UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION D'UN SYSTÈME DE TÉLÉOPÉRATION POUR LE CONTRÔLE À DISTANCE D'UN CHARGEUR-TRANSPORTEUR.

par

Donald LAROCHE

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MINÉRAL (SECTION MINE)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION

DU GRADE DE MAÎTRE ES SCIENCES APPLIQUÉES (M.Sc.A.)

AVRIL 1989

© Donald Laroche 1989

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Canadian Theses Service
Service des thèses canadiennes

Ottawa, Canada
K1A 0N4

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

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 0-315-50212-6

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Ce mémoire intitulé:

DÉVELOPPEMENT ET ÉVALUATION D'UN SYSTÈME DE TÉLÉOPÉRATION POUR LE CONTRÔLE À DISTANCE D'UN CHARGEUR-TRANSPORTEUR.

présenté par: Donald Laroche.

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

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

M. Denis E. Gill ....., Ph.D., président

M. André Piché ....., Ph.D.

M. Richard Hurteau ....., D.Ing.

SOMMAIRE

Ce mémoire porte sur le développement d'un système de téléopération pour un chargeur-transporteur. D'après ce concept, l'opérateur serait situé dans une salle de contrôle et il pourrait, à l'aide d'une assistance visuelle et/ou graphique, télécommander le véhicule pour l'ensemble des opérations de halage.

Après avoir défini la téléopération et ses diverses composantes et avoir évalué son potentiel d'application pour un chargeur-transporteur, des essais en laboratoire furent entrepris à l'aide d'un véhicule expérimental. Ces essais ont également été effectués en souterrain afin de prouver la faisabilité d'utilisation du système de vision. Par la suite, le système fut transposé sur un chargeur-transporteur, ce qui a permis d'en corroborer la faisabilité et d'en évaluer les possibilités d'utilisation.

Malgré les succès obtenus lors des essais, il n'en demeure pas moins que la téléopération effectuée à l'aide d'un système de vision monoscopique est une tâche ardue pour un opérateur. En effet, l'opérateur doit évaluer en tout temps la profondeur de la scène à partir d'une image à deux dimensions, ce qui ralentit le temps de parcours. Pour palier à ce manque d'information, une image graphique du déplacement fut reproduite par ordinateur à l'aide de différents capteurs installés sur le véhicule expérimental.

De plus, certains éléments de télérobotique de bas niveau ont été développés afin de contrer la perte d'information kinesthésique inhérente à la téléopération. Ces éléments consistent en des systèmes anti-collision latérale, frontale ainsi que d'une assistance supplémentaire dans les virages serrés (contrôle dans les virages).

Bien que ces développements furent effectués sur un véhicule expérimental, dans le but de les transposer par la suite sur un chargeur-transporteur, la téléopération peut s'appliquer à tous genres de véhicules miniers. Pour ce faire, un système de communication adéquat entre l'opérateur et l'équipement reste à être développé pour permettre les déplacements du véhicule par téléopération sur de grandes distances.

ABSTRACT

This project is related to the development of a teleoperation system for a LHD (Load Haul Dump). In this concept, the operator is located in a remote control room and he teleoperates the vehicle with the assistance of a vision system and/or a computer control to perform all the mucking operations.

After having defined teleoperation and its potential for application for an LHD, laboratory tests were conducted with an experimental vehicle. Further tests were also performed in a mining environment in order to demonstrate the possibility of transmitting video waves underground. The vision system was tried on a LHD. The success of this experiment has revealed the utilization potential of teleoperation system for underground mining vehicles.

The main difficulty when teleoperating a vehicle is the lack of the third dimension, as a video system comprising a monoscopic camera transmits only a two-dimensional image. Therefore, the operator has to "estimate" the distance between the vehicle and the surrounding obstacles which considerably reduces his efficiency (speed of the vehicle and risk of collision). In order to remedy this problem, the displacement of the vehicle could be represented graphically in real-time. This has been achieved by using sensors and a micro-computer on board the vehicle to continuously calculate its position and by transmitting this information to a control room where the displacement of the vehicle is displayed on

a monitor.

Moreover, some elements of telerobotics have been developed and installed on the experimental vehicle. These developments were done to supply the kinesthetic information the operator is lacking. These elements are front and rear obstacle detection, a lateral collision avoidance system and a system to assist in close curves.

Teleoperation can be applied to all mining vehicles. In order to do so, a communication system between the operator and the vehicle is required. With such a system, teleoperation can be done for all moving vehicles in the mine.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon directeur de recherche: André Piché, directeur du Centre canadien d'automatisation et de robotique minières (CCARM), qui a su me diriger tout au long de mon projet de recherche ainsi que pour la rédaction de ce mémoire.

Ce projet fait partie d'une étude sur le développement d'un système de télécommande et d'un système de guidage pour un chargeur-transporteur subventionnée conjointement par le Centre de technologie Noranda et le Centre de Recherches Minérales. Je tiens donc à remercier ces deux organismes pour les apports financiers.

De plus, je tiens à remercier le personnel du département de génie électrique, plus particulièrement Richard Hurteau et Yves Léonard, pour leur aide lors de la partie expérimentale de ce projet. J'aimerais remercier tout spécialement Guy Chevrette, ingénieur au Centre de technologie Noranda, et qui effectuait ses études de doctorat en génie électrique au début de l'étude.

Les essais en milieu souterrain furent effectués à la Mine Bell de Thetford Mines appartenant à LAB Chrysotile et les Mines Mattabi, Division Lyon Lake appartenant au groupe Minerai Noranda. J'aimerais alors remercier MM André de Guise et Normand Doucet de LAB Chrysotile et MM Craig Emery, Manfred Lengwenus et Mme Dana Williams des Mines Mattabi.

TABLE DES MATIÈRES

Page

SOMMAIRE iv

ABSTRACT vi

REMERCIEMENTS viii

LISTE DES FIGURES xii

LISTE DES TABLEAUX xv

LISTES DES GRAPHIQUES xvi

1. INTRODUCTION 1

1.1 Énoncé du problème 1

1.2 Solutions envisagées 3

2. LA TÉLÉOPÉRATION 7

2.1 Introduction 7

2.2 Définitions 8

2.3 La perception en téléopération pour les véhicules mobiles 11

2.4 Applications connues en téléopération 14

3. DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI 21

3.1 Introduction 21

3.2 Description du véhicule 22

3.3 Description de la station de commande 25

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

3.4 Description des capteurs 26

3.4.1 Les encodeurs optiques 26

3.4.2 Les interrupteurs infra-rouges 28

3.4.3 Les capteurs ultrasons 30

3.4.4 La caméra 34

4. ESSAIS DE TÉLÉOPÉRATION 36

4.1 Essais en laboratoire 36

4.1.1 Introduction 36

4.1.2 Descriptions des essais 36

4.1.3 Présentations des résultats 40

4.1.4 Résumé 50

4.2 Essais en souterrain 52

4.3 Essais sur un chargeur-transporteur 54

5. REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DU DÉPLACEMENT DU VÉHICULE EN TEMPS RÉEL 63

5.1 Généralités 63

5.2 Les informations extérioceptives 64

5.3 Localisation du véhicule par intégration des déplacements 64

5.4 Reproduction du déplacement sur écran cathodique 67

6. MISE AU POINT D'UN SYSTÈME ANTI-COLLISION ET D'ASSISTANCE DANS LES VIRAGES 72

6.1 Introduction 72

TABLE DES MATIERES (suite)

Page

6.2 Système anti-collision frontal 73

6.3 Système anti-collision latéral 75

6.4 Système d'assistance dans les virages 78

7. ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LA TÉLÉOPÉRATION APPLIQUÉE AUX ÉQUIPEMENTS MINIERS 82

7.1 Introduction 82

7.2 Système de communication 84

7.3 Applications du système de vision 86

7.4 Représentation graphique des déplacements 91

7.5 Systèmes d'anti-collisions et d'assistance dans les virages 92

8. CONCLUSION 94

9. RECOMMANDATIONS 98

10.RÉFÉRENCES 100

Annexe 1 106

Annexe 2 115

Annexe 3 127

LISTE DES FIGURES

Page

1.1 Cycle d'un chargeur-transporteur 2

2.1 Schématisation des définitions 10

2.2 Téléopération assistée par ordinateur 12

2.3 Localisation des caméras sur le bras canadien 15

2.4 Poste d'observation à l'intérieur de la navette spatiale .. 15

2.5 Le TROJAN 16

2.6 Poste de contrôle pour le TROJAN 16

2.7 Véhicule terrestre téléopéré, ATTV 17

2.8 Poste de commande du véhicule terrestre, ATTV 18

2.9 Chargement avec caméras situées à l'extérieur du véhicule . 19

2.10 Chargement avec caméras situées à bord du véhicule 20

3.1 Véhicule expérimental 22

3.2 Caractéristiques physiques du véhicule 23

3.3 Station de commande 25

3.4 Localisaiton d'un encodeur optique sur une roue 26

3.5 Principe de l'encodeur optique 27

3.6 Interrupteur infra-rouge 29

3.7 Position des interrupteurs sur le véhicule 29

3.8 Position des capteurs ultrasons sur le véhicule 30

3.9 Principe de fonctionnement d'un capteur ultrason 31

3.10 Diagramme de rayonnement du capteur ultrason 32

LISTE DES FIGURES (suite)

Page

3.11 Réflexion d'un signal sur une surface lisse 33

3.12 Réflexion d'un signal sur une surface rugueuse 34

3.13 Caméra CCD et alimentation Panasonic 35

4.1 Circuit où a eu lieu les essais de téléopération dans les corridors de l'École Polytechnique 37

4.2 Différentes positions de la caméra lors des essais expérimentaux 38

4.3 Ensemble des segments du parcours 43

4.4 Poste de téléopération, Mine Bell 52

4.5 Véhicule expérimental, Mine Bell 53

4.6 Lieu des essais, Mine Bell 54

4.7 Plan du chantier d'essai, Mine Lyon Lake 55

4.8 Installation du système de transmission d'images 56

4.9 Emplacement de la caméra sur le chargeur-transporteur 57

4.10 Schéma et spécifications techniques de l'émetteur 57

4.11 Montage de l'unité de réception 58

4.12 Schéma et spécifications techniques du récepteur 59

5.1 Principe de calcul de la localisation 66

5.2 Représentation graphique du parcours expérimental 68

5.3 Position des balises dans le circuit expérimental 69

LISTE DES FIGURES (suite)

Page

5.4 Principe de calcul de l'orientation du véhicule à l'aide des balises 70

6.1 Position des capteurs ultrasons pour le système anti-collision frontal 74

6.2 Repérage d'un obstacle par les capteurs ultrasons 75

6.3 Position des capteurs ultrasons pour le système anti-collision latéral 76

6.4 Trajectoire d'évitement de collision avec le mur 77

6.5 Situation de virage critique dans un parcours 79

6.6 Différents rayons de courbures possibles pour effectuer un virage 80

7.1 Système de téléopération 83

7.2 Système de communication dans un milieu souterrain 85

7.3 Système de communication dans un réseau de galeries et système de relais 86

7.4 Résultats de manipulations, système de vision monoscopique versus stéréoscopique 90

LISTE DES TABLEAUX

Page

2.1 Interaction homme-machine 14

4.1 Différentes positions de la caméra sur le véhicule lors des essais en laboratoire 39

4.2 Résultats obtenus par chaque opérateur lors des essais en laboratoire 40

4.3 Résultats des essais par segments de parcours 48

4.4 Coûts des composantes du système vidéo 61

LISTE DES GRAPHIQUES

Page

4.1 Résultats obtenus par chaque opérateur lors des essais en laboratoire (temps de parcours) 41

4.2 Résultats obtenus par chaque opérateur lors des essais en laboratoire (nombre de chocs) 41

4.3 Résultats des essais par segments de parcours (segment 1) .. 44

4.4 Résultats des essais par segments de parcours (segment 2) .. 44

4.5 Résultats des essais par segments de parcours (segment 3) .. 45

4.6 Résultats des essais par segments de parcours (segment 4) .. 45

4.7 Résultats des essais par segments de parcours (segment 5) .. 46

4.8 Résultats des essais par segments de parcours (segment 6) .. 46

4.9 Résultats des essais par segments de parcours (segment 7) .. 47

4.10 Résultats des essais par segments de parcours (segment 8) .. 47

Chapitre 1: INTRODUCTION

1.1 Énoncé du problème

L'industrie minière canadienne a grandement besoin d'augmenter sa productivité et de réduire ses coûts de production afin de rester compétitive sur le marché mondial. La hausse des coûts de main d'oeuvre, les gisements à plus grande profondeur et l'incertitude régnant sur le prix des métaux sont les principales causes de cette perte de productivité.

De plus, les conditions de travail dans les mines souterraines sont difficiles. Les mineurs doivent effectuer des tâches répétitives dans un environnement hostile dû aux bruits, aux vibrations, aux poussières, à l'émanation des gaz d'échappement, aux risques d'instabilité des parois rocheuses, etc.

C'est pour ces raisons que l'automatisation des engins miniers offrent de nouvelles avenues afin d'améliorer la productivité et les conditions de travail dans les exploitations minières.

Le transport du minerai constitue une étape importante dans une exploitation minière. Lors de l'apparition des chargeurs-transporteurs, les exploitants ont changé leurs méthodes d'approche pour l'abattage des chantiers. Ces méthodes consistent surtout à abattre le minerai en plus grande quantité (bulk mining) lors des sautages. Ces nouvelles techniques ont pour effet d'ouvrir de plus grandes chambres, ce qui entraîne des risques d'instabilité plus élevés.

Le cycle d'un chargeur-transporteur lors du transport du minerai est illustré à la figure 1.1. Il consiste en des déplacements entre les chantiers et la cheminée à minerai.

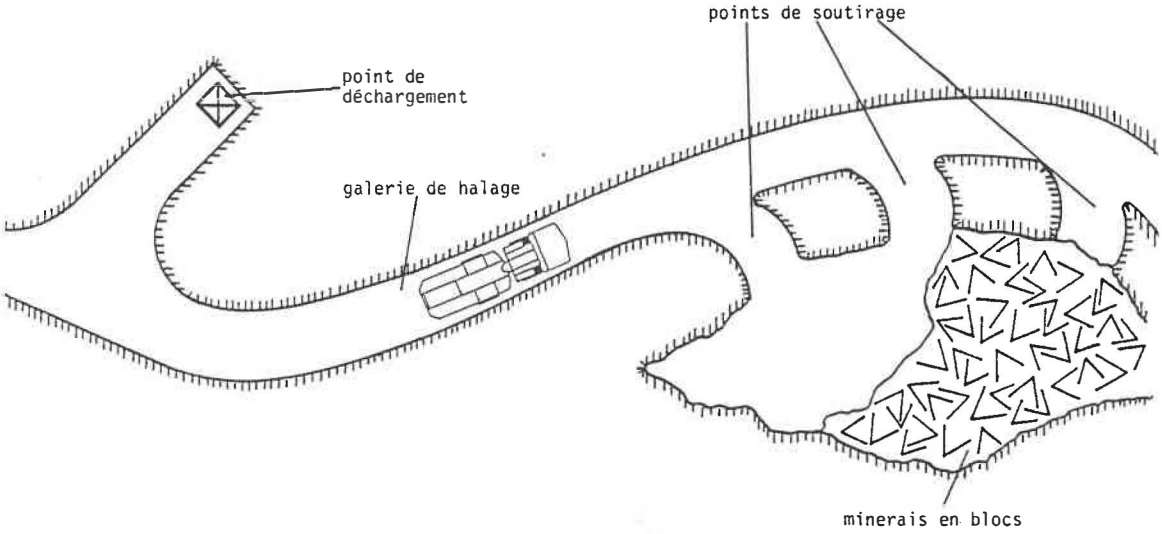


figure 1.1: Cycle d'un chargeur-transporteur.

