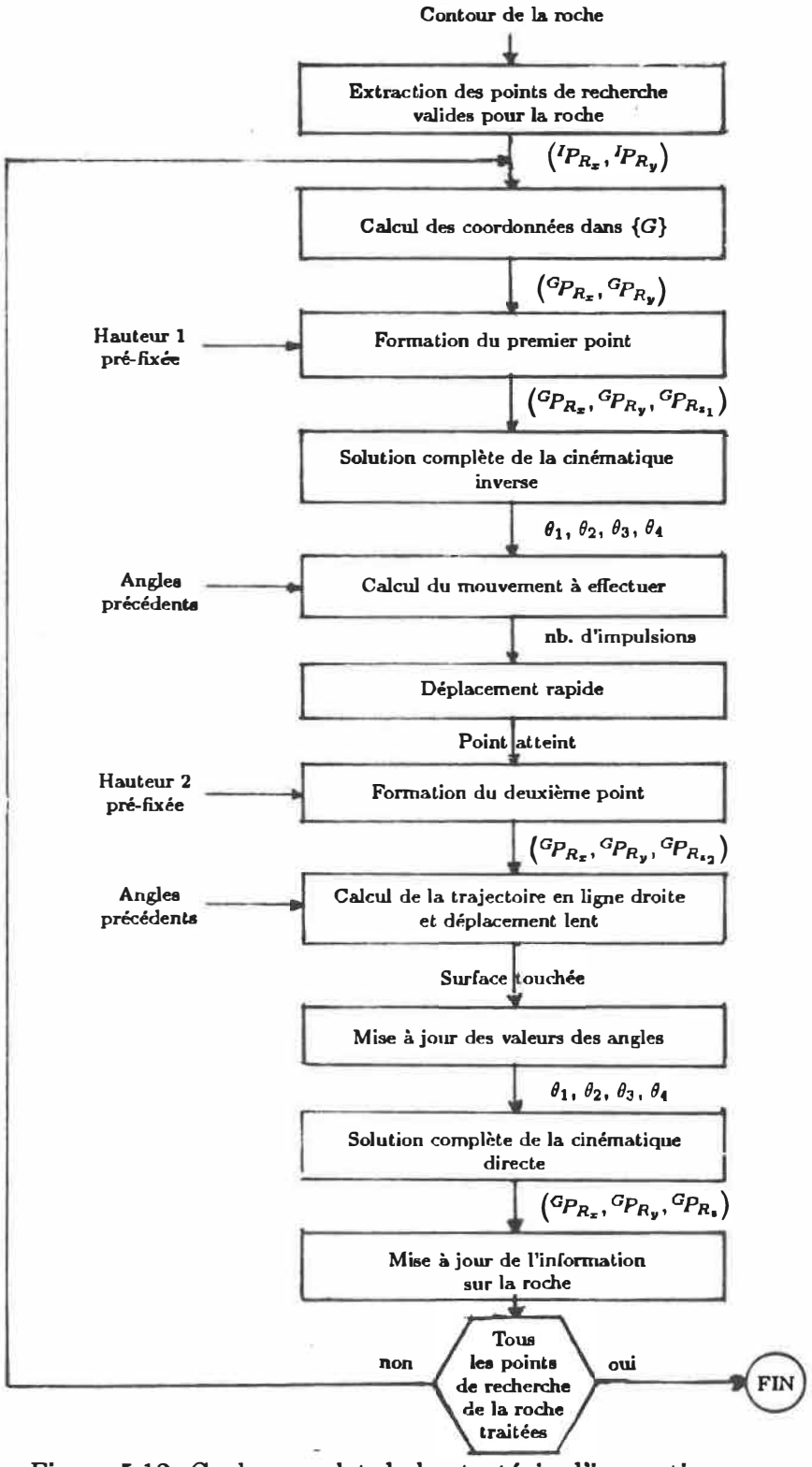



Figure 5.12: Cycle complet de la stratégie d'inspection

un nouveau traitement est requis.

Deux approches étaient possibles afin de déterminer des points de recherche sur une roche. La première approche est basée sur le fait que les endroits où l'on veut connaître la hauteur de la roche sont fonction de la roche elle- même. Dans la deuxième approche, les points de recherche sont fixes et ne sont pas fonction de la roche. Dans ce projet on a utilisé un patron de points fonction du grizzly mais indépendant des positions et des formes des roches trouvées. Cette approche a l'avantage d'être fort simple puisqu'elle évite d'analyser la forme des roches afin de déterminer ses points de recherche. Par contre elle a le désavantage d'être artificielle puisqu'elle ne tient pas compte de la forme de la roche et qu'elle ne permet pas d'aller chercher des points vraiment caractéristiques de la roche elle-même. Toutefois le choix de ces points est difficile à faire, d'autant plus que la forme connue de la roche n'est que sa projection dans le plan du grillage ce qui donne peu d'information sur la roche elle-même. Compte tenu des objectifs de ce projet, la deuxième approche, qui est simple, mais qui permet d'obtenir rapidement des résultats, a été retenue. Il est évident que, dans une phase successive à ce projet, qu'il serait bon de choisir des points de recherche plus caractéristiques de chacune des roches.

Finalement le choix du patron des points de recherche repose sur le fait qu'on désirait que ceux-ci soient placés sur les barres du grizzly. Les barres du grizzly représentent les seuls endroits où la roche a la possibilité d'être appuyée. En touchant la roche à ces endoits, il y a moins de chance de créer un mouvement de bascule dans la roche et d'entraîner ainsi son déplacement.

#### 5.4.1.2 Détermination des points de recherche valides pour une roche

Selon la position et la forme des roches bloquées sur le grizzly, seulement un certain nombre des points de recherche de l'ensemble du grizzly auront besoin d'être

inspectés pour connaître la hauteur des roches en ces points. Pour chaque roche, un certain nombre de points de recherche, ceux qui sont vis-à-vis la roche seront extraits. Ces points sont nommés les ***points de recherche de la roche.***

Pour chaque point de recherche, il faut déterminer si ce point est situé à l'intérieur d'une des roches. Étant donné le décalage causé par la projection sur le grizzly, les coordonnées réelles du contour de la roche peuvent être différentes de celles trouvées par le traitement d'images.

La figure 5.13 illustre les deux cas limites pouvant survenir lors du traitement. L'image de la projection de la première roche correspond exactement aux vraies coordonnées limites de la roche. Toutefois pour la deuxième roche, qui possède une hauteur maximale ($Hr_{max}$) au-dessus du grizzly, les coordonnées trouvées par traitement d'image, c'est-à-dire celles qui sont projetées sur le plan du grizzly, sont différentes des coordonnées limites de la roche. Dans le premier cas, pour vérifier si un point de recherche quelconque peut être valide pour la roche, il suffit de vérifier directement si ses coordonnées — qui sont décrites dans le référentiel image — sont situées à l'intérieur des coordonnées trouvées. Dans le cas de la deuxième roche, ce test risque de ne pas être valide puisqu'on se trouve ainsi à vérifier si le point est à l'intérieur de la section $[f - h]$ alors qu'on devrait vérifier que celui-ci est dans la section $[e - g]$.