Lorsque les chambres sont de plus grandes dimensions et plus profondes, il est difficile d'aller récupérer tout le minerai sans

mettre en jeu la sécurité des opérateurs. Une partie du minerai doit alors rester sur place ce qui constitue, dans bien des cas, des pertes qui ne sont pas négligeables. Afin d'augmenter la récupération du minerai dans les chambres ouvertes, un système de télécommande fut développé. L'opérateur demeure à l'extérieur de la chambre dans le point de soutirage et il télécommande le chargeur-transporteur pour effectuer le chargement à distance. Le système de télécommande permet un meilleur taux de récupération du minerai dans les chambres profondes.

Mais il existe certains désavantages à cette technique. L'opérateur a un champ de vision restreint qui se limite à voir l'arrière du véhicule lorsque celui-ci s'éloigne profondément dans la chambre. Il est alors difficile pour l'opérateur de localiser la pile de minerai et de remplir adéquatement le godet au premier essai. De plus, le temps de manoeuvre se trouve augmenté car celui-ci doit descendre du véhicule pour passer au mode télécommandé, effectuer le chargement, et prendre place à nouveau à bord du véhicule pour aller faire la vidange.

1.2 Les solutions envisagées

Afin d'élargir l'utilisation de la télécommande et de réduire les temps morts causés par celle-ci, il faudrait instaurer un système qui permettrait à un opérateur situé dans un endroit plus sécuritaire et plus confortable, d'effectuer le cycle de chargement et transport, c'est-à-dire de charger, déplacer et de vidanger le véhicule sans avoir de contact visuel direct avec le site d'opération. Ce système constitue-

rait la première étape pour l'élaboration d'un chargeur-transporteur semi-autonomatique. Car, lorsque le système automatique tombera en panne dans une galerie ou un chantier, il faudra avoir un système de téléopération qui prendra la relève pour poursuivre les opérations ou retirer l'engin de la mine.

Pour ce faire, il faut donner à l'opérateur des outils supplémentaires qui lui permettraient d'être assisté dans ses fonctions. Dans les cas classiques de téléopération, soit en manipulation, soit pour le déplacement d'un véhicule, des systèmes de caméras monoscopiques ou stéréoscopiques sont utilisés pour donner de l'information à l'opérateur. Ces caméras permettent de visualiser l'environnement et d'exécuter une tâche spécifique.

D'autres techniques, beaucoup moins développées, consistent à fournir des informations graphiques à l'opérateur. Ces informations sont créées à l'aide de données prises dans l'environnement du téléopérateur et traitées par ordinateur. Ces techniques offrent de très grandes possibilités mais elles sont peu exploitées dans des applications concrètes car elles demandent des temps de calculs importants. De plus, la récolte de l'information peut être très ardue.

L'ordinateur peut être aussi utilisé pour guider l'opérateur dans ses manoeuvres et pour restreindre certaines manoeuvres impossibles à réaliser. Cette aide supplémentaire fournie à l'opérateur à pour but d'améliorer ses performances.

Le mémoire est divisé en cinq grands chapitres couvrant diverses techniques de commandes à distance appliquées sur un véhicule expérimental et sur un chargeur-transporteur.

Tout d'abord, le chapitre sur la téléopération permet de définir certains concepts. Il permet aussi de faire une brève revue des applications de téléopération déjà existantes dans plusieurs domaines.

Le chapitre sur la description du banc d'essai décrit le véhicule expérimental et le poste de contrôle utilisés lors de l'expérimentation en laboratoire et en souterrain. Une description des différents capteurs installés sur le véhicule est également donnée.

Le chapitre sur les essais de téléopération présente les différents essais qui ont été effectués en laboratoire et en souterrain ainsi que les résultats obtenus. Ces essais permettent de prouver la faisabilité de la téléopération d'un véhicule à l'aide d'une caméra monoscopique.

La représentation graphique du déplacement du véhicule expérimental est discutée au chapitre 5. Cette représentation est rendu possible grâce à l'utilisation des informations extérioceptives disponibles à bord du véhicule. Cette étape a pour but de faciliter la téléopération en donnant une information supplémentaire à l'opérateur.

Le chapitre 6 donne certaines techniques de contrôle de parcours

par ordinateur. Il s'agit d'un système anti-collision latérale et frontale et un système d'assistance dans les virages.

Le chapitre sur l'évaluation du potentiel de la téléopération appliquée à des équipements miniers discute des possibilités d'application des différentes techniques élaborées dans ce mémoire sur différents engins miniers et plus particulièrement sur un chargeur-transporteur.

Chapitre 2: LA TÉLÉOPÉRATION

2.1 Introduction

Il existe de nombreux domaines où l'homme ne peut intervenir directement sans risquer de mettre en péril sa santé et sa sécurité. Citons comme exemple la manipulation de matériaux radio-actifs, les travaux dans l'espace et au fond des océans, le combat des incendies, les opérations militaires et policières, les chantiers de construction et les exploitations minières.

En vue d'assurer la protection des personnes exposées à travailler dans ces endroits hasardeux, différentes techniques de contrôle à distance ont été mises au point. Ces techniques posent cependant des problèmes sérieux, principalement au niveau de la perception sensorielle et au niveau de la dextérité requise lors de la manipulation d'objets à distance.

2.2 Définitions

De nouveaux termes scientifiques ont fait leur apparition avec ces nouvelles techniques et il est souvent difficile de s'y retrouver. Sheridan [Sheridan 1987] a introduit les définitions suivantes:

La téléopération est l'extension de la perception sensorielle et de la dextérité manuelle d'une personne, en un lieu éloigné d'elle par l'entremise d'un téléopérateur. Cet appareil comprend des capteurs artificiels, un ou des bras manipulateurs, un véhicule pour les transporter, et un système de communication aller-retour avec la personne qui en a le contrôle. La téléopération réfère surtout à des applications où une personne est en contact permanent avec le téléopérateur.

La téléprésence vise idéalement à transmettre suffisamment d'informations en provenance du téléopérateur et de son environnement de telle sorte que la personne qui en a le contrôle à distance ait l'impression d'être physiquement présente sur les lieux.

La robotique est à la fois l'art et la science d'accomplir, par l'entremise d'appareils ou de dispositifs automatiques, des fonctions qui sont normalement attribuées à des êtres humains.

La télérobotique est une forme de téléopération dans laquelle un opérateur humain agit comme superviseur, communiquant par intermittence des informations à un ordinateur sur les buts, les contraintes, les

plans, les imprévus, les hypothèses, les suggestions et les ordres relatifs à une tâche limitée, recevant en retour de l'information sur les accomplissements, les difficultés, les interrogations, et sur demande, les données non-traitées, tandis que le télérobot subordonné exécute la tâche en se basant sur les informations reçues de l'opérateur, sur sa propre connaissance et en appliquant des techniques d'intelligence artificielle.

Finalement, on peut définir la télécommande comme étant un émetteur récepteur radio qui transmet des signaux au moyen d'ondes hertziennes. Ces signaux sont reçus par le téléopérateur qui exécute les commandes transmises. L'émetteur est logé dans un pupitre portatif que l'opérateur utilise pour contrôler le téléopérateur.

La figure 2.1 résume schématiquement les termes téléopération, téléprésence, télérobotique et télécommande.

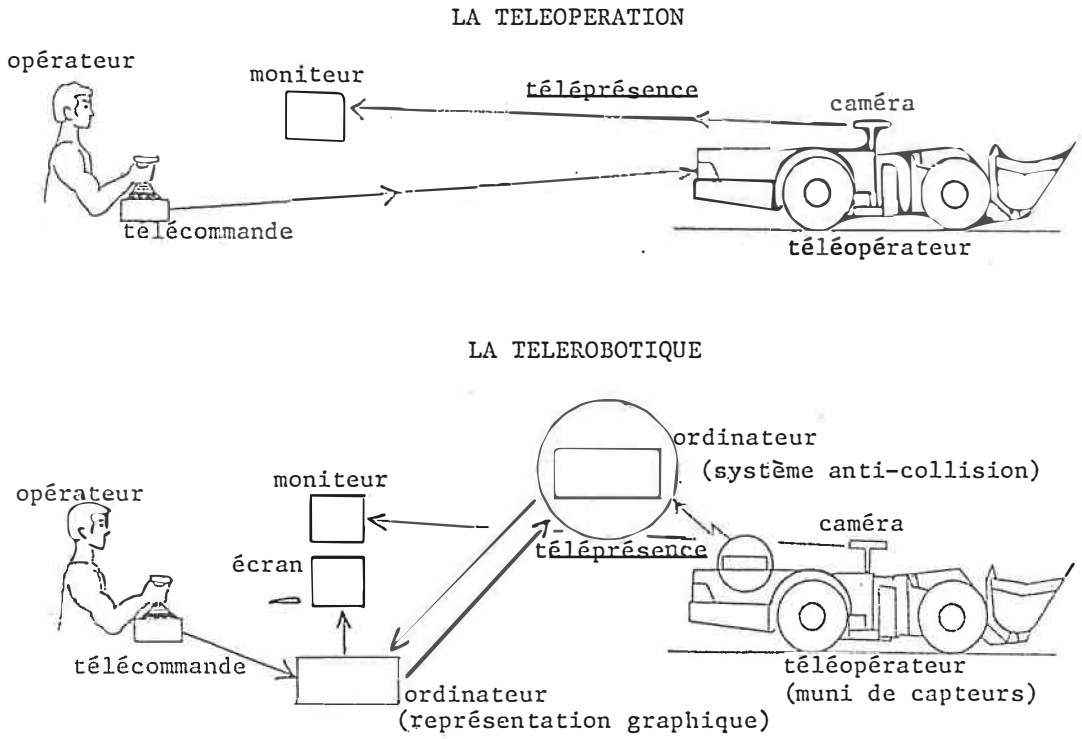


figure 2.1: Schématisation des définitions

En se référant à ces définitions, il apparaît que la téléopération est le terme le plus approprié pour définir l'opération du contrôle à distance d'un chargeur-transporteur dans le cas où l'opérateur ne peut voir le véhicule. Dans ce cas-ci, le chargeur-transporteur est considéré comme le téléopérateur puisque le véhicule est muni de capteurs artificiels (caméra, ultrasons). Le godet et le système de levier hydraulique constituent le système de manipulation; le véhicule est mobile et il y a un système de communication entre l'appareil et l'opérateur. Ceci constitue donc la terminologie que nous utiliserons dans cette étude.

2.3 Notion de perception lors de la téléopération des véhicules mobiles

Le but de la téléopération est d'éloigner l'opérateur de son véhicule lorsque ce dernier doit circuler dans des endroits dangereux. Puisque l'opérateur n'a plus de contact direct avec le véhicule, il faut donc lui fournir les informations dont il a besoin pour contrôler le véhicule à l'aide d'appareils qui pourront pallier à ce manque d'informations sensorielles. Dans ce concept d'interaction homme-machine, quatre types d'assistances peuvent être fournies à l'opérateur: visuelle, tactile, auditive et kinesthésique (sensation du mouvement).

L'information visuelle peut être fournie à l'aide d'une caméra. Dans ce cas, il faut établir le nombre de caméras nécessaires, leur type (monoscopique ou stéréoscopique) et leur position sur le véhicule (avant, arrière, côtés) pour effectuer adéquatement les manoeuvres. Une représentation graphique peut être fournie à l'opérateur. Ceci constitue une autre forme d'information visuelle. En utilisant un écran cathodique, on représente l'environnement dans lequel le véhicule se déplace et on montre son déplacement en temps réel. Cette technique pose toutefois des difficultés au niveau de la cueillette et du traitement des données, ce qui en limitent son utilisation. Elle offre cependant un potentiel d'application intéressant qui mérite d'être examiné plus à fond. Cette information graphique peut aussi donner l'état du véhicule, c'est-à-dire le monitoring du véhicule afin de prévenir ou de détecter des bris.

L'information tactile est fournie par des télémètres à bord du véhicule tels les capteurs ultrasons. Ils permettent d'évaluer la distance des obstacles environnants.

Dans ce cas, l'utilisation d'un ordinateur au poste de commande et d'un autre à bord du véhicule devient essentielle. La téléopération assistée par ordinateur permet de relever les informations proprioceptives et extéroceptives, de les traiter s'il y a lieu et de les présenter à l'opérateur d'une façon adéquate afin qu'il puisse prendre les meilleures décisions. La figure 2.2 montre un schéma fonctionnel de la relation entre l'opérateur (maître) et le téléopérateur (esclave).

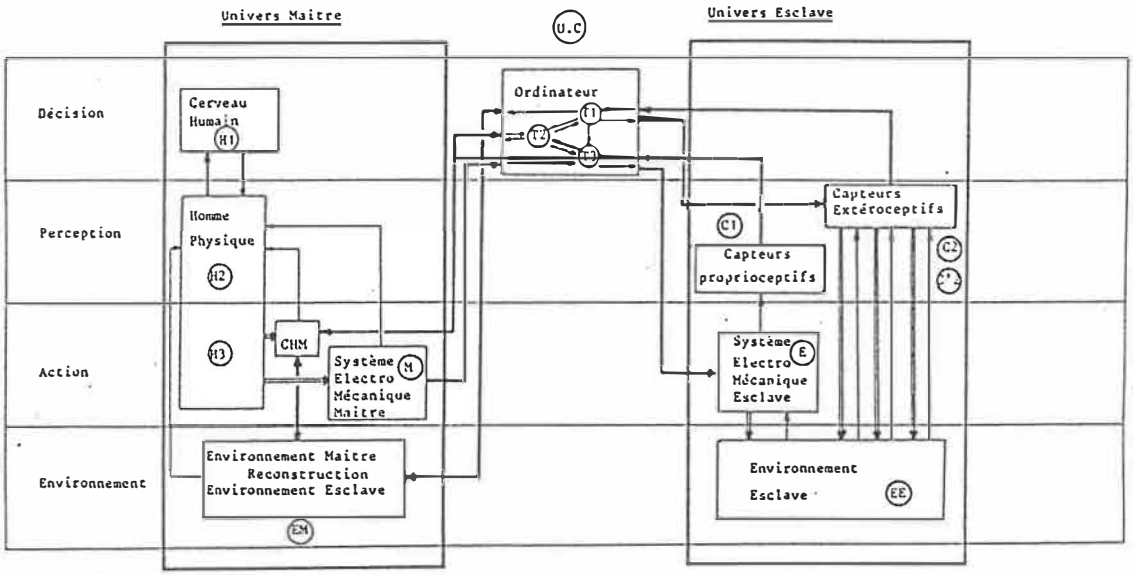


Figure 2.2: Téléopération asssitée par ordinateur [ESPIAU 1984].

L'information auditive peut être captée à l'aide d'un microphone. Elle peut être très utile pour aider l'opérateur à évaluer la performance de sa machine (puissance dégagée par le moteur) et à en obtenir ainsi une meilleure utilisation en réduisant les bris et en évitant les fausses manoeuvres, ou en détectant un mauvais fonctionnement du moteur.

L'information kinesthésique a pour but de permettre à l'opérateur d'éprouver les sensations de mouvement de son corps telles qu'il les ressentirait s'il était à bord de son véhicule. Cette information est difficilement transmissible à distance mais elle peut être compensée par un système anti-collision ou par un système de retour de forces sur les commandes. Dans certains cas, la perte de l'information kinesthésique peut être comblée par un système permettant de reproduire une sensation d'attraction vers une cible ou de répulsion face à un obstacle, sur la télécommande.

Le tableau 2.1 nous montre le type d'information transmise et les moyens de transmission disponibles lors d'une interaction homme-machine.

Perception directe	Type d'information	Exemples de capteurs	Contact indirect
. visuelle	. environnement . véhicule	. caméra . encodeurs optiques	. moniteur . information graphique
. tactile	. objets	. capteurs ultrasons	. information graphique
. sonore	. état du véhicule	. microphone . jauge à pression d'huile	. haut-parleur . monitoring
. kinesthésique	. manoeuvre	. jauge à pression d'huile	. systèmes anti-collision . retour de force

Tableau 2.1: Interaction homme-machine

2.4 Applications connues de la téléopération

Il existe plusieurs exemples d'application de la téléopération, tout particulièrement dans le domaine de l'aérospatiale, du milieu sous-marin et des véhicules terrestres surtout utilisés pour fin militaire.

L'application sans doute la plus connue est le bras manipulateur canadien, utilisé à bord des navettes spatiales américaines [Brown 1976]. Dans ce cas-ci, trois caméras sont nécessaires: deux à l'intérieur de la navette, près de la base du bras, et une à l'extrémité du bras (figure 2.3). L'opérateur peut également avoir une vue directe du bras à partir d'une fenêtre d'observation située à l'intérieur de la

cabine de pilotage (figure 2.4). Le bras est commandé à l'aide d'une télécommande et les images perçues par les caméras sont transmises à deux moniteurs localisés au poste de contrôle. Beaucoup de recherches s'effectuent dans le domaine de la téléopération spatiale [HEER 1978]. Elles ont toutes pour but de fournir une assistance accrue à l'opérateur de façon à augmenter son rendement et la précision des manipulations.

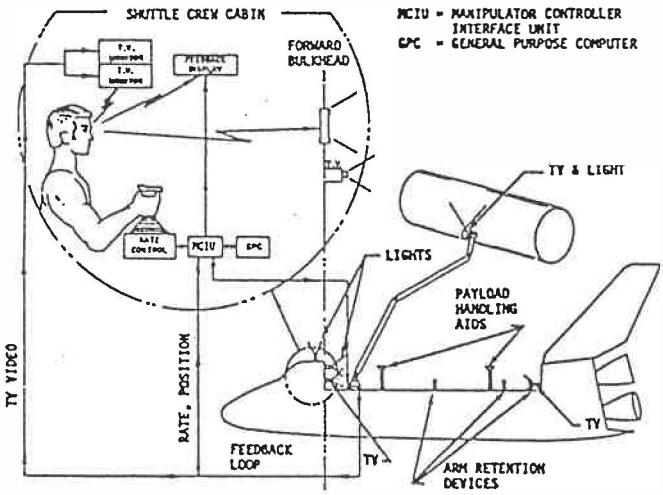


Figure 2.3: Localisation des caméras sur le bras canadien

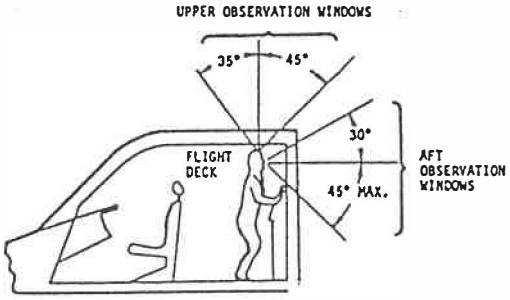


Figure 2.4: Poste d'observation à l'intérieur de la navette spatiale.

Dans le domaine sous-marin [Conway 1986], [Tsusaka 1986], [Sheridan 1978], il existe plusieurs véhicules de fond marin qui peuvent être commandés à partir de la surface (ou d'un navire). Le TROJAN [Liddle 1986] constitue un bon exemple (figure 2.5). Le véhicule est utilisé

pour la reconnaissance des fonds marins et pour des manipulations dans les profondeurs sous-marines. Il est équipé d'une caméra, d'un appareil photographique, de projecteurs et de deux manipulateurs comprenant six degrés de liberté. Il est commandé à partir d'un poste de contrôle (figure 2.6) auquel il est relié par un câble. En plus des images transmises par la caméra, l'opérateur dispose également d'une information graphique lui fournissant des renseignements sur l'état (point de vue mécanique) et la position physique du véhicule.

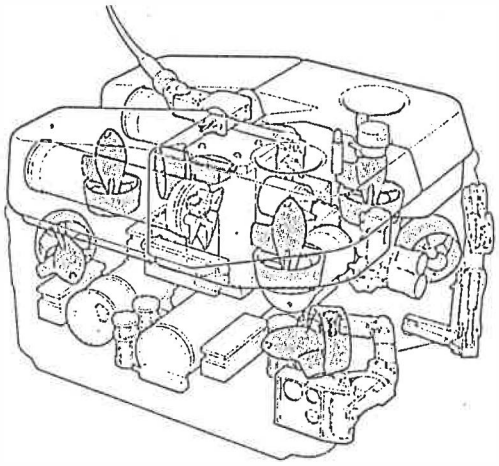


Figure 2.5: Le TROJAN

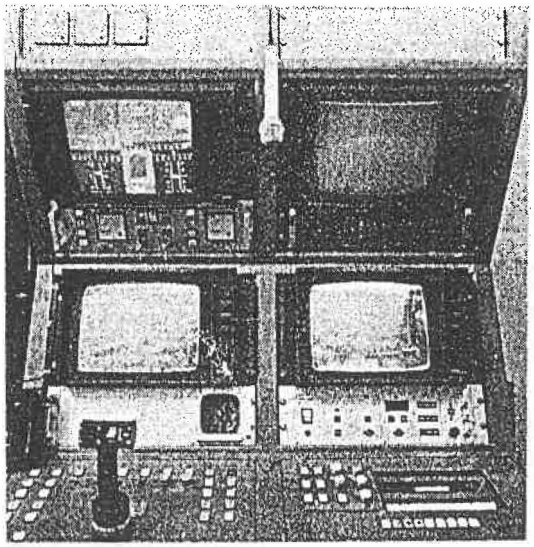


Figure 2.6: Poste de contrôle du TROJAN

Il existe également dans la littérature plusieurs exemples de véhicules terrestres commandés à distance [Hightower 1988], [Miller 1987]. Les développements réalisés pour la téléopération des véhicules terrestres se retrouvent surtout dans le domaine militaire afin d'effectuer la reconnaissance des lieux (éclaireur). Dans la plupart des cas, on utilise une caméra stéréoscopique à bord du véhicule (figure 2.7).

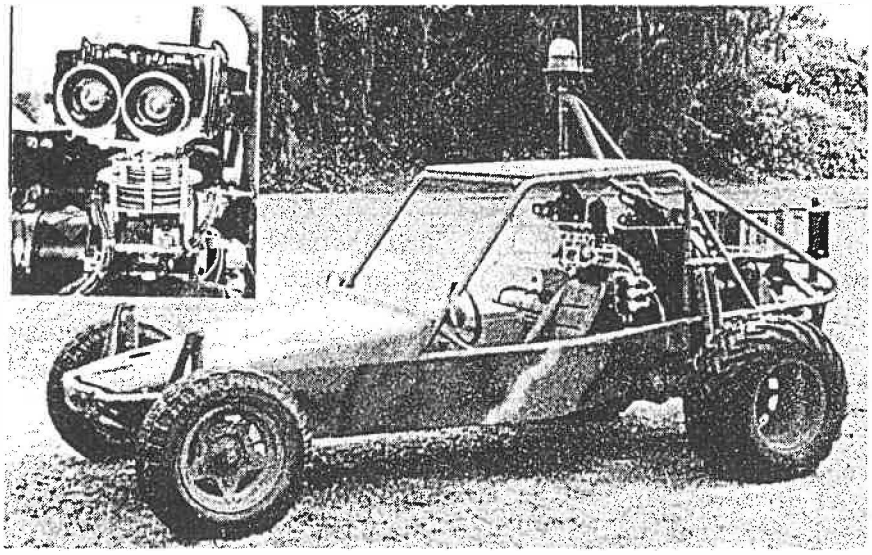


Figure 2.7: Véhicule terrestre téléopéré, ATTV

Cette caméra permet à un opérateur situé dans un poste de commande (figure 2.8) de visualiser une image en trois dimensions. De plus, la caméra peut suivre les mouvements de tête de l'opérateur dans un plan horizontal ce qui lui permet d'obtenir de meilleurs champs de vision selon les différentes manoeuvres qu'il doit effectuer. Finalement, l'opérateur dispose d'écouteurs stéréo, logés dans son casque, qui lui

permettent de se transposer dans l'environnement du véhicule ce qui facilitent ses manoeuvres. Des essais effectués avec un tel véhicule sur un terrain accidenté et avec plusieurs obstacles à contourner ont été couronnés de succès. Le véhicule a atteint une vitesse de pointe de 40 km/h.

Figure 2.8: Poste de commande du véhicule terrestre, ATTV

Dans le domaine minier, les applications de la téléopération sont pratiquement inexistantes. Il y a par contre plusieurs applications de la télécommande et à ce sujet la littérature fourmille d'exemples [Poisson 1981], [Laatio 1980], [Tribout 1979], [Leclercq 1986], [Duff 1980]. Essentiellement, la télécommande est utilisée pour augmenter le taux de récupération du minerai et pour assurer la sécurité des mineurs qui doivent faire le soutirage dans les chambres où il y a des risques de chutes de blocs. Les manettes de la télécommande sont logées sur un pupitre portatif que le conducteur suspend à ses épaules. Cette télécom-

mande est effectuée à vue ce qui limite les distances de déplacement du véhicule.

Le seul exemple de téléopération appliqué à un contexte minier provient de la compagnie finlandaise ARA [Kallio 1988]. Cette compagnie a effectué des expériences où deux caméras ont été utilisées pour effectuer le chargement d'un chargeur-transporteur. Dans un cas, on a installé les caméras dans le point de chargement (figure 2.9) et dans l'autre, on a monté les caméras sur la machine (figure 2.10). Dans les deux cas, on rapporte que les résultats obtenus ont été satisfaisants. Ce système est toutefois encore au stage expérimental et n'est pas utilisé en production.

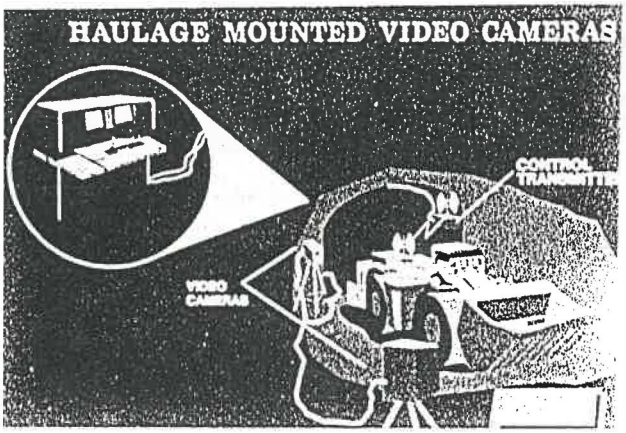


Figure 2.9: Chargement avec caméras situées à l'extérieur du véhicule.

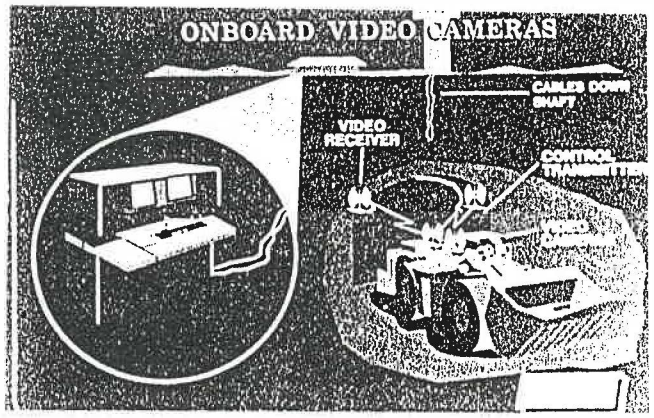


Figure 2.10: Chargement avec caméras situées à bord du véhicule.

Chapitre 3: DESCRIPTION DU BANC D'ESSAI

3.1 Introduction

Les essais de téléopération exécutés pour ce travail ont été effectués à l'aide d'un banc d'essai. Un tel banc a pour but principal de vérifier la faisabilité du système que l'on veut développer avant de transposer les résultats à une situation réelle.

Un véhicule expérimental fut développé par le département de génie électrique de l'École Polytechnique. Ce prototype fut construit pour répondre à certaines caractéristiques qui faciliteraient son utilisation en milieu minier. Le véhicule devait rencontrer les spécifications et les contraintes suivantes:

- capacité de circuler à l'intérieur et à l'extérieur,
- capacité d'agir en téléopération,
- puissance embarquée limitée (1000 W),
- puissance de calcul standardisée: ordinateur IBM-XT,
- possibilité de transmission de données et d'images à une station de commande.

3.2 Description du véhicule

Le véhicule expérimental est illustré à la figure 3.1. Il est constitué d'une partie mobile (base d'une chaise roulante motorisée) et d'une plate-forme sur laquelle les équipements peuvent être installés. La figure 3.2 donne les caractéristiques physiques du véhicule.

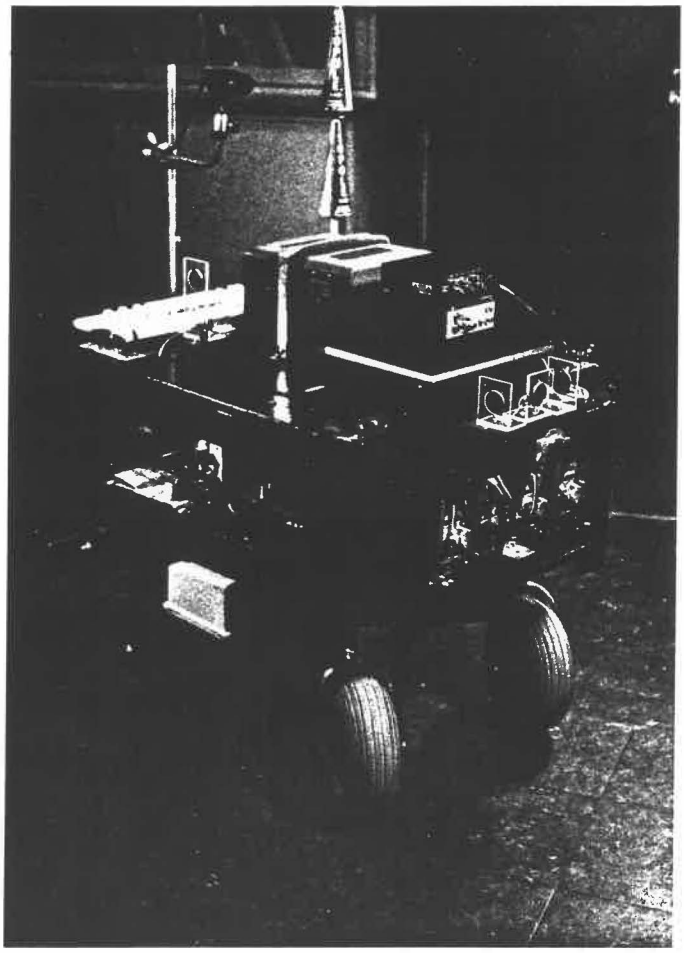
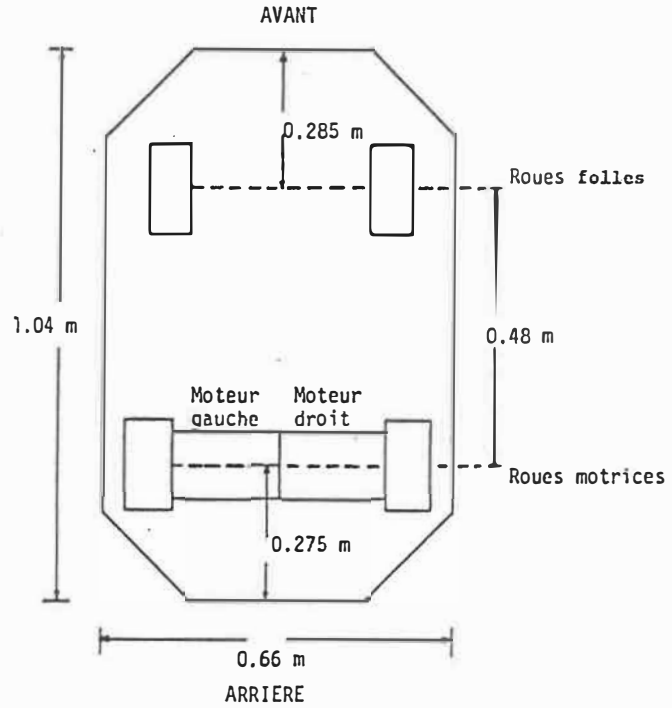


Figure 3.1: Véhicule expérimental.