De façon générale, les roches détectées se situeront entre les deux cas extrêmes présentés ci-haut. Ne connaissant pas la forme de la roche ni sa hauteur, il est donc nécessaire de vérifier les deux situations limites qui pourraient survenir. Ainsi un point de recherche pour être valide pour une roche donnée doit être situé à l'intérieur du contour de la roche trouvée par traitement d'images et ce, pour les deux cas suivants: $1^o$ le contour obtenu est celui correspondant à une roche dont le contour est projeté à une hauteur nulle au-dessus du grizzly et $2^o$ le contour obtenu est celui correspondant à une roche dont son contour est à une hauteur $Hr_{max}$ au-dessus du grizzly.

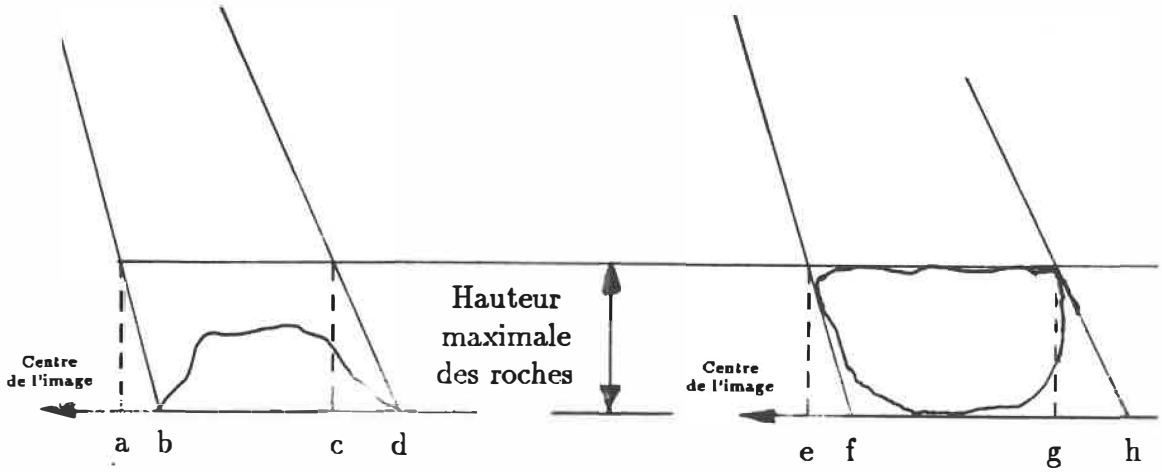



Figure 5.13: Cas limites pour la validité des points de recherche

Les coordonnées du contour de la roche étant connues dans le référentiel de l'image, le test pour les points de recherche est fait plus directement dans ce même référentiel. Il faut donc évaluer les conséquences sur les coordonnées de l'image du décalage causé par la projection. Le décalage maximal défini pour ${}^{G}P_z = Hr_{max}$, peut être décrit dans $\{I\}$ en remplaçant ${}^{G}P_{x_p}$ et $T_x$ des équations 5.34 et 5.35, par leur valeur correspondante dans l'image. Selon la position des référentiels $\{G\}$ et $\{I\}$ définis à la section 5.2.2, ${}^{G}P_{x_p} = F_{C_x}{}^{I}P_x$ et $T_x = F_{C_x}{}^{I}C_x$ et ainsi:

$$ {}^{I}D_{P_x} = F_{C_x}\left({}^{I}P_x - {}^{I}C_x\right)\left[1 - \frac{|T_z - Hr_{max}|}{|T_z|}\right] \tag{5.36} $$

$$ {}^{I}D_{P_y} = F_{C_y}\left({}^{I}C_y - {}^{I}P_y\right)\left[1 - \frac{|T_z - Hr_{max}|}{|T_z|}\right] \tag{5.37} $$

où ${}^{G}P_z$ et $T_z$ sont les seuls paramètres à évaluer. Comme on ne désire qu'une valeur maximale de décalage, des valeurs approximatives de ceux-ci sont suffisantes. On remarque de plus que le décalage est plus important pour les coordonnées du contour qui sont éloignées du centre de l'image.

On désire donc identifier les points de recherche qui respectent les deux conditions établies ci-haut, et ce, à partir d'un ensemble de pixels de l'image qui sont identifiés

comme formant une roche. De plus, pour s'assurer que les points de recherche n'arrivent pas juste sur le coin de la roche, les points de recherche devront être à l'intérieur d'une petite marge de protection $M_P$ du contour de la roche. De cette façon, les risques que le marteau glisse sur le coin de la roche sont éliminés.

Un point de recherche ${}^{I}P_R = \left({}^{I}P_{R_x}, {}^{I}P_{R_y}\right)$ est un point de recherche de la roche si:

1. pour tous les $x$, tels que $\left({}^{I}P_{R_x} - M_P\right) \leq x \leq \left({}^{I}P_{R_x} + {}^{I}D_x + M_P\right)$ les points $\left(x, {}^{I}P_{R_y}\right)$ sont situés à l'intérieur de la roche, où ${}^{I}D_x$ est calculé pour la coordonnée ${}^{I}P_x = {}^{I}P_{R_x}$ et
2. pour tous les $y$, tels que $\left({}^{I}P_{R_y} - M_P\right) \leq y \leq \left({}^{I}P_{R_y} - {}^{I}D_y + M_P\right)$ les points $\left({}^{I}P_{R_x}, y\right)$ sont situés à l'intérieur de la roche, où ${}^{I}D_y$ est calculé pour la coordonnée ${}^{I}P_y = {}^{I}P_{R_y}$.

#### 5.4.1.3 Calcul des coordonnées réelles des points de recherche

Pour les points de recherche d'une roche décrits dans $\{I\}$, il faut maintenant calculer les coordonnées réelles de ces points dans le référentiel $\{G\}$ et obtenir ${}^{G}P_R = \left({}^{G}P_{R_x}, {}^{G}P_{R_y}\right)$. Ce calcul est effectué avec les équations 5.32 et 5.33.

### 5.4.2 Positionnement automatique

Le but final du positionnement automatique est de permettre l'extraction des hauteurs des différents points de recherche des roches en touchant à la roche.

#### 5.4.2.1 Trajectoire utilisée

Pour chaque roche, le robot est dirigé vers chacun de ses points de recherche afin d'extraire la hauteur de chacun de ces endroits. Dans le but de connaître la hauteur de la roche en un point précis $\left({}^{G}P_{R_x}, {}^{G}P_{R_y}\right)$, le robot est d'abord déplacé vers ce point à une hauteur pré-fixée au dessus du grizzly, ${}^{G}P_{R_{z_1}}$. Cette hauteur doit être telle que le robot ne puisse pas toucher aux roches durant son déplacement. Le capteur tactile à cet endroit est dirigé vers le bas avec une orientation (angle $\beta$) de 90 degrés par rapport à l'horizontale. Par la suite le robot est déplacé en ligne droite et de façon lente vers le grizzly, ${}^{G}P_{R_{z_2}}$. Le déplacement du robot est arrêté lorsqu'il touche la surface de la roche au point ${}^{G}P_{R_z}$. Un déplacement lent en ligne droite est ensuite effectué pour ramener le robot au point $\left({}^{G}P_{R_x}, {}^{G}P_{R_y}, {}^{G}P_{R_{z_1}}\right)$ avant de se diriger vers un autre point de recherche.