Caractéristiques

Base motrice		Plate-forme	
Longueur	0,74 m	Longueur	1,04 m
Largeur	0,61 m	Largeur	0,66 m
Hauteur	0,41 m	Poids avec équip.	90 kg
Poids	80 kg		
Essieu avant	0,46 m	Performance	
Essieu arrière	0,53 m	Vitesse max.	2,5 m/s
Empattement	0,48 m		9 km/h
Rayon de giration	0,76 m	Distance max.	50 km
Dimension des roues	260 X 85 mm	Autonomie	5,5 h

Figure 3.2: Caractéristiques physiques du véhicule.

Les équipements installés sur le véhicule comprennent:

1. Base mobile Fortress 6755 FS,

   - 2 moteurs DC montés sur l'axe de l'essieu arrière (puissance 250 W), vitesse maximale 9 km/h,

   - 1 contrôleur de vitesse,

   - 2 roues folles à l'avant;

2. Convertisseur c.c. à c.a. (24 V c.c. à 110 V c.a. onde carrée) de marque Tripplite d'une puissance de 1000 W. Alimentation 5, 10, 15 V;
3. Capteurs:
   - 2 encodeurs optiques Sandtron REX-44-5 (500 imp/tour);
   - 8 capteurs ultrasons de marque Polaroid;
   - 2 interrupteurs infra-rouges de type 42SRV à faisceau étroit et polarisé, sensible uniquement à des retro-réflecteurs à coin cubique;
   - 2 boutons poussoires pour l'arrêt d'urgence;
   - 1 caméra CCD Panasonic WV-CD500;
4. Système de transmission vidéo par ondes hertziennes de marque P.C. Electronics, modèle TX70-1;
5. Modem RF Dataradio modèle DR4800B2 (4800 Bauds);
6. Micro-ordinateur IBM-XT (compatible) standard,
   - carte d'interface entrée-sortie LabMaster 16 A/N, 2 N/A, 5 compteurs 24 E/S parallèles et accès d'interruption;
   - 2 cartes Base-Board 96 E/S parallèles.

La localisation des différents capteurs sera décrite plus loin dans la section 3.4 Description des capteurs.

3.3 Description de la station de commande

La station de commande pour la téléopération est illustrée à la figure 3.3. Elle comprend:

1. Micro-ordinateur IBM-AT;
2. Système de réception d'image P.C. Electronics;
3. Moniteur Panasonic pour la réception des images vidéo;
4. Modem Dataradio modèle DR4800B2;
5. Unité de commande à distance Futaba 4 canaux modèle FT 4a.

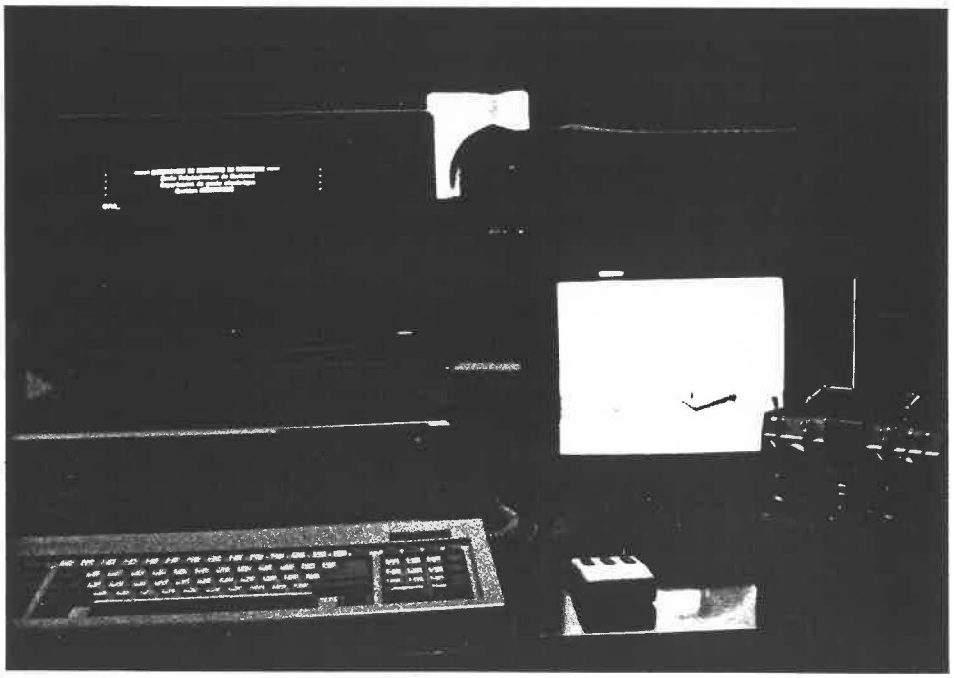


Figure 3.3: Station de commande.

3.4 Descriptions des capteurs

3.4.1 Les encodeurs optiques

Les encodeurs optiques sont utilisés pour mesurer les déplacements linéaires de chacune des roues arrières (roues motrices). Un encodeur est relié à l'essieu de chacune des roues par une courroie (figure 3.4). Ce capteur donne une mesure angulaire du déplacement, c'est-à-dire qu'il permet de connaître le nombre de tours que la roue effectue.

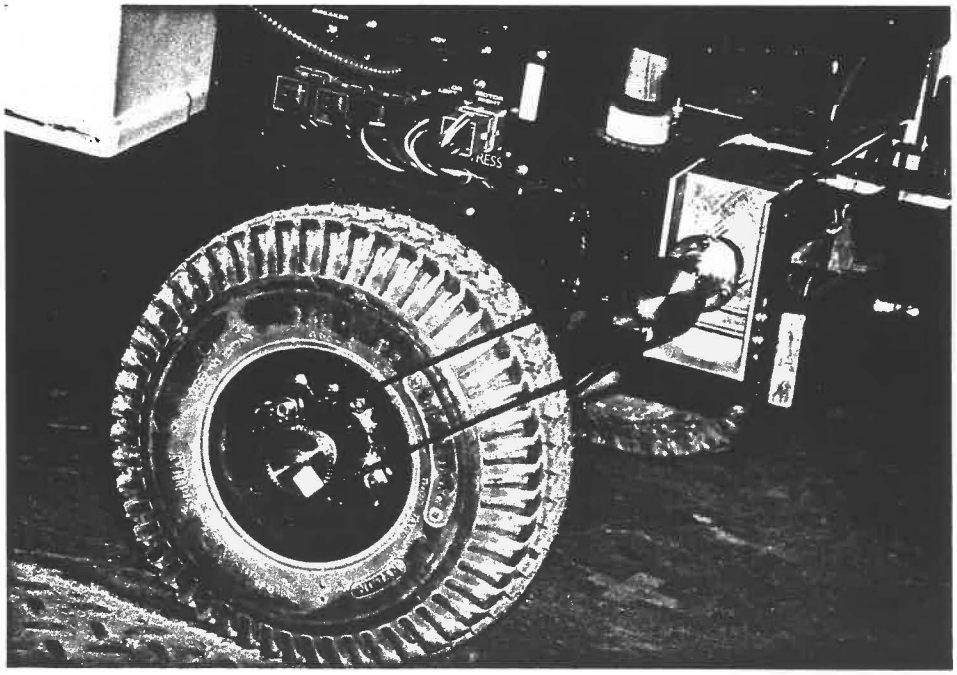
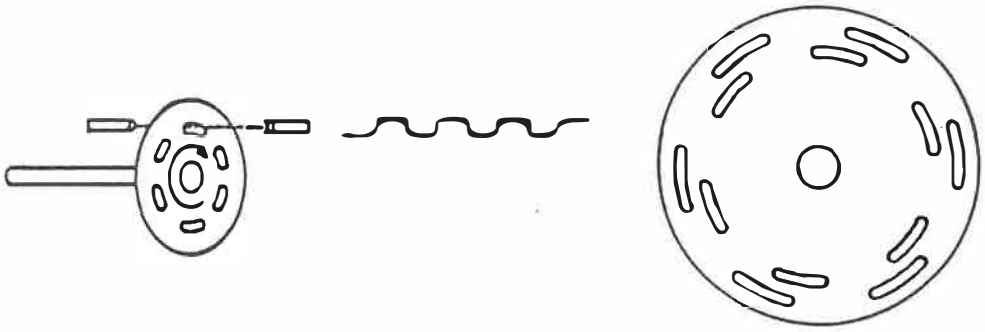


Figure 3.4: Localisation d'un encodeur optique sur une roue.

L'encodeur optique est fait d'une plaque circulaire possédant des perforations distribuées uniformément autour du disque. Le disque est entraîné par une courroie qui est reliée à la roue d'entraînement. D'un côté du disque est installé une photo-diode émettant une lumière infra-

rouge et de l'autre côté, un capteur sensible à la lumière. Lorsque le disque est en rotation, un signal binaire est créé (figure 3.5 a). Le nombre de changements de signal correspond au déplacement angulaire.

La figure 3.5 b illustre un encodeur qui possède deux séries de perforations qui sont décalées. Les deux sorties permettent de mesurer le sens du déplacement (horaire ou anti-horaire).



a) b)

Figure 3.5: Principe de l'encodeur optique.

L'encodeur optique est relié à un circuit logique de décodage qui, une fois initialisé, mémorise et compte le nombre de perforations détectées lors de la rotation (impulsions).

Ce système de mesure odométrique qui est utilisé lors du traitements d'informations pour connaître la distance parcourue possède les caractéristiques suivantes:

1. diamètre des roues d'entraînement: 25,4 cm;
2. encodeur optique: 500 impulsions/tour;
3. le circuit de décodage multiplie par 4 la résolution de l'encodeur.

L'équation qui permet de trouver la distance linéaire parcourue à partir d'un déplacement angulaire (nombre de perforations) enregistré par l'encodeur est la suivante:

$$Dm = Kp * Di$$

où

Dm : la distance parcourue en mètres;

Di : la distance parcourue en impulsions;

Kp : constante de conversion (imp./tour);

et $Kp = \dfrac{2000 \text{ imp./tour}}{(2\pi * 0{,}254/2) \text{ m/tour}}$

3.4.2 Les interrupteurs infra-rouges

Les interrupteurs infra-rouges utilisés sur le véhicule expérimental permettent de déterminer sa position absolue dans un environnement connu. Cette localisation est rendu possible grâce à des réflecteurs (balises) installés à des positions connues le long d'un parcours. L'interrupteur infra-rouge et son principe de fonctionnement sont illustrés schématiquement à la figure 3.6. Les positions des deux inter-

rupteurs infra-rouges montés sur le véhicule expérimental sont représentées à la figure 3.7. Ce capteur émet un rayon infra-rouge polarisé. Ce rayon, lorsqu'il rencontre un réflecteur approprié, est réfléchi avec un angle de 90°. Cette caractéristique permet d'obtenir un interrupteur qui ne sera déclenché que par le contact d'un réflecteur à coin cubique. La distance maximale d'opération est de 3 mètres.

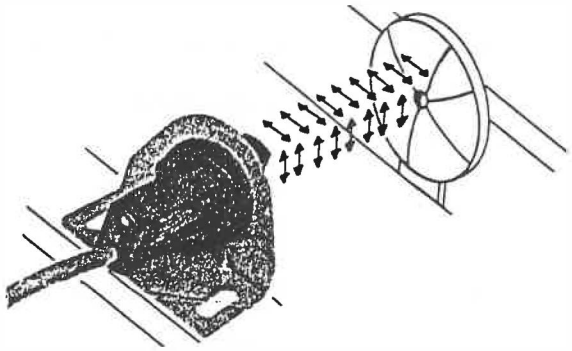


Figure 3.6: Interrupteur infra-rouge.

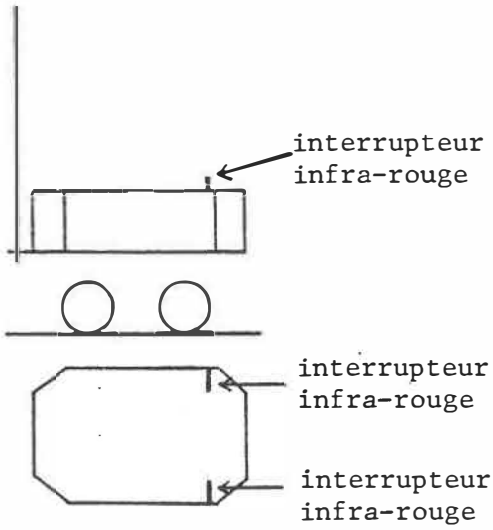


Figure 3.7: Position des interrupteurs sur le véhicule.

3.4.3 Les capteurs ultrasons

Le véhicule est muni de capteurs ultrasons qui sont localisés tel qu'illustré à la figure 3.8. Un capteur ultrason sert à connaître la distance qui sépare celui-ci d'un obstacle. Ces capteurs sont disposés sur le véhicule de telle sorte qu'ils puissent être utilisés dans les systèmes anti-collision décrits au chapitre 6.

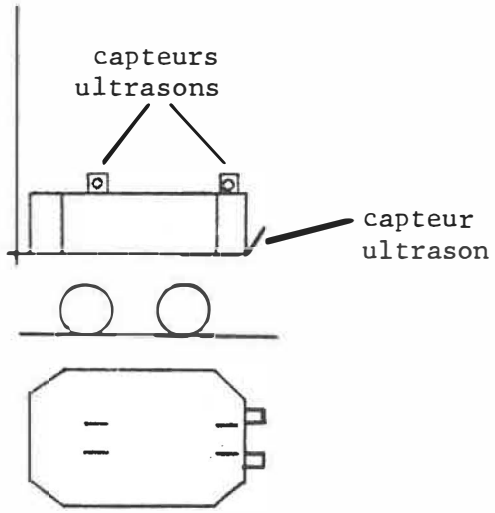


Figure 3.8: Position des capteurs ultrasons sur le véhicule.