Pour déplacer le robot à chacun des points spécifiés ci-haut, il est nécessaire de connaître la valeur finale des angles des articulations du robot. Ceci peut être fait en cherchant la *solution complète de la cinématique inverse.* Il faut d'abord former une matrice ${}^{G}\boldsymbol{P}_{R}$ à partir du vecteur ${}^{G}P_{R}$ et de l'orientation désirée. En substituant la matrice ${}^{G}\boldsymbol{P}_{R}$ ainsi formée dans ${}^{G}\boldsymbol{P}_{P}$ de l'équation 5.17, on calcule la matrice ${}^{BR}_{ER}\boldsymbol{T}_{d}$ et on résout cette dernière matrice pour les angles $\theta_1$ à $\theta_4$. La différence entre la position désirée et la position actuelle des angles des articulations du robot est convertie en un nombre d'impulsions par lesquelles le Rhino aura à se déplacer.

#### 5.4.2.2 Déplacements du Rhino

Dans le but d'effectuer les différentes parties de la trajectoire décrite ci- haut, il a fallu développer différentes fonctions pour déplacer le Rhino. Le Rhino est peu évolué au niveau de ses possibilités de déplacement; il faut en effet transmettre le nombre d'impulsions par lesquelles il doit être déplacé. Le déplacement effectué est

du type bang-bang; c'est-à-dire que la commande est appliquée jusqu'au moment où la position est atteinte; le robot ayant bougé du nombre d'impulsions exigé. Il faut noter que dans ce type de commande, le dépassement est important.

La première partie du déplacement, lorsque le robot est déplacé vers le point $\left({}^{G}P_{R_x}, {}^{G}P_{R_y}, {}^{G}P_{R_{z_1}}\right)$, est effectuée en spécifiant au contrôleur le nombre total d'impulsions pour chaque articulation. Il s'agit du déplacement le plus rapide dans le cas du Rhino. Dans ce cas le dépassement peut être assez élevé puisque le robot parcourt généralement une bonne distance et à grande vitesse. Toutefois aucun contrôle n'est possible sur la trajectoire de l'extrémité du robot entre la position initiale et la position finale; celle-ci dépend uniquement du contrôleur du Rhino qui actionne simultanément les moteurs de tous les axes.

Lors du déplacement vers la roche, deux conditions sont imposées: l'extrémité du capteur tactile doit se déplacer en ligne droite et le dépassement doit être minimum afin d'avoir une mesure précise de la hauteur de la roche.

Afin de permettre le déplacement de l'extrémité du Rhino en ligne droite, le programme développé doit générer un ensemble de points vers lesquels le robot doit se diriger, ce qui a pour effet de créer une trajectoire en ligne droite. Afin de réduire le dépassement, les points de la trajectoire sont choisis de façon à ce que le Rhino se déplace que d'une impulsion, pour toutes ses articulations, entre chaque point. Ce déplacement quoique relativement lent permet une bonne précision. On a remarqué également qu'il s'agissait de la manière la plus efficace pour réduire les oscillations du Rhino lors de son déplacement. La figure 5.14 illustre le fonctionnement du déplacement lent en ligne droite.

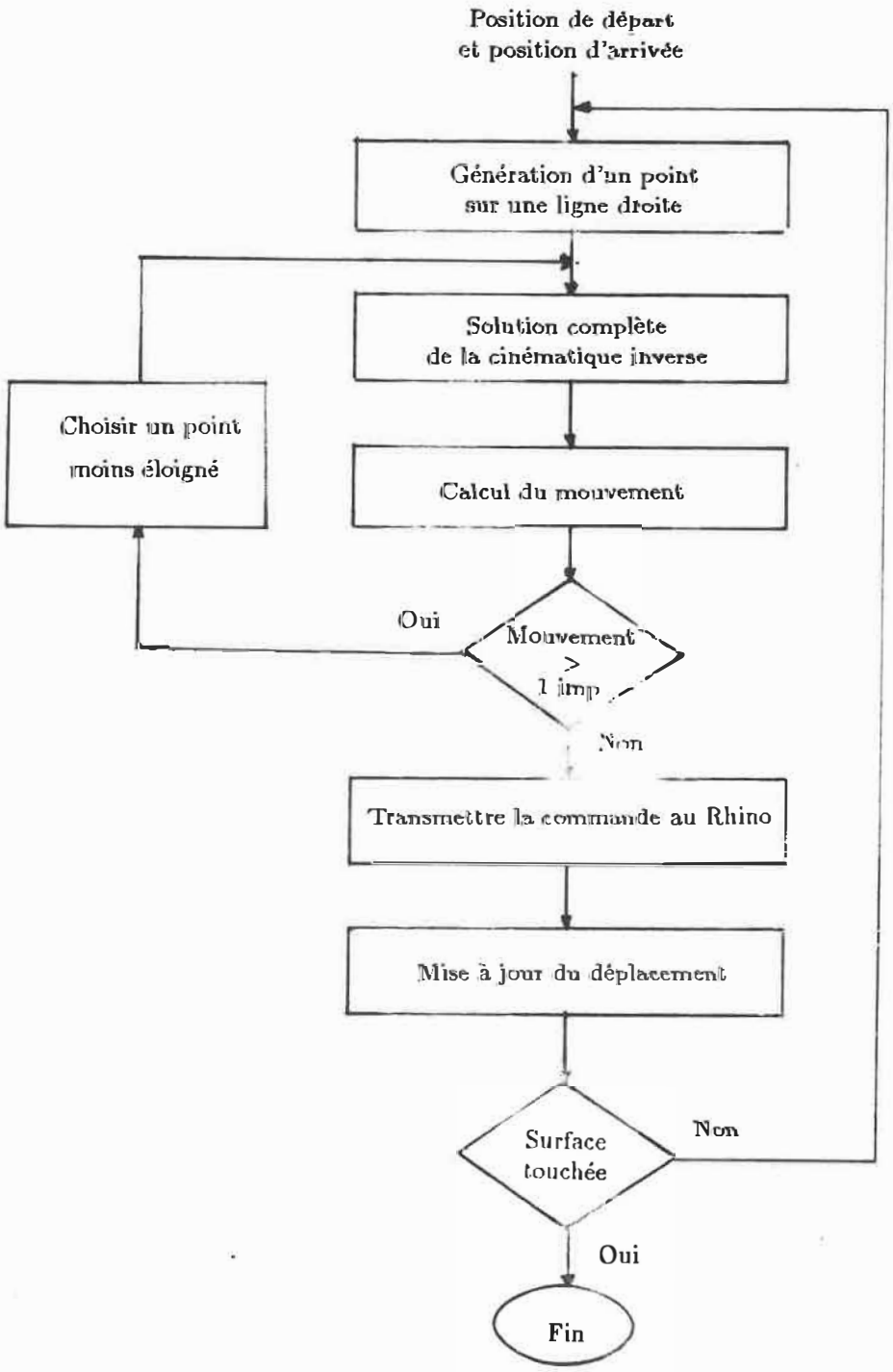



Figure 5.14: Fonctionnement du déplacement lent en ligne droite

### 5.4.3 Mise en commun de l'information

Lorsque le capteur tactile touche la roche, le déplacement du robot est immédiatement arrêté. Lors de ce déplacement chaque impulsion transmise au contrôleur est enregistrée, de sorte que lorsque la roche est touchée, il est possible de connaître le mouvement de chaque articulation par rapport à la position précédente. Les angles de chaque articulation à la position de contact sont ainsi facilement déterminés. Par la suite, la ***solution complète de la cinématique directe*** telle que donnée à l'équation 5.15 permet le calcul de la position et de l'orientation du poussoir par rapport au grizzly, ${}^{G}\boldsymbol{P}_{P}$. Le poussoir, étant enfoncé ($E_P = L_{P_a}$) et touchant alors directement à la roche, la position calculée est en fait la position du point de recherche sur la roche (${}^{G}\boldsymbol{P}_{R} = {}^{G}\boldsymbol{P}_{P}$). Le vecteur $\left({}^{G}P_{R_x}, {}^{G}P_{R_y}, {}^{G}P_{R_z}\right)$ est extrait de la matrice ${}^{G}\boldsymbol{P}_{R}$ et ainsi la hauteur de la roche à ce point est maintenant connue. Les coordonnées calculées du point de recherche le long de l'axe $\hat{X}_G$ et le long de l'axe $\hat{Y}_G$ de même que l'orientation ne devraient pas être différentes des coordonnées déjà calculées puisque le déplacement s'effectue sans modification de ces variables.

Pour chacune des roches sur le grizzly, la hauteur de chacun des points de recherche sera calculée après le guidage du robot vers ces points. La liste des points de recherche de la roche avec leurs coordonnées complètes $\left({}^{G}P_{R_x}, {}^{G}P_{R_y}, {}^{G}P_{R_z}\right)$ est alors complétée. Certains de ces points peuvent être regroupés trois par trois pour former les plans triangulaires de la figure 3.11. La définition de tels plans a pour but de décrire la surface de la roche. Celle- ci est alors approximée par un certain nombre de plans. L'angle d'attaque de la roche peut être déduit à partir de l'orientation du plan; on cherchera par exemple à frapper la surface avec un angle droit.

À la fin de cette étape, une roche de la scène est décrite par son contour, par un certain nombre de points de recherche et si suffisamment de points sont extraits, sa surface est approximée par des plans triangulaires.

Un exemple illustrera l'information obtenue dans la section suivante.

## 5.5 Exemple de fonctionnement

Un exemple du fonctionnement de la stratégie est maintenant présenté.

L'exemple présenté ici est basé sur le cas des deux roches séparées de la figure 4.10 et décrit à la section 4.3.2. Le contour des roches, obtenu par traitement d'images est montré à la figure 4.10d. À partir des coordonnées de la roche dans l'image et en tenant compte de l'effet de la projection et d'une marge de sécurité, 9 points de recherche au total sont validés pour les deux roches. Ces points de recherche sont marqués par des croix blanches à la figure 4.10d. Par la suite les coordonnées de ces points de recherche sont reportées dans le référentiel $\{G\}$. Après le déplacement du robot vers chacun de ces points de recherche et l'exécution des différentes étapes de la stratégie décrite dans la section précédente, la hauteur des roches vis-à-vis chacun des points de recherche est disponible. Une liste des points de recherche avec la hauteur de la roche à cet endroit est créée pour chaque roche. La combinaison de ces points de recherche permet de générer les plans triangulaires de la roche.

La reconstruction des roches telle que bâtie à partir des points de recherche et des plans générés est montrée à la figure 5.15. Le contour des roches projeté sur le plan du grizzly y est également montré. Cette reconstruction est bâti par le programme. Toutefois pour mieux faire ressortir l'aspect des roches, nous avons ajouté des hachures sur les plans de la roche.

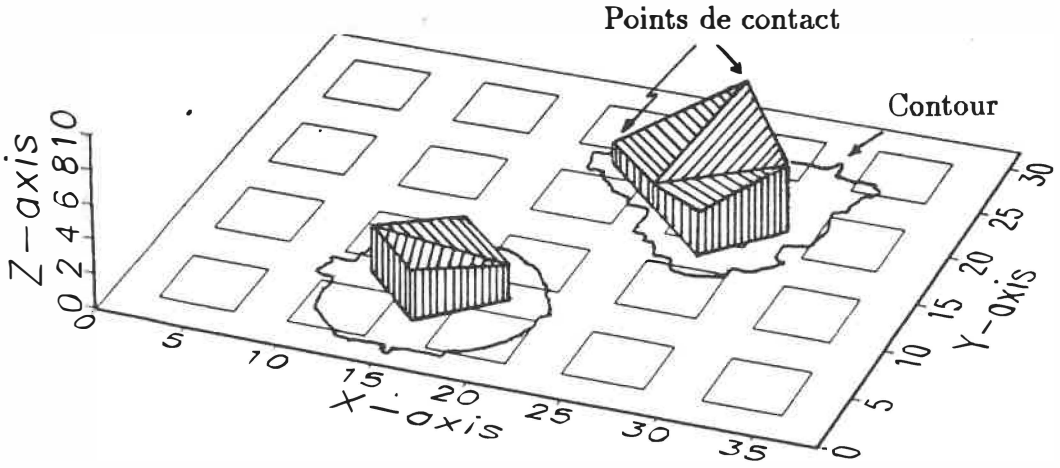



Figure 5.15: Reconstruction de la roche dans référentiel du grizzly

## 5.6 Analyse des résultats

Dans cette section, il sera question des performances de la stratégie développée pour extraire la hauteur des roches en positionnant un capteur tactile monté sur l'extrémité d'un robot. Dans un premier temps, nous analyserons la précision obtenue sur la hauteur ainsi extraite. Dans un deuxième temps, il sera question des problèmes rencontrés lors des expérimentations et les conclusions qu'on peut en tirer.

### 5.6.1 Précision sur la hauteur

Les essais réalisés ont montré que le Rhino atteint un point dans l'espace avec une erreur assez importante et ce pour les trois axes $(\hat{X}_G, \hat{Y}_G, \hat{Z}_G)$. Pour un point donné, l'extrémité du Rhino se situera à l'intérieur d'un rayon de 0.5 cm. autour du point désiré. Deux raisons expliquent ce phénomène. Tout d'abord le Rhino possède un mécanisme peu précis avec des articulations souples. Deuxièmement il faut tenir compte du fait que les mesures des paramètres du modèle global, tant sur le Rhino

que sur les transformations entre la base et le grizzly et les transformations du capteur tactile, proviennent de mesure directe. Étant donné le nombre assez élevé de paramètres ainsi mesurés, de petites erreurs sur chacun de ceux-ci peuvent entraîner une erreur importante lorsque ces paramètres sont groupés pour former le modèle global. Donc il ne faut pas s'attendre à une très grande précision sur la hauteur ainsi obtenue.

Par ailleurs, même en utilisant un modèle simplifié de la caméra et une calibration sans utilisation de tous les paramètres du modèle, les coordonnées réelles d'un point détecté dans l'image sont évaluées avec une erreur d'au plus un millimètre. Cette erreur est nettement inférieure au type d'erreur du robot et du capteur tactile.