Le principe de fonctionnement est illustré à la figure 3.9. Il suffit d'émettre un son et de mesurer le temps écoulé entre l'émission et la reception du signal après sa réflexion sur un obstacle. La distance entre la cible et le capteur est calculé à partir de la vitesse du son.

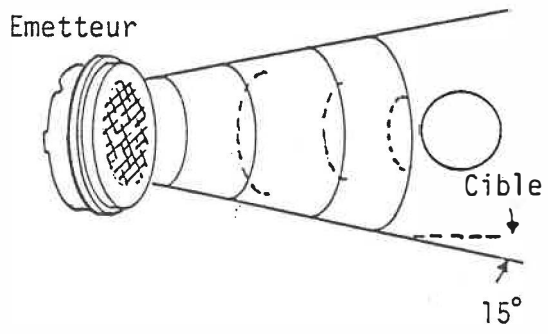


Figure 3.9: Principe de fonctionnement d'un capteur ultrason.

Les capteurs ultrasons installés à bord du véhicule sont de type électrostatique Polaroid. Ces capteurs sont à la fois émetteur et récepteur. Le signal d'excitation est d'une durée de 1 ms et est composé de 56 périodes d'un signal sonore comprenant 4 fréquences consécutives soit 50, 53, 57 et 60 kHz [Polaroid 1984]. Ce genre de signal permet de réduire les possibilités d'absence de réflexion causé par la forme de l'obstacle et du capteur. Les erreurs possibles sont de l'ordre de ± 30 mm pour des mesures pouvant varier de 0,3 à 10,6 m.

Cependant la justesse de la mesure sera influencée par l'angle d'incidence du front d'onde sur l'obstacle et par sa texture. Le diagramme de rayonnement du signal est illustré à la figure 3.10.

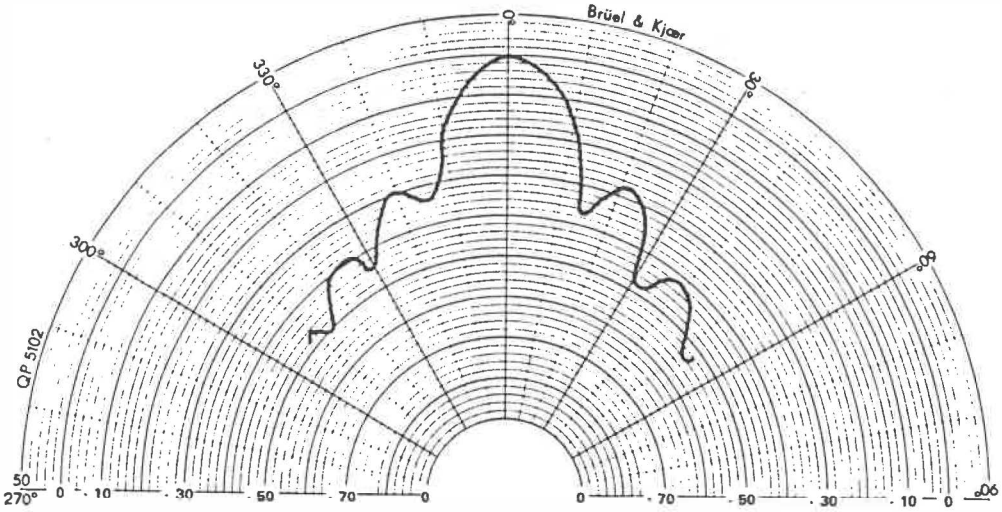


Figure 3.10: Diagramme de rayonnement du capteur ultrason. [POLAROID]

L'axe horizontal représente l'atténuation (en dB) du signal sonore réfléchi qui sera capté par le récepteur du capteur. L'axe circulaire donne la valeur de l'angle incident du signal sur une surface lisse.

À un angle incident de 0°, le signal reçu par le capteur ne contient pas d'atténuation. La valeur lue sera juste. Mais pour un angle incident de 13°, le signal est atténué de 30 dB. À partir de ce niveau d'atténuation, le capteur ne reçoit plus de signal (figure 3.11) et la valeur de l'angle donné par la lecture sera erronnée.

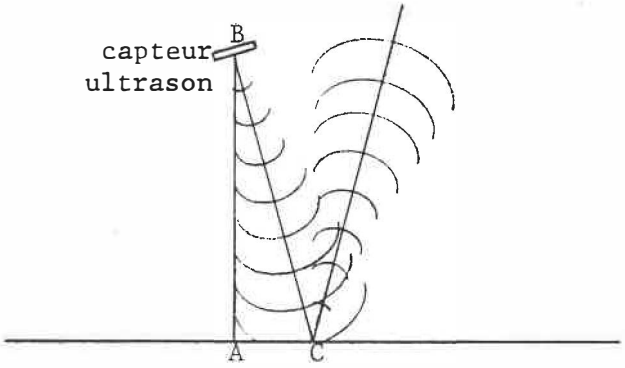


Figure 3.11: Réflexion d'un signal sur une surface lisse.

Par contre, si la surface de réflexion est rugueuse (blocs de béton), il y aura une diffusion du signal incident ce qui permettra au signal réfléchi d'atteindre le capteur. La figure 3.12 montre la réflexion d'un signal sonore sur une surface rugueuse. La distance évaluée de façon la plus juste sera celle qui est perpendiculaire au capteur (BC sur la figure). Sur des surfaces rugueuses tels que les blocs de béton, l'angle incident limite qui permettra d'avoir une réflexion qui se rendra au capteur peut atteindre 30°. Au delà de cette angle, la diffusion du signal n'est plus assez vaste pour permettre au signal réfléchi d'atteindre le capteur. Dans ce cas, la distance évaluée ne correspondra plus à la mesure perpendiculaire au capteur. La lecture sera erronnée.

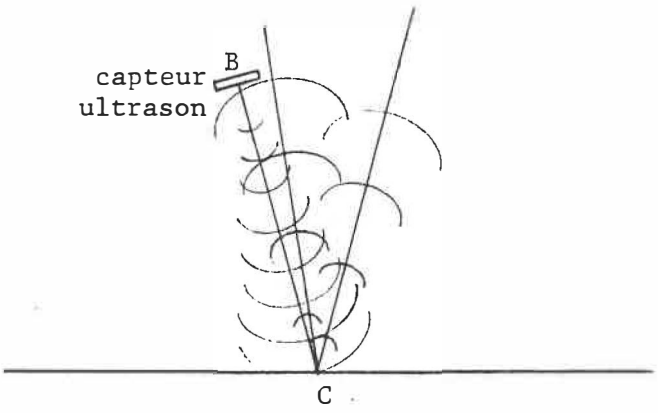


Figure 3.12: Réflexion d'un signal sur une surface rugueuse.

3.4.4 La caméra

Le véhicule est muni d'une caméra ce qui permet de l'utiliser pour les essais de téléopération. Cette caméra est de type CCD (Charge Couple Device). Elle est de petite dimension et possède une bonne résolution, une grande sensibilité à la lumière et une très bonne résistance aux chocs et aux vibrations. La caméra est munie d'un iris automatique ce qui permet d'avoir une image claire qui se situe toujours au foyer. La figure 3.13 montre la caméra CCD et son unité d'alimentation. La localisation de la caméra sur le véhicule expérimental sera discutée dans le chapitre 4. Les caractéristiques de la caméra sont les suivantes:

1. résolution 510 X 492 pixels;

2. sensibilité de 5 lux (Fl.4)
3. sortie vidéo: EIA-RS170;
4. alimentation: 120 V AC, 60 Hz;
5. dimension: 41 X 41 X 55 mm;
6. angle d'ouverture horizontal: 58°, vertical: 44°;

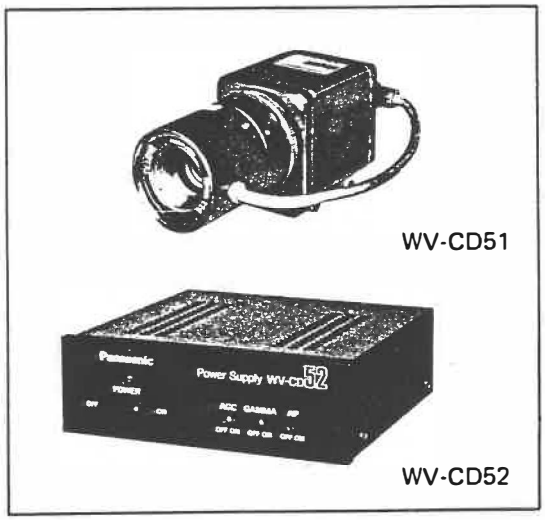


figure 3.13: Caméra CCD et alimentation Panasonic

Chapitre 4: ESSAIS DE TÉLÉOPÉRATION

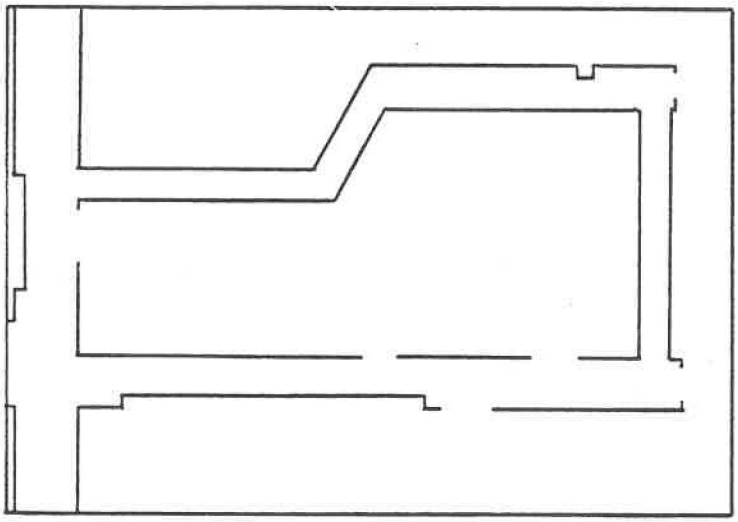
4.1 Essais en laboratoire

4.1.1 Introduction

Les essais en laboratoire ont été effectués à l'aide du banc d'essai décrit au chapitre 3. Le but de ces essais était de prouver la faisabilité de la téléopération et de montrer que l'utilisation de ce système pourrait donner des résultats comparables à ceux que l'on obtient présentement avec la télécommande à vue.

4.1.2 Description des essais

Des essais ont été effectués dans les corridors de l'Ecole Polytechnique. Le circuit est représenté à la figure 4.1. Le rapport entre la largeur du corridor et la largeur du véhicule (maximum: 3,7 et minimum: 1,7) est assez représentatif de la situation qui prévaut dans une galerie de mine lorsqu'un chargeur-transporteur y circule (rapport minimum: 1,8).



échelle
1 m : 3,5 mm

Figure 4.1: Circuit où ont eu lieu les essais de téléopération dans les corridors de l'Ecole Polytechnique

Initialement, la caméra fut positionnée à l'avant du véhicule. Cependant, cette alternative fut vite rejetée puisque cet emplacement ne permet pas de situer le véhicule dans son environnement. Il devient donc difficile de déterminer les mouvements que le véhicule devra effectuer pour suivre son parcours et tout particulièrement lors des virages. La deuxième alternative fut de placer la caméra à l'arrière du véhicule. Cette position donna de meilleurs résultats.

Après cette constatation, différentes positions de la caméra (hauteur et inclinaison) furent étudiées en vue de déterminer la position optimale. Sept positions furent essayées: cinq au centre arrière du véhicule et deux au côté arrière droit. Les positions du côté droit ont été essayées parce qu'elles représentent l'endroit où se situe le conducteur lorsqu'il pilote le véhicule. La figure 4.2 montre les différentes positions de la caméra sur le véhicule et ses champs de vision.

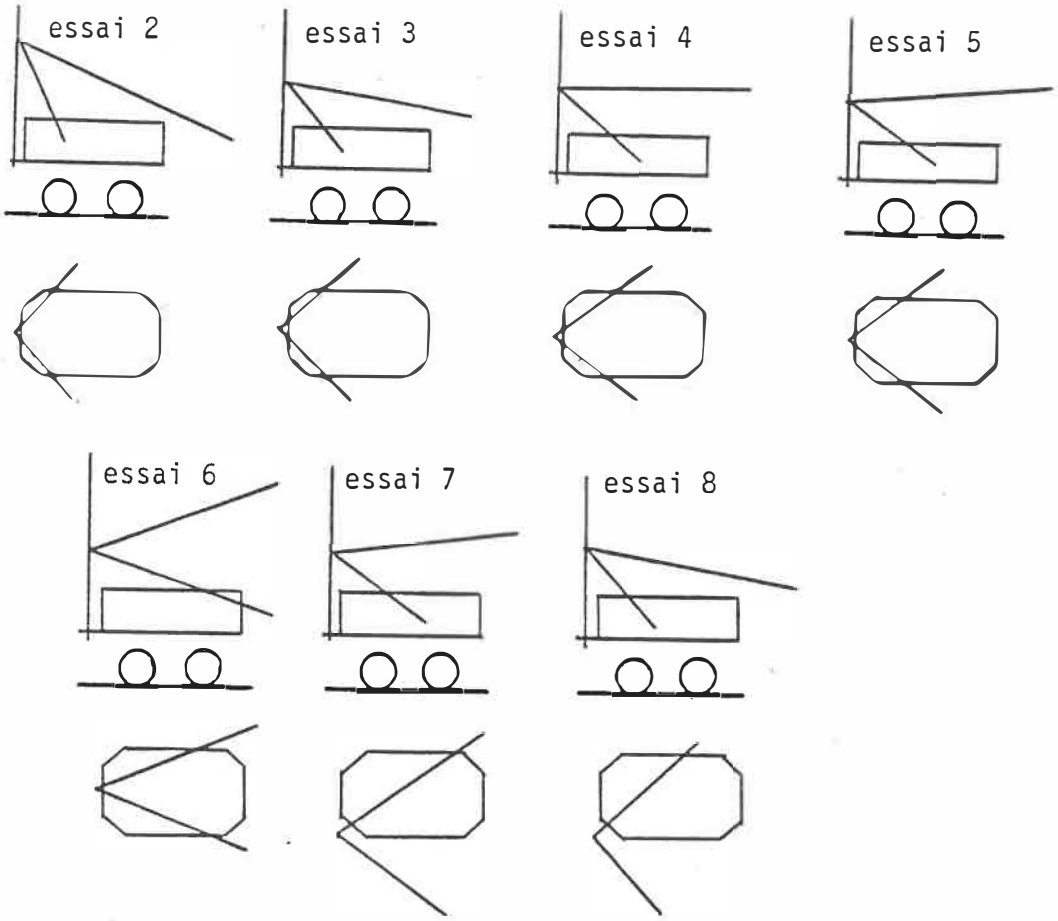


Figure 4.2: Différentes positions de la caméra lors des essais expérimentaux

Le tableau 4.1 donne le numéro des essais et leurs caractéristiques. Les essais 1 et 9 ont été effectués en télécommande avec vision directe (sans utiliser la caméra). Ils ont pour but de mesurer le progrès accompli (effet d'apprentissage) en télécommande et de déterminer dans quelle mesure le système de vision affecte la performance des opérateurs.

no essai	position de la caméra	hauteur de la caméra	inclinaison de la caméra
1	essai avec télécommande sans caméra		
2	au centre	61 cm	45°
3	au centre	34 cm	30°
4	au centre	34 cm	20°
5	au centre	29 cm	15°
6	au centre	29 cm	0°
7	côté droit	29 cm	15°
8	côté droit	34 cm	30°
9	essai avec télécommande sans caméra		

Tableau 4.1: Différentes positions de la caméra sur le véhicule lors des essais en laboratoire.