### 5.6.2 Problèmes rencontrés

L'expérimentation a permis de faire ressortir un certain nombre de problèmes. Tout d'abord, même si des vérifications sont faites pour s'assurer que le capteur est bien dirigé sur la roche réelle et non sur des parties générées par la projection, il peut survenir des cas où le capteur sera dirigé à côté de la roche. Cette situation survient lorsque la roche a été déplacée entre le traitement d'images et le positionnement actuel du robot sur la roche. Ce déplacement peut avoir été provoqué lors d'un contact précédent avec la même roche mais en un autre point de recherche. La principale difficulté qui peut survenir est que la partie supérieure du capteur tactile ou que les attaches qui le retiennnent au robot vont toucher à la roche; ce qui peut causer le blocage du robot. Une installation éventuelle devra pouvoir traiter ce genre de difficulté en détectant la présence d'un blocage sur le robot.

Le déplacement des roches durant le balayage des points de recherche peut fausser passablement les données obtenues sur la hauteur. Il peut arriver que la roche s'enfonce ou au contraire qu'un faible contact avec le capteur enclenche celui-ci alors

que la roche est peu appuyée sur le grizzly et que, dès qu'un peu plus de pression serait appliquée, elle s'enfoncerait.

Par ailleurs les données obtenues lors des essais sont très éparses et étant donné le peu de précision de celles-ci, il est assez difficile de tirer dans ce cas-ci des conclusions sur la surface de la roche. Comme il a été vu dans la section précédente, la reconstruction de la roche est une approximation très grossière de la roche. Étant donné les difficultés déjà soulignées à la section 5.4.1.1, il n'est pas suggéré d'accroître de beaucoup le nombre de points de recherche sur toute la roche. Toutefois avec un robot plus précis ou mieux calibré, ce genre de stratégie pourrait être efficace pour connaître, sur une surface de faible dimension, l'orientation locale de celle-ci.

En ce qui concerne le temps d'exécution, on a déjà noté que le cycle de la recherche de la hauteur pour un point de recherche est d'environ 20 secondes. Toutefois la moitié de ce temps est requis pour le calcul de la trajectoire. Comme les points de recherche sont connus d'avance et qu'ils sont fixes, la trajectoire de chacun de ces points aurait pu être calculée une seule fois et mémorisée; ce qui aurait réduit de beaucoup le temps pour obtenir la hauteur de plusieurs points de recherche.

## 5.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter la stratégie qui effectue l'inspection tactile des roches après un traitement d'images qui avait fait ressortir le contour des roches. Le but de cette inspection est de déterminer la hauteur des roches en certains points de l'image en effectuant un positionnement automatique du robot sur la roche.

Le positionnement automatique du capteur sur les roches passe par les deux solutions suivantes: 1° la solution complète de la cinématique inverse qui donne les valeurs des angles des articulations d'un robot afin que le capteur tactile puisse atteindre un

point décrit par rapport au grizzly et $2^o$ la solution complète de la cinématique directe qui permet de connaître la position d'un point par rapport au grizzly lorsque le robot a touché à cet objet et que les angles des articulations du robot sont connus.

À partir de la description d'un modèle pour la caméra et le système d'acquisition de l'image, nous avons décrit une manière simple de décrire les coordonnées réelles dans $\{G\}$ de points trouvés dans l'image sans pour autant connaître tous les paramètres du système de vision. Le contour des roches détecté par traitement d'image étant la projection de la roche dans le plan du grizzly, les coordonnées calculées sont différentes des coordonnées réelles. Sachant qu'il est nécessaire dans le cas où on désire aller chercher un point précis sur la scène, de s'assurer que ce point est à l'intérieur de la roche, une relation a été établie pour certifier la validité d'un point de recherche sur la roche. Finalement la stratégie complète a été décrite.

Cette manière d'extraire la hauteur des roches n'est pas tellement précise et comme il s'agit d'une approche à l'aveuglette certains problèmes, comme le déplacement d'une roche, peuvent survenir et causer des erreurs dans l'évaluation de la hauteur. Toutefois la stratégie développée pourrait être utile dans le cas où on désire connaître l'orientation locale de la surface d'une roche. À ce moment-là grâce à une calibration adéquate du robot et du capteur tactile, des mesures précises pourraient être effectuées. Cette approche pourrait compléter la solution de l'éclairage structuré, dont nous avons présenté des résultats dans ce chapitre, en donnant des informations sur des parties de la roche qui ne peuvent être traitées par l'éclairage struturé.

# Chapitre 6

# Conclusion

## 6.1 Résumé et apports du mémoire

Ce mémoire a permis de présenter les différents capteurs permettant la détection et la localisation des roches sur le grizzly. Parmi les solutions retenues, certaines comme les capteurs de distance, la vision stéréo et l'éclairage structuré, permettent d'obtenir une information assez complète, de type $2\frac{1}{2}$-D, sur les roches déposées sur le grizzly. Toutefois pas une de ces méthodes est directement disponible actuellement pour le cas particulier du brise-roches. Parmi les autres méthodes, la vision passive d'une caméra peut permettre la connaissance uniquement des roches dans le plan du grizzly. L'utilisation de capteurs tactiles ou de présence ne peuvent que déterminer la présence ou non d'une roche de façon ponctuelle.

Dans le cadre de ce projet, un banc d'essai, constitué d'un grizzly en modèle réduit, d'une caméra et d'un robot muni d'un capteur tactile, a été développé afin de permettre l'étude de la détection des roches (amas) et du positionnement automatique d'un brise-roches. En utilisant ces différentes composantes, un programme a été développé. Une première fonction, l'analyse des images, permet de connaître le nombre de roches et leur contour. La deuxième est l'inspection tactile, par laquelle

la hauteur des roches est extraite en certains points caractéristiques, nommés points de recherche, en effectuant un positionnement automatique du robot vers la roche.

L'algorithme de l'analyse d'images est basé sur la soustraction entre l'image du grizzly à traiter — dont on veut savoir si des roches s'y trouvent — et une image mémorisée du grizzly sans roche. Le résultat de cette soustraction est seuillée de façon différente pour les barres du grizzly par rapport aux trous du grizzly car ces parties possèdent des caractéristiques différentes. Comme une certaine zone n'est pas traitée aux limites des trous, un ensemble de règles a été établi pour permettre le regroupement de régions dans des parties voisines. Par le regroupement de différentes régions, des roches ou des amas de roches peuvent alors être reconnus et leur contour extrait.

Des essais, sur des roches isolées et sur des amas de roches, prouvent les capacités de l'algorithme. Cet algorithme est également performant au niveau du temps d'exécution. La principale faiblesse de l'algorithme réside dans le fait que l'information extraite sur les roches est sensible aux variations d'intensité de chacun des pixels de l'image. Quoique ce problème n'est pas critique dans le cadre particulier du grizzly utilisé pour ce projet, une implantation dans des conditions plus difficiles, exigerait de modifier la méthode de segmentation utilisée.

Une stratégie a été présentée pour effectuer l'inspection tactile des roches à partir des informations obtenues sur les roches par traitement d'images. Le but de cette inspection est de déterminer la hauteur des roches en certains points de celle-ci. Pour ce faire, un positionnement automatique du robot a été développé: le robot est déplacé vers la roche, en un point de recherche. À la suite d'un contact avec la roche, la hauteur de la roche à cet endroit est calculée. Les points de recherche pour la roche sont préalablement déterminés à partir du contour de la roche trouvée dans l'image et en tenant compte du fait que l'image de la roche est une projection de celle-ci sur le grizzly.

La réalisation du positionnement automatique a impliqué le développement des modèles cinématiques du Rhino, du capteur tactile et de la caméra. La modélisation complète est effectuée en regroupant les modèles de chacune des composantes du banc d'essai. Dans le cadre d'une implantation réelle, le même modèle pourrait être utilisé.

Ce projet a permis de vérifier le fonctionnement d'un positionnement automatique d'un brise-roches sur les roches à partir des informations obtenues par l'analyse d'images d'une caméra. Même si le déplacement vertical du robot continue d'être fait à l'aveuglette puisque la forme de la roche au-dessus du grizzly n'est pas connue, les données extraites de la vision passive permettent de guider le robot vers la roche, du moins vers des coordonnées dans le plan du grizzly. On a également montré qu'il était possible de connaître la hauteur de certains points d'une roche en utilisant un capteur tactile monté sur le robot.

Étant donné qu'un capteur tactile ou à contact pourrait être facilement monté à l'intérieur du marteau d'un brise-roches, il est raisonnable de croire qu'en utilisant le modèle cinématique approprié au brise-roches, que la détection d'un contact avec la roche et l'extraction de la hauteur seraient réalisables. Toutefois sans utiliser de calibration pour le robot et le capteur tactile, la stratégie d'inspection tactile n'est pas très précise pour extraire la hauteur des roches. On remarquera toutefois que les principales difficultés d'évaluation de la hauteur proviennent du fait que les roches peuvent se déplacer sous l'influence du contact avec le robot.

Même en utilsant des capteurs qui permettent d'extraire la hauteur des roches sur toute la surface du grizzly, il existera toujours des zones qui ne seront pas détectées de même qu'il demeure important de valider, du moins à proximité de la roche, les données du capteur. Dans ce cas nous croyons, d'après les résultats obtenus, qu'un positionnement automatique basé sur l'utilisation d'un capteur tactile semblable à celui développé dans le cadre de ce projet, serait tout indiqué pour positionner le robot sur la roche et qu'il permettrait même d'extraire localement la hauteur et

l'orientation de la roche selon la précision du brise-roches.

## 6.2 Travaux futurs

Les travaux de recherche pour l'automatisation du brise-roches devraient se diriger dans deux domaines:

1. **Détection:** La recherche dans ce domaine s'intéressera à la détection des roches sur le grizzly dans le cas d'une installation réelle. Ce travail peut être fait au niveau de la vision passive où des algorithmes de traitement d'images spécialisés pour la détection des roches doivent être développés. De même au niveau de la vision de type 2 $\frac{1}{2}$-D, qui permet d'extraire directement la hauteur des roches, comme aucun système n'est actuellement disponible commercialement pour l'application du brise-roches, des recherches peuvent être entreprises pour développer un tel capteur. Celui-ci peut reposer sur l'utilisation de la vision stéréo, de l'éclairage structuré ou d'un capteur de distance laser. Pour traiter les données générées par ces capteurs, il faudra consacrer beaucoup d'efforts au développement d'algorithmes pour extraire les informations pertinentes sur les roches dans des domaines relativement récents tels que la segmentation d'images de profondeur pour la reconnaissance de surfaces dans l'image.

2. **Faisabilité et intégration:** Parallèlement aux travaux sur la détection, des recherches doivent être entreprises pour étudier la stratégie permettant d'effectuer les tâches relatives à un brise-roches. Essentiellement on vise ainsi à déterminer la faisabilité d'un brise-roches automatique: à savoir si, selon les informations obtenues des différents capteurs, il est possible de reproduire le travail de l'opérateur tel qu'on le connait. Il faudra déterminer l'intégration des données des différents capteurs et les tâches de la stratégie.

# Bibliographie


[ACH89] R. Akhras, P. Cohen, et R. Hurteau. *Automation of a rockbreaker: state-of-the-art review of robotics systems.* Rapport technique, Le Centre de Développement Technologique de l'École Polytechnique, Juin 1989. Préparé pour Falconbridge Limited.

[BB82] Dana H. Ballard et Christopher M. Brown. *Computer Vision.* Prentice Hall, 1982.

[Bou87] Pierre Boulanger. La vision stéréo. Décembre 1987. Document présenté dans le cadre du cours *Intelligence artificielle: vision par ordinateur.*

[Coh88] Paul Cohen. Traitement numérique d'images. Janvier 1988. Notes de cours.

[Cra86] John J. Craig. *Introduction to Robotics Mechanics & Control.* Addison-Wesley Publishing Compagny, 1986.

[DB87] J. Domey et N. Burtnyk. 3-d vision for robotics and automation. Dans *Proceedings of the Canadian Engineering Centennial Convention*, Montréal, Mai 1987.

[DeS86] Romano M. DeSantis. *Les éléments fondamentaux de la robotique: cinématique, dymamique et commande.* École Polytechnique, 1986.

[DR88] J. Domey et M. Rioux. Three-dimensional vision sensors and their potential applications in mining automation. Dans *Proceedings of the Third Canadian Symposium on Mining Automation*, Montréal, Septembre 1988.

[FGL87] K.S. Fu, R.C. Gonzalez, et C.S.G. Lee. *Robotics: Control, Sensing, Vision, and Intelligence.* McGraw-Hill Book Compagny, 1987.

[Gra86] *Gray Librairy User's Manual.* Coreco Inc., 1986.

[Gra88] *GraphiC 4.1 - Publication Quality Scientific Graphics.* Scientific Endeavors Corporation, 1988.

[HAU87] John Hopcroft, Alfred Aho, et Jeffrey Ullman. *Structures de Données et Algorithmes.* InterEditions, 1987.

[HCNP89] R. Hurteau, P.A. Corbeil, E. Natonek, et A. Piché. Automatisation de l'opération d'un brise-roches par rétroaction visuelle. Dans *Semaine de la technologie minière, colloque sur les équipements miniers*, pages 212–232, Le Centre de recherches minérales, Novembre 1989.

[HCP89] R. Hurteau, P.A. Corbeil, et A. Piché. Automatic positioning of a rock-breaker using vision and a tactile sensor. Dans *International workshop on sensorial integration for industrial robots: architectures & applications*, pages 334–337, Novembre 1989.

[Hor86] Berthold Klaus Paul Horn. *Robot Vision.* The MIT Press, 1986.

[Jar83] R. A. Jarvis. A perspective on range finding techniques for computer vision. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-5(2):122–139, Mars 1983.

[Lab85] *Lab Master: Installation Manual and User's Guide.* Scientific Solutions Inc., 1985.

[MM83] William D. McFarland et Robert W. Mclaren. Problems in three-dimensional imaging. Dans *Proceedings of the Third International Conference on Robot Vision and Sensory Controls*, pages 131–140, 1983.