Au début de chaque série de tests, l'opérateur doit se familiariser avec la télécommande et le circuit à parcourir. Puis par la suite, l'opérateur se retire dans un local à proximité du circuit expérimental. Il opère le véhicule à distance à l'aide de la télécommande et des images qu'il reçoit sur le moniteur. Il doit effectuer le circuit le plus rapidement possible (vitesse maximum: 6 km/h) tout en évitant que le véhicule n'aille percuter contre les murs. Six différents opérateurs ont effectué la série complète de tests. L'évaluation des performances est basée sur les temps d'exécution et sur le nombre d'erreurs commises (nombre de chocs contre le mur) le long du parcours.

4.1.3 Présentation des résultats

Les résultats obtenus lors de ces essais sont présentés au tableau 4.2. Le graphique 4.1 donne le temps de parcours de chaque opérateur pour chaque essai effectué. Le graphique 4.2 donne le nombre de fois que le véhicule a percuté le mur (nombre de chocs) pour chaque essai effectué.

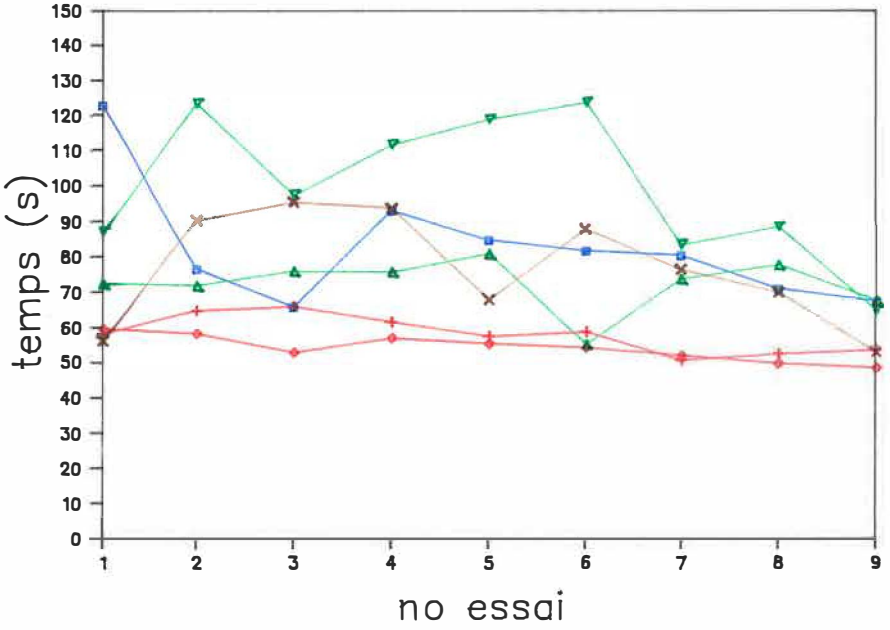
opérateur	Numéro de l'essai								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	123	77	66	93	85	82	80	71	68
	7	1	1	2	2	2	2	3	1
B	58	65	66	61	57	59	51	52	54
	1	2	3	4	4	5	2	2	1
C	59	58	53	57	55	54	52	50	48
	0	1	1	1	1	3	1	1	0
D	72	72	76	76	81	55	74	78	68
	0	1	4	4	3	4	1	1	1
E	56	90	96	94	68	88	77	70	53
	1	0	2	0	1	2	0	0	0
F	87	123	97	111	119	123	83	88	65
	1	1	1	1	1	2	0	1	0
moyenne	76	81	76	82	78	77	69	68	59
	1.6	1	2	2	2	3	1	1.3	0.5

Dans chaque colonne et pour chaque opérateur le chiffre supérieur indique le temps de parcours en secondes et le chiffre inférieur indique le nombre de chocs.

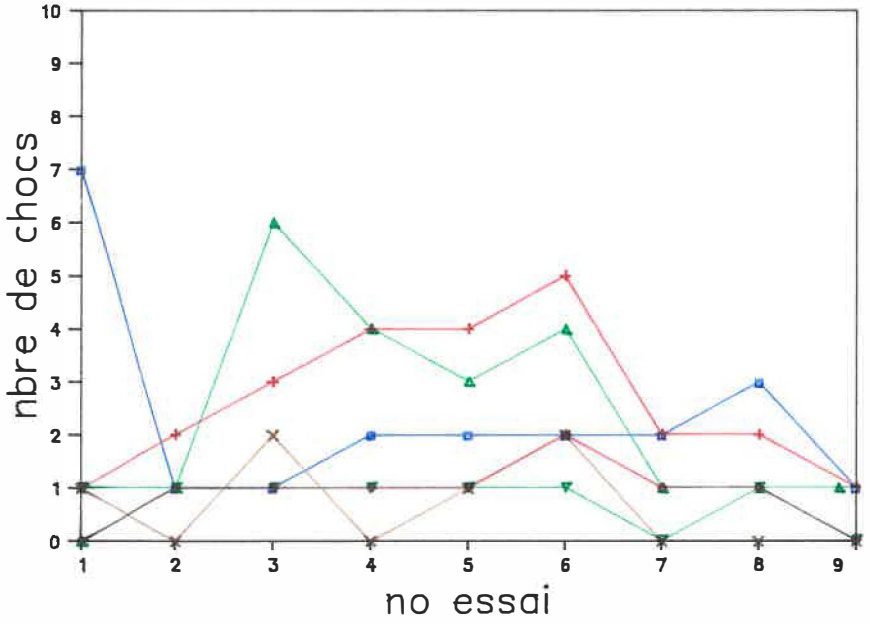
Tableau 4.2: Résultats obtenus par chaque opérateur lors des essais en laboratoire

RESULTATS OBTENUS PAR CHAQUE OPERATEUR LORS DES ESSAIS EN LABORATOIRE

Graphique 4.1



Graphique 4.2



A B C D E F

Les résultats varient passablement d'un opérateur à l'autre. Les opérateurs B et C ont obtenu des temps de parcours semblables dans chacun des essais. Ces temps ne varient pas beaucoup selon la position de la caméra. Par contre, l'opérateur B a percuté le mur plus souvent, surtout lorsque la position de la caméra est près de l'horizontale (inclinaison de la caméra près de 0°). La même situation se reproduit pour l'opérateur C lorsque la position de la caméra est à l'horizontale. Pour les autres opérateurs, il est difficile de dégager une tendance générale quant aux temps de parcours. Par contre, le nombre de chocs révèle que les positions de caméra près de l'horizontale sont peu efficaces car elles ne donnent pas une image complète du véhicule.

Lorsqu'on examine les résultats obtenus pour les positions du côté droit (essais 7 et 8), les temps de parcours et le nombre de chocs sont, en général, inférieurs. Il faut d'abord spécifier que la majorité des virages s'effectue du côté droit. Ces positions favorisent l'estimation de la distance entre le véhicule et le mur. Dans les virages, ces positions permettent à l'opérateur de vérifier s'il dégage l'arrière du véhicule avant de s'y engager. Pour les déplacements rectilignes, l'opérateur a un plan de référence (le mur) pour guider son déplacement. Cette position donne un meilleur champ de vision pour les manoeuvres que l'opérateur doit effectuer le long du parcours.

La différence entre les résultats obtenus pour les essais 1 et 9 démontre bien qu'il y a un effet d'apprentissage non négligeable. Cet effet se fait sentir autant du point de vue des temps d'exécution que du

nombre de chocs. Sur l'ensemble des résultats, le niveau d'habilité des différents opérateurs semble évident.

En faisant la moyenne des résultats, on se rend compte que les essais avec le système de vision se compare bien avec ceux réalisés à vue directe. Par contre, les opérateurs effectuent un plus grand nombre de chocs avec ce système.

Etant donné que le circuit a des niveaux de difficultés différents, le parcours a été segmenté en huit parties afin d'évaluer l'influence de chaque segment dans les résultats globaux. Les différents segments sont illustrés à la figure 4.3. Les résultats moyens obtenus par les opérateurs pour chaque segment sont donnés au tableau 4.3. Les graphiques 4.3 à 4.10 donnent, pour chaque segment, les temps de parcours et le nombre de chocs en fonction de la position de la caméra.

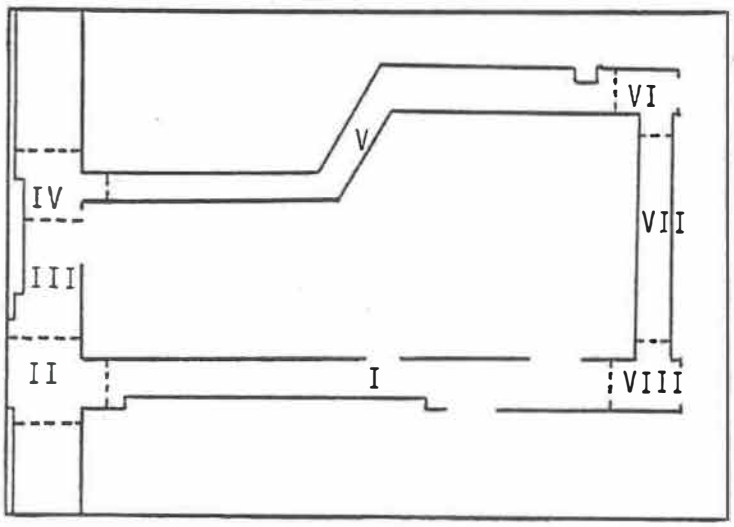
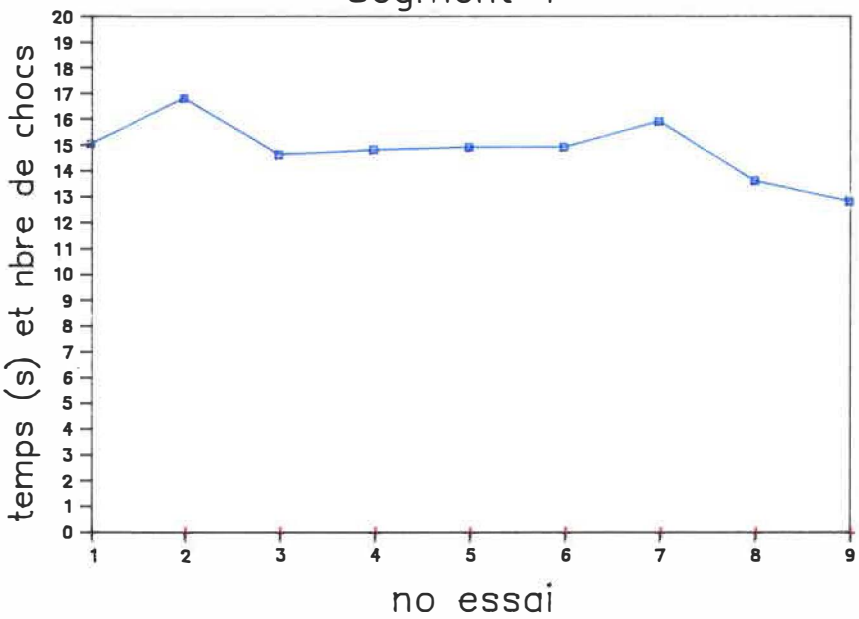


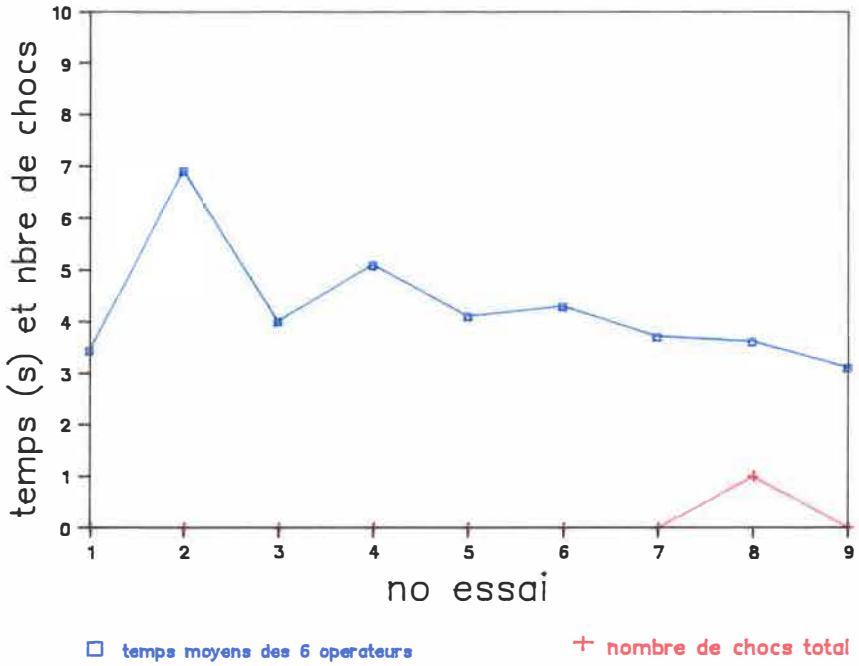
Figure 4.3: Ensemble des segments du parcours