[NH90] E. Natonek et R. Hurteau. *Détermination des profils et de la localisation de roches en utilisant le traitement d'image en éclairage structuré.* Rapport technique, École Polytechnique de Montréal, 1990. À paraître.

[Ocu86] *Oculus-200 User's Manual.* Coreco Inc., 1986.

[Pau81] Richard P. Paul. *Robot Manipulators: Mathematics, Programming, and Control.* The MIT Press, 1981.

[Pav78] Theodosios Pavlidis. A minimum storage boundary tracing algorith and its application to automatic inspection. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-8(1):66–69, Janvier 1978.

[RK82] Azriel Rosenfeld et Avinash C. Kak. *Digital Picture Processing.* Volume 1, Academic Press, deuxième edition, 1982.

[SS89] Neelima Shrikhande et George Stockman. Surface orientation from a projected grid. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-11(6):650–657, Juin 1989.

[Tsa87] Roger Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras and lenses. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-3(4):323–344, Août 1987.

[WA88] Y.F. Wang et J.K. Aggarwal. An overview of geometric modeling using active sensing. *IEEE Control Systems Magazine*, 8(4):5–13, Juin 1988.

[WMA87] Y.F. Wang, A. Mitiche, et J.K. Aggarwal. Computation of surface orientation and structure of objects using grid coding. *IEEE Transactions on*

*Pattern Analysis and Machine Intelligence*, PAMI-9(1):129–137, Janvier 1987.

[XR 86] *XR Series Robot Owner's Manual.* Rhino Robots Inc., 1986.

# Annexe A

# Cinématique du Rhino XR-1

Cette annexe vise à décrire la cinématique du Rhino XR-1. La première section couvre la cinématique directe tandis que la cinématique inverse se trouve dans la deuxième section.

## A.1 Cinématique directe

La transformée qui permet de décrire l'extrémité du Rhino par rapport à sa base, est définie par le produit des matrices suivantes:

$$ {}^0_5T = {}^0_1T\ {}^1_2T\ {}^2_3T\ {}^3_4T\ {}^4_5T \tag{A.1} $$

En utilisant les paramètres du tableau 5.1, on peut calculer les transformations individuelles de chaque segment en substituant ces paramètres dans l'équation 5.1. On obtient donc:

$$ {}^0_1T = \begin{bmatrix} c\theta_1 & -s\theta_1 & 0 & 0 \\ s\theta_1 & c\theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{A.2} $$

$$ {}^{1}_{2}T = \begin{bmatrix} c\theta_2 & -s\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -s\theta_2 & -c\theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{A.3} $$

$$ {}^{2}_{3}T = \begin{bmatrix} c\theta_3 & -s\theta_3 & 0 & L_{Rb} \\ s\theta_3 & c\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{A.4} $$

$$ {}^{3}_{4}T = \begin{bmatrix} c\theta_4 & -s\theta_4 & 0 & L_{Ra} \\ s\theta_4 & c\theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{A.5} $$

$$ {}^{4}_{5}T = \begin{bmatrix} c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & & 1 & 0 \\ -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{A.6} $$

En effectuant le produit de ces matrices selon l'équation A.1, on obtient la matrice de transformation:

$$ {}^{5}_{0}T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{A.7} $$

avec les paramètres suivants:

$$ n_x = c_1\, c_{234}\, c_5 + s_1\, s_5 \tag{A.8} $$

$$ n_y = s_1\, c_{234}\, c_5 - c_1\, s_5 \tag{A.9} $$

$$ n_z = -\, s_{234}\, c_5 \tag{A.10} $$

$$o_x = -c_1\,c_{234}\,s_5 + s_1\,c_5 \tag{A.11}$$

$$o_y = -s_1\,c_{234}\,s_5 - c_1\,c_5 \tag{A.12}$$

$$o_z = s_{234}\,s_5 \tag{A.13}$$

$$a_x = -c_1\,s_{234} \tag{A.14}$$

$$a_y = -s_1\,s_{234} \tag{A.15}$$

$$a_z = -c_{234} \tag{A.16}$$

$$p_x = L_{Ra}\,c_1\,c_{23} + L_{Rb}\,c_1\,c_2 \tag{A.17}$$

$$p_y = L_{Ra}\,s_1\,c_{23} + L_{Rb}\,s_1\,c_2 \tag{A.18}$$

$$p_z = -L_{Ra}\,s_{23} - L_{Rb}\,s_2 \tag{A.19}$$

où $c_1$ est la forme abrégée de $\cos\theta_1$, $s_1$ celle de $\cos\theta_1$, $c_{234}$ celle de $\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)$ et ainsi de suite.

Dans le cas où le 5$^e$ joint du Rhino (l'axe de rotation de la pince) n'est pas utilisé, on pose $\theta_5 = 0$. La matrice de transformation du référentiel de l'extrémité du Rhino à sa base ainsi obtenue est:

$$\overset{BR}{ER}T = \overset{4}{0}T = \begin{bmatrix} c_1\,c_{234} & s_1 & -c_1\,s_{234} & L_{Ra}\,c_1\,c_{23} + L_{Rb}\,c_1\,c_2 \\ s_1\,c_{234} & -c_1 & -s_1\,s_{234} & L_{Ra}\,s_1\,c_{23} + L_{Rb}\,s_1\,c_2 \\ -s_{234} & 0 & -c_{234} & -L_{Ra}\,s_{23} - L_{Rb}\,s_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{A.20}$$

## A.2 Cinématique inverse

Nous présenterons la solution générale de la cinématique inverse du Rhino, c'est-à-dire en considérant les cinq degrés de liberté de celui-ci. Dans le cas particulier de cette application, où quatre des cinq articulations sont utilisées, on ne tiendra pas compte de la solution trouvé pour le 5$^e$ joint.

Soit $\overset{5}{0}T_d$ étant la position et l'orientation désirée de l'extrémité du robot par

rapport au référentiel de la base mises sous forme matricielle, on désire résoudre l'équation suivante:

$$
\begin{aligned}
{}^{5}_{0}T_{d} &= {}^{0}_{1}T\,{}^{1}_{2}T\,{}^{2}_{3}T\,{}^{3}_{4}T\,{}^{4}_{5}T && \text{(A.21)}\\
&= {}^{5}_{0}T && \text{(A.22)}
\end{aligned}
$$

où ${}^{5}_{0}T$ est donnée par les équations A.7 à A.19. En égalisant les termes de chaque côté, on obtient:

$$
\begin{aligned}
n_{x_d} &= c_1\,c_{234}\,c_5 + s_1\,s_5 && \text{(A.23)}\\
n_{y_d} &= s_1\,c_{234}\,c_5 - c_1\,s_5 && \text{(A.24)}\\
n_{z_d} &= -\,s_{234}\,c_5 && \text{(A.25)}\\
o_{x_d} &= -\,c_1\,c_{234}\,s_5 + s_1\,c_5 && \text{(A.26)}\\
o_{y_d} &= -\,s_1\,c_{234}\,s_5 - c_1\,c_5 && \text{(A.27)}\\
o_{z_d} &= s_{234}\,s_5 && \text{(A.28)}\\
a_{x_d} &= -\,c_1\,s_{234} && \text{(A.29)}\\
a_{y_d} &= -\,s_1\,s_{234} && \text{(A.30)}\\
a_{z_d} &= -\,c_{234} && \text{(A.31)}\\
p_{x_d} &= L_{Ra}\,c_1\,c_{23} + L_{Rb}\,c_1\,c_2 && \text{(A.32)}\\
p_{y_d} &= L_{Ra}\,s_1\,c_{23} + L_{Rb}\,s_1\,c_2 && \text{(A.33)}\\
p_{z_d} &= -\,L_{Ra}\,s_{23} - L_{Rb}\,s_2 && \text{(A.34)}
\end{aligned}
$$

où $c_1$ est la forme abrégée de $\cos\theta_1$, $s_1$ celle de $\cos\theta_1$, $c_{234}$ celle de $\cos(\theta_2+\theta_3+\theta_4)$ et ainsi de suite.

En multipliant l'équation A.32 par $s_1$ et l'équation A.33 par $c_1$ et en soustrayant les résultats, on obtient:

$$p_{x_d} s_1 - p_{y_d} c_1 = 0 \tag{A.35}$$

et ainsi

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{p_{y_d}}{p_{x_d}}\right). \tag{A.36}$$

De l'équation A.29 on tire que $s_{234} = -a_{x_d}/c_1$ et de A.31 on a $c_{234} = -a_{z_d}$. En combinant ces deux équations, on obtient:

$$\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = \arctan\left(\frac{-a_{x_d}}{-a_{z_d}}\right). \tag{A.37}$$

Si $s_{234} \neq 0$, avec les équations A.25 et A.28, on trouve:

$$\theta_5 = \arctan\left(\frac{o_{z_d}}{n_{z_d}}\right) \quad \text{si } s_{234} \neq 0. \tag{A.38}$$

Mais si $s_{234} = 0$, alors le Rhino est dans sa position verticale et on a $\theta_2 + \theta_3 + \theta_4 = 0$, $\pm n\pi$ de même que $c_{234} = \pm 1$. A partir des équations A.23 et A.26, on a:

$$n_{x_d} = \pm c_1 c_5 + s_1 s_5 = \cos(\theta_1 \mp \theta_5) \quad \text{et} \tag{A.39}$$

$$o_{x_d} = \mp c_1 s_5 + s_1 c_5 = \sin(\theta_1 \mp \theta_5), \tag{A.40}$$

En combinant ces deux équations, on trouve:

$$\theta_1 \mp \theta_5 = \arctan\left(\frac{o_{x_d}}{n_{x_d}}\right) \tag{A.41}$$

et finalement,

$$\pm\theta_5 = \theta_1 - \arctan\left(\frac{o_{x_d}}{n_{x_d}}\right) \quad \text{si } s_{234} = 0 \tag{A.42}$$

En se servant des équations A.32 et A.33, on peut montrer que:

$$c_1 p_{x_d} + s_1 p_{y_d} = L_{Ra} c_{23} + L_{Rb} c_2 = \phi \tag{A.43}$$

et à partir de l'équation A.34, on pose:

$$-p_{z_d} = L_{Ra} s_{23} + L_{Rb} s_2 = \psi, \tag{A.44}$$

où $\phi$ et $\psi$ sont des quantités connues. En combinant ces deux dernières équations, on peut montrer que:

$$\phi^2 + \psi^2 = L_{Ra}^2 + L_{Rb}^2 + 2L_{Ra}L_{Rb}c_3 \tag{A.45}$$

et ainsi obtenir:

$$c_3 = \frac{\phi^2 + \psi^2 - L_{Ra}^2 - L_{Rb}^2}{2L_{Ra}L_{Rb}} \quad \text{où } -1 \leq c_3 \leq 1 \tag{A.46}$$

En posant $s_3 = \pm\sqrt{1 - c_3^2}$, $\theta_3$ peut être exprimé de la forme suivante:

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{s3}{c3}\right). \tag{A.47}$$

Après substitution de l'équation A.46, on obtient:

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{\sqrt{(2L_{Ra}L_{Rb})^2 - (\phi^2 + \psi^2 - L_{Ra}^2 - L_{Rb}^2)^2}}{(\phi^2 + \psi^2 - L_{Ra}^2 - L_{Rb}^2)}\right). \tag{A.48}$$

En développant les équations A.43 et A.44, on obtient:

$$L_{Ra}(c_2c_3 - s_2s_3) + L_{Rb}c_2 = \phi \quad \text{et} \tag{A.49}$$

$$L_{Ra}(s_2c_3 + c_2s_3) + L_{Rb}s_2 = \psi \tag{A.50}$$

En multipliant l'équation A.49 par $c_2$ et l'équation A.50 par $s_2$ et en additionnant, on obtient:

$$c_2\phi + s_2\psi = L_{Ra}c_3 + L_{Rb} \tag{A.51}$$

En multipliant l'équation A.50 par $c_2$ et l'équation A.49 par $s_2$ et en soustrayant, on obtient:

$$c_2\psi + s_2\phi = L_{Ra}s_3 \tag{A.52}$$

En multipliant l'équation A.51 par $\phi$ et l'équation A.52 par $\psi$ et en additionnant, on obtient:

$$\phi(L_{Ra}c_3 + L_{Rb}) + \psi L_{Ra}s_3 = (\phi^2 + \psi^2)c_2 \tag{A.53}$$

En multipliant l'équation A.51 par $\psi$ et l'équation A.52 par $\phi$ et en soustrayant, on obtient:

$$\psi(L_{Ra}c_3 + L_{Rb}) - \phi L_{Ra}s_3 = (\phi^2 + \psi^2)s_2 \tag{A.54}$$

En combinant ces deux dernières équations, on obtient:

$$\theta_2 = \arctan \begin{pmatrix} \psi(L_{Ra}c_3 + L_{Rb}) - \phi L_{Ra}s_3 \\ \phi(L \quad c \; + L \quad ) + \end{pmatrix} \tag{A.55}$$

# Annexe B

# Résumé des paramètres du modèle global et valeurs associées

Cette annexe regroupe tous les paramètres décrits pour le modèle cinématique complet du brise-roches et donne les valeurs associées à ces paramètres dans le cadre du banc d'essai utilisé.

Le modèle global est entièrement décrit par les paramètres suivants dont les valeurs sont données en cm.

Largeur du grizzly en $\hat{X}_G$ : 38.1

Largeur du grizzly en $\hat{Y}_G$ : 31.9

$F_C$ : est fonction des dimensions de la fenêtre de travail qui sont fixées expérimentalement.

$L_{Pa}$ : 0.15

$L_{Ra}$ : 22.86

$L_{Rb}$ : 22.86

${}^{G}_{BR}T_x$ : -10.8

${}^{G}_{BR}T_y$ : 16.0

${}^{G}_{BR}T_z$ : 19.6

${}^{ER}_{T}T_x$ : 1.05

${}^{ER}_{T}T_y$ : 0.0

${}^{ER}_{T}T_z$ : 19.6

On notera que les valeurs associés aux joints du modèle du Rhino sont données au tableau 5.1.

Les valeurs précédentes doivent être fixées avant de lancer le programme et sont lues par le programme dans le fichier de configuration.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290909 9