RESULTATS DES ESSAIS PAR SEGMENTS DE PARCOURS

Graphique 4.3
Segment 1

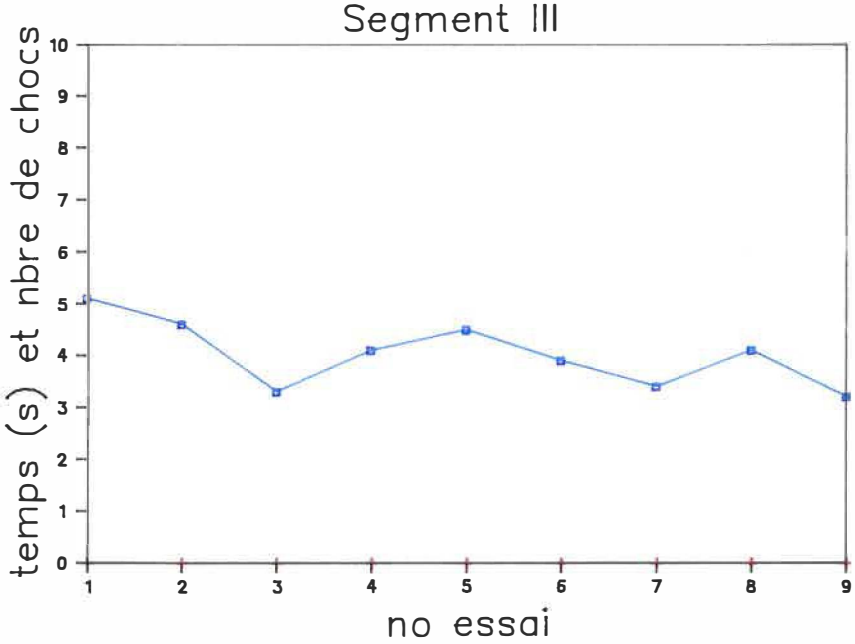


Graphique 4.4
Segment II

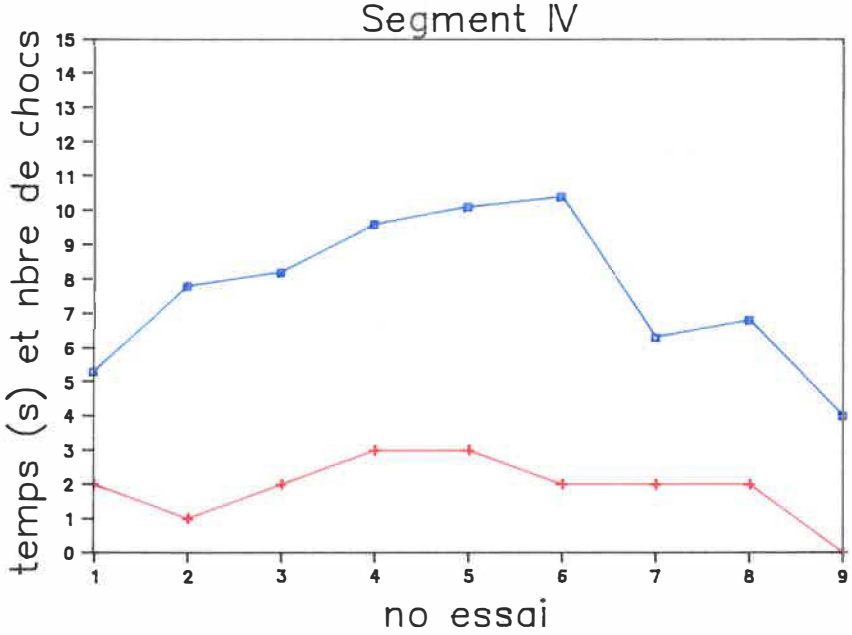


RESULTATS DES ESSAIS PAR SEGMENTS DE PARCOURS

Graphique 4.5
Segment III



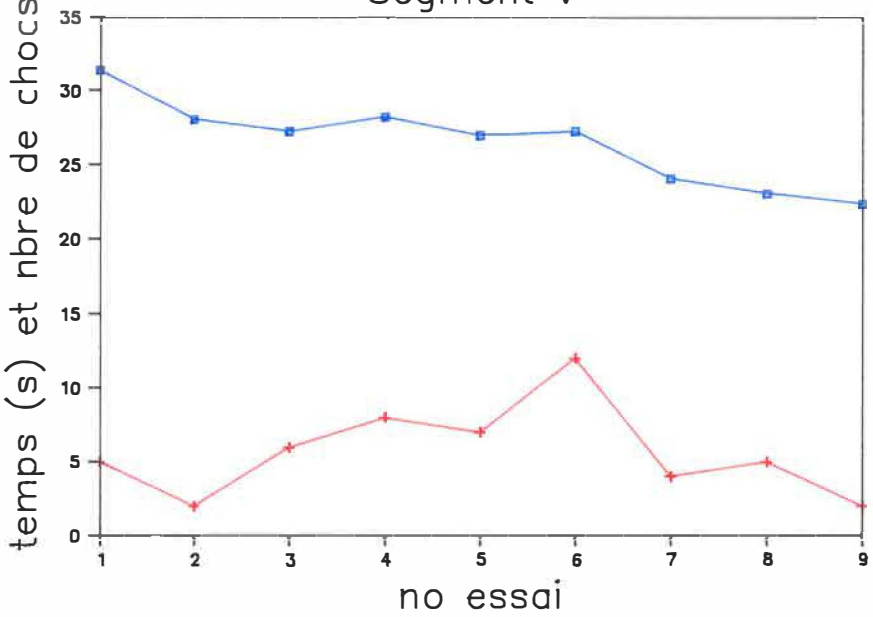
Graphique 4.6
Segment IV



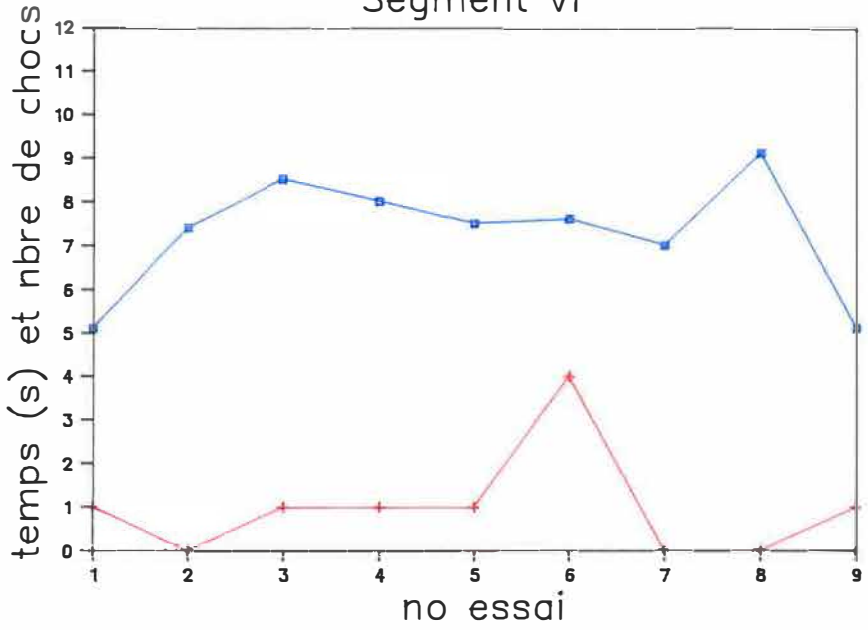
□ temps moyen des 6 operateurs + nombre de chocs total

RESULTATS DES ESSAIS PAR SEGMENTS DE PARCOURS

Graphique 4.7
Segment V



Graphique 4.8
Segment VI

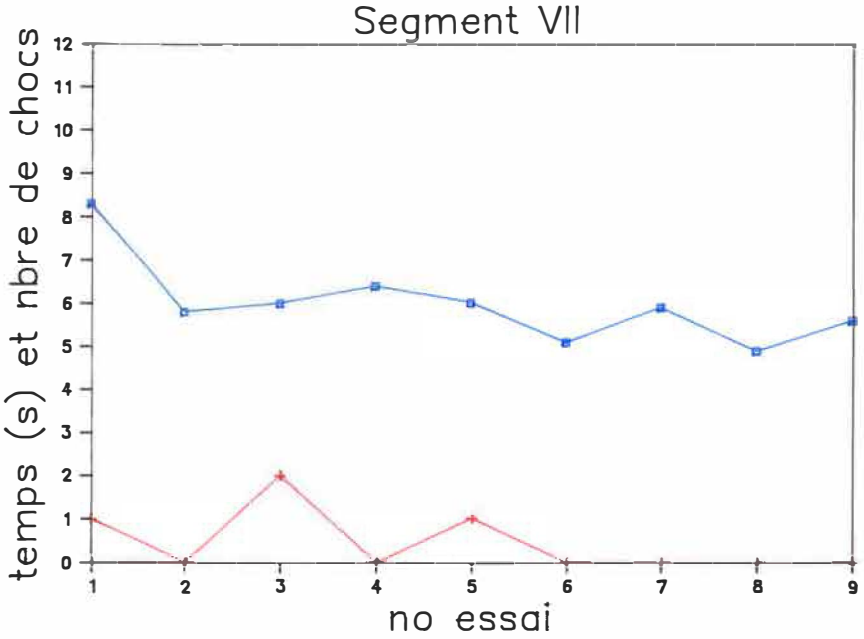


□ temps moyens des 6 operateurs

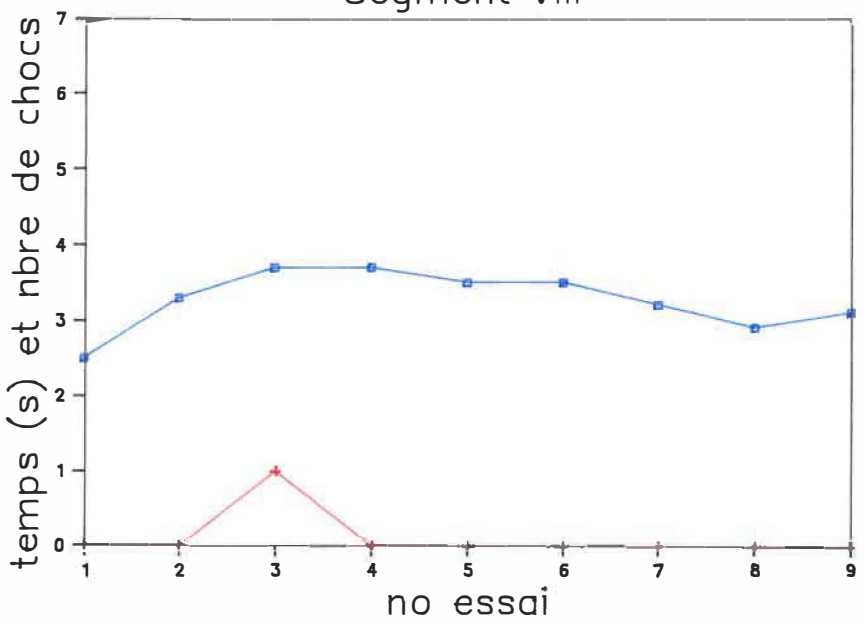
+ nombre de chocs total

RESULTATS DES ESSAIS PAR SEGMENTS DE PARCOURS

Graphique 4.9
Segment VII



Graphique 4.10
Segment VIII



□ temps moyens des 6 operateurs + nombre de chocs total

segment	Numéro de l'essai								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	15 0	16.8 0	14.6 0	14.8 0	14.9 0	14.9 0	15.9 0	13.6 0	12.8 0
II	3.4 0	6.9 0	4 0	5.1 0	4.1 0	4.3 0	3.7 0	3.6 1	3.1 0
III	5.1 0	4.6 0	3.3 0	4.1 0	4.5 0	3.9 0	3.4 0	4.1 0	3.2 0
IV	5.3 2	7.8 1	8.2 2	9.6 3	10.1 3	10.4 2	6.3 2	6.8 2	4 0
V	31.3 5	28 2	27.2 6	28.2 8	26.9 7	27.2 12	24 4	23 5	22.3 2
VI	5.1 1	7.4 0	8.5 1	8 1	7.5 1	7.6 4	7 0	9.1 0	5.1 1
VII	8.3 1	5.8 0	6 2	6.4 0	6 1	5.1 0	5.9 0	4.9 0	5.6 0
VIII	2.5 0	3.3 0	3.7 1	3.7 0	3.5 0	3.5 0	3.2 0	2.9 0	3.1 0

Dans chaque colonne et pour chaque segment le chiffre supérieur indique le temps de parcours moyen en secondes et le chiffre inférieur indique le nombre de chocs.

Tableau 4.3: Résultats des essais par segment de parcours

Pour les segments rectilignes localisés dans les corridors les plus larges (segment I et III) et les virages qui s'effectuent d'un corridor étroit à un corridor plus large (segment II et VIII), il y a peu de variations dans les temps de parcours et presqu'aucun choc. Seul l'essai 2 dans le premier virage (segment II) donne un temps supérieur, mais ceci peut s'expliquer par le fait que c'est le premier virage que l'opérateur effectue à l'aide du système vidéo. Pour l'ensemble de ces

cas, la position de la caméra n'a que peu d'influence sur les résultats.

Dans le cas des segments comprenant les virages serrés (segment IV et VI de la figure 4.3), des variations importantes quant aux temps de parcours et nombre de chocs sont observées. Les positions offrant une meilleure vue du véhicule par rapport au mur (position 2, 7 et 8) donnent en général des temps de parcours plus faibles et un nombre de chocs moins élevé que les autres positions.

Pour les manoeuvres serrées (segment IV), les positions près de l'horizontale (positions 4, 5 et 6) sont nettement défavorisées. Ces positions ne donnent pas suffisamment d'information sur la distance entre le véhicule et les murs. Le même phénomène se reproduit pour le segment V. Les temps varient peu pour les positions centrées à l'arrière du véhicule mais le nombre de chocs est révélateur pour cette partie du parcours. Il indique que la position en plongé donne la meilleure performance.

Il est à noter que pour le corridor étroit et rectiligne (segment VII), lorsque la caméra est centrée, la position horizontale (6) offre le meilleur temps de parcours et il n'y a aucun choc. Cette position donne une meilleure vue d'ensemble de l'orientation du véhicule par rapport au mur.

On remarque que les positions de côté donnent de meilleurs temps et que le nombre de chocs est relativement faible par rapport aux autres

positions.

On remarque également que les essais de téléopération affectent peu les performances des opérateurs quant aux temps et au nombre de chocs pour les segments qui ne requièrent pas de manoeuvres serrées (segment IV, V et VI de la figure 4.3). Ceci s'avère faux pour les segments où il faut exécuter des déplacements précis pour éviter les chocs.

4.1.4 Résumé

Ces essais révèlent que pour que la téléopération soit efficace, il faut avoir la vue la plus complète possible du véhicule et de sa position dans son environnement; dans les cas étudiés, il s'agit de pouvoir le situer par rapport aux murs. Il faut aussi voir le dégagement du véhicule pour être en mesure de le centrer dans le corridor (distinguer l'horizon) et éviter ainsi les chocs.

Les essais avec la caméra sur le côté droit ont révélé qu'il est utile d'avoir un plan de référence (dans ce cas le mur) que l'on peut suivre. Cette vue permet d'évaluer facilement la distance entre le véhicule et le mur et ainsi éviter les fausses manoeuvres et les hésitations.

Idéalement, il faudrait avoir une caméra mobile sur le véhicule qui pourrait suivre les mouvements de la tête de l'opérateur. De plus,

si un système de vision stéréoscopique était installé, l'opérateur pourrait percevoir l'effet de la profondeur ce qui augmenterait ses performances. Il pourrait ainsi porter son attention sur les commandes à effectuer au lieu d'interpréter et d'évaluer les distances (effet de profondeur) sur le moniteur.

En général, la téléopération augmente le temps de parcours dans les parties étroites et les virages. Il ne faut cependant pas perdre de vue que l'apprentissage et l'habilité de l'opérateur jouent un rôle important sur les résultats obtenus quant aux temps de parcours et au nombre de chocs. Il est à présumer qu'un opérateur expérimenté avec un système de téléopération pourrait améliorer ces performances et réduire l'écart entre la commande d'un véhicule à vue directe et la téléopération.

Les résultats obtenus pour ces essais sont fonction des caractéristiques physiques du téléopérateur. Le véhicule expérimental utilisé pour les essais de téléopération ne représente pas les caractéristiques d'un chargeur-transporteur, soit un véhicule articulé pouvant se déplacer avec la même facilité de l'avant ou de l'arrière. Par contre, ces essais avaient les mêmes objectifs que la téléopération d'un chargeur-transporteur; il faut télécommander le véhicule dans un environnement étroit de la façon la plus rapide possible tout en évitant les chocs sur les parois.

4.2 Essais en souterrain

Afin de vérifier qu'il est possible de transmettre des images vidéo sous-terre, des essais furent effectués à la Mine Bell (Thetford Mines) à l'aide du véhicule expérimental.

Un poste de téléopération fut installé dans un point de soutirage (figure 4.4) dans le but d'opérer le véhicule à distance dans une galerie avoisinante (figure 4.5).

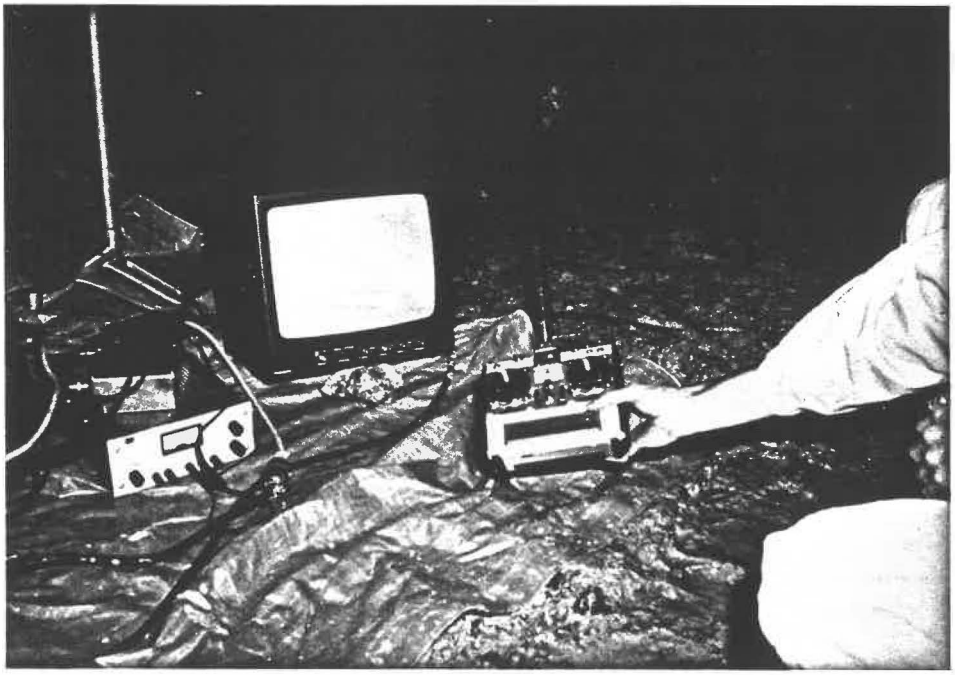


Figure 4.4: Poste de téléopération, Mine Bell

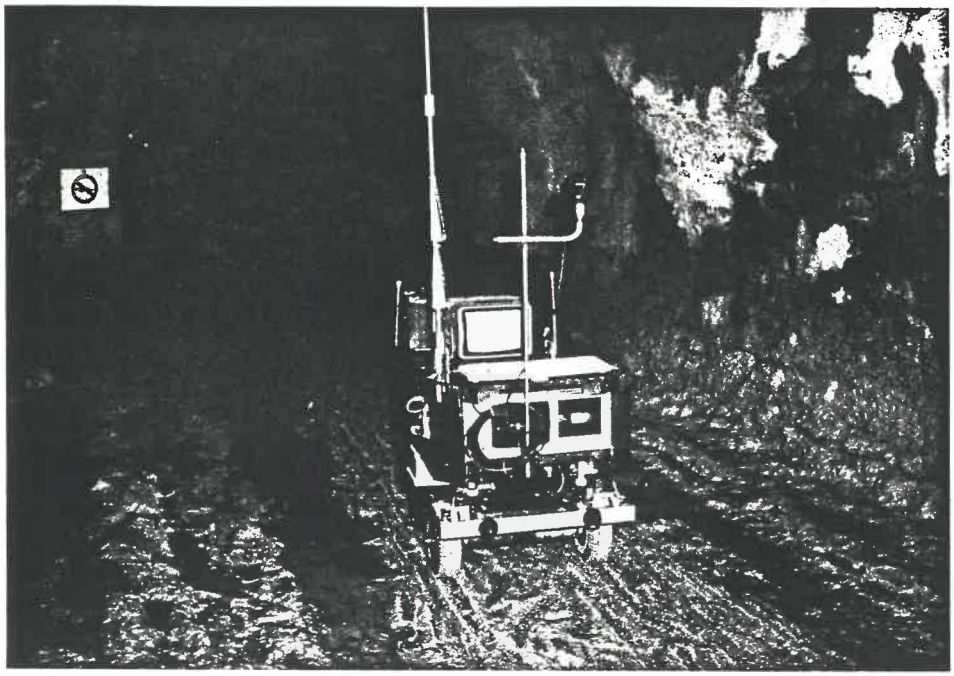


Figure 4.5: Véhicule expérimental, Mine Bell

Les résultats des tests ont été concluants. Les images reçues sur le moniteur étaient nettes et claires, même lorsque le véhicule était éloigné à plus de 300 pieds du poste de téléopération (figure 4.6, position 1). La source lumineuse utilisée n'avait qu'une puissance de 100 watts, ce qui démontre qu'il n'est pas nécessaire d'avoir un éclairage très puissant sur le véhicule. Cette observation vient appuyer ce que Sheridan [Sheridan 1978] constate à ce sujet, soit que les caméras d'aujourd'hui peuvent "voir" avec une luminosité inférieure à ce que l'oeil humain peut capter. Les nouveaux systèmes vidéo donnent une image de bonne qualité même en des endroits faiblement éclairés.

Ces essais nous ont également permis de constater que l'on perd l'image lorsque l'émetteur et le récepteur ne se situent pas dans un

champ rectiligne (figure 4.6, position 2). Cette constatation corrobore toutefois la théorie de propagation des ondes dans la roche [Chiba 1978], [Emshie 1975]. Ce problème n'est toutefois pas très difficile à résoudre puisqu'il suffit simplement d'installer des relais aux points tournants pour solutionner le problème.

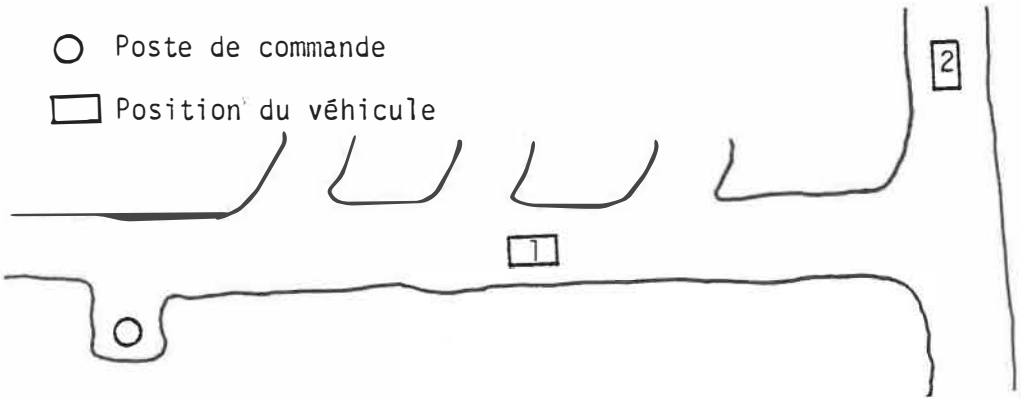


Figure 4.6: Lieu des essais, Mine Bell

4.3 Essais sur un chargeur-transporteur

Le but de cette opération était de démontrer qu'il est possible d'utiliser la téléopération pour effectuer le chargement d'un chargeur-transporteur sur une base opérationnelle.

Les essais furent effectués à la mine de Lyon Lake, Division Mattabi, qui appartient à Noranda. Cette mine fut choisie en fonction des caractéristiques d'opération particulières que l'on rencontre dans certains chantiers et qui se prêtent bien à une application de téléopération. La figure 4.7 montre le plan d'un de ces chantiers.

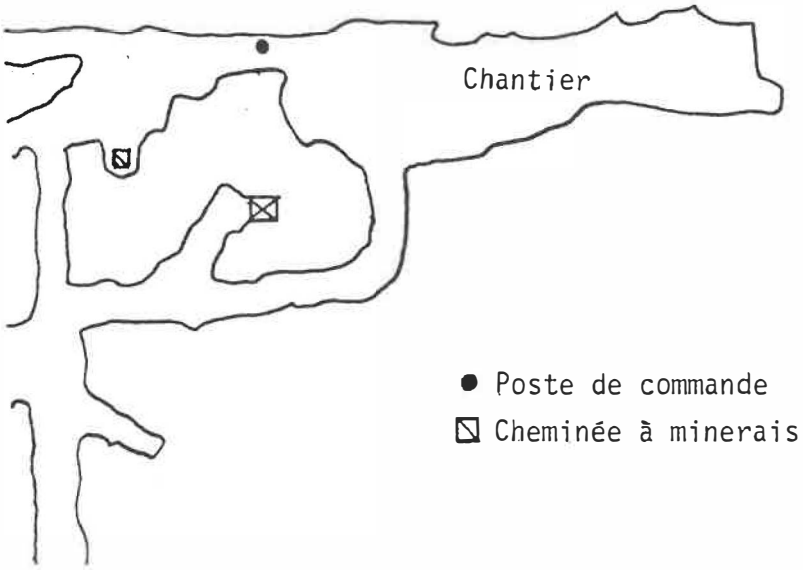


Figure 4.7: Plan du chantier d'essai, Mine Lyon Lake

Lorsque le chargeur-transporteur arrive à l'entrée du chantier, l'opérateur utilise la télécommande pour piloter le véhicule à l'intérieur. Il doit dans certain cas télécommander le véhicule sur une distance pouvant atteindre jusqu'à 100 mètres. Dans ces conditions, il ne lui est pas possible de savoir s'il a réussi à bien remplir le godet et il doit parfois retourner le véhicule au front de taille à plusieurs reprises avant de pouvoir compléter un chargement. Il en résulte donc une perte de productivité et un manque de motivation chez l'opérateur car il doit effectuer plusieurs "passes" avant de remplir le godet du véhicule.

Le système de transmission vidéo qui a été installé sur le chargeur-transporteur est du même type que celui utilisé sur le véhicule expérimental, la seule différence se situant au niveau de l'installation

de l'équipement. La caméra et l'émetteur furent logés dans un boîtier protecteur avant d'être installés sur le véhicule (figure 4.8). Quelques essais de positionnement de la caméra furent effectués avant d'adopter une position finale qui se situe sur la partie avant droite du véhicule, à l'arrière des phares (figure 4.9). Cette position permet de voir à la fois le godet et l'entassement des roches qui s'y trouvent. L'alimentation du système est de 12 volts. Cette tension est obtenue à partir du circuit de 24 volts du chargeur-transporteur. Un circuit de régulation de tension est également inclus. Les spécifications techniques de l'émetteur ainsi qu'une représentation schématique sont données à la figure 4.10.

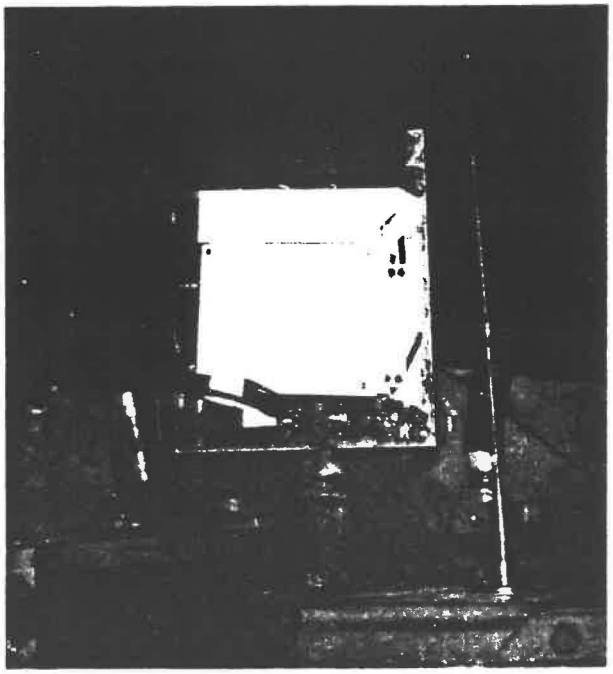


Figure 4.8: Installation du système de transmission d'images

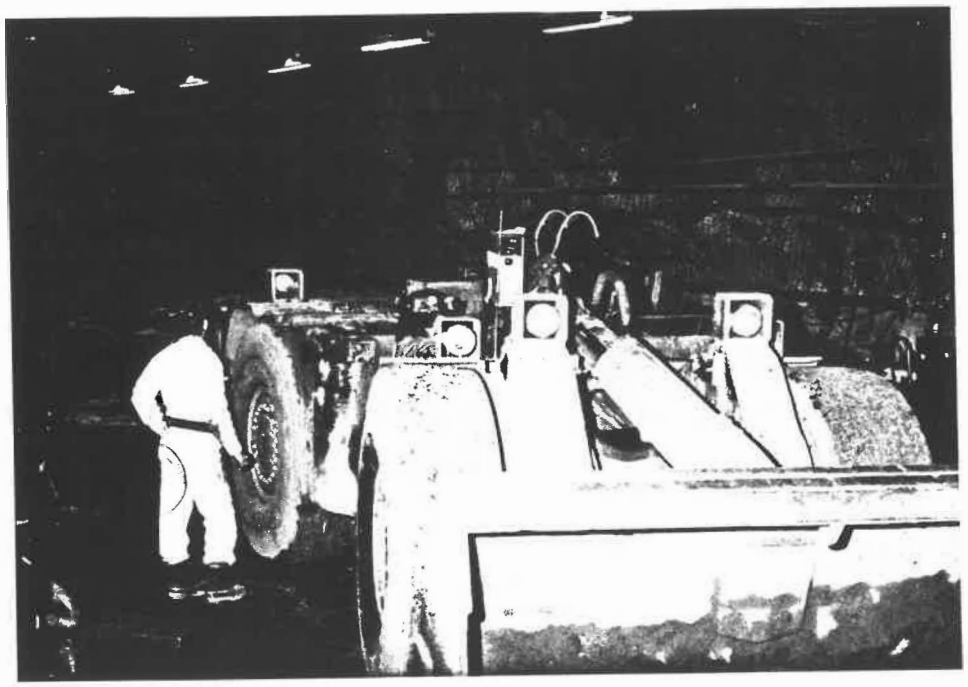
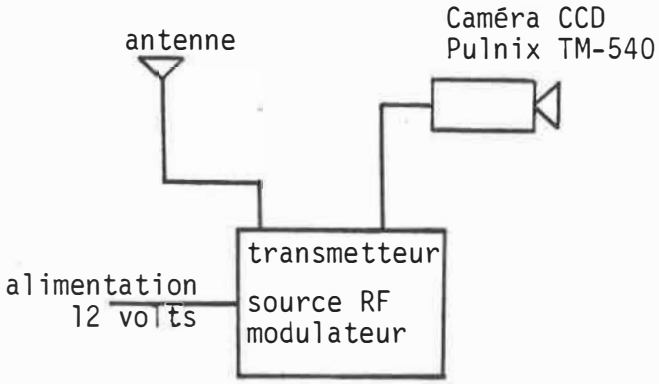


Figure 4.9: Emplacement de la caméra sur le véhicule



Caractéristiques de l'émetteur

- Caméra CCD Pulnix
  - résolution: 510 X 492 pixels
  - sensibilité: 2 lux (F1.4)
  - sortie vidéo: EIA-RS170
  - alimentation: 12VDC, 300 mA.
  - lentille: 12,5 mm auto iris et AGC.
  - dimension: 42 mm X 32 mm X 119,5 mm
  - vibration et choc: 7G(11 hz à 200 hz), 60 G.
- Emetteur TX70-1 ATV 70 cm P.C. Electronics
  - puissance de transmission: 1 watt p.e.p.
  - fréquence: 439,25 Mhz ajustable
  - sortie vidéo: EIA-RS170
- 2 DC-DC convertisseur 9-18 volts à 12 volts, 1,25 amp.

Figure 4.10: Schéma et spécifications techniques de l'émetteur

Le récepteur et le moniteur, dont le diamètre de l'écran est de 4 pouces, furent installés dans une mallette portative (figure 4.11) surmontée d'une antenne. Le montage offre l'avantage d'être facilement transportable d'un endroit à un autre et offre une protection adéquate à l'équipement. Les spécifications techniques du récepteur et une représentation schématique sont données à la figure 4.12. Le système est alimenté par une batterie de 12 volts rechargeable qui est converti en 6 volts et régularisé pour le moniteur.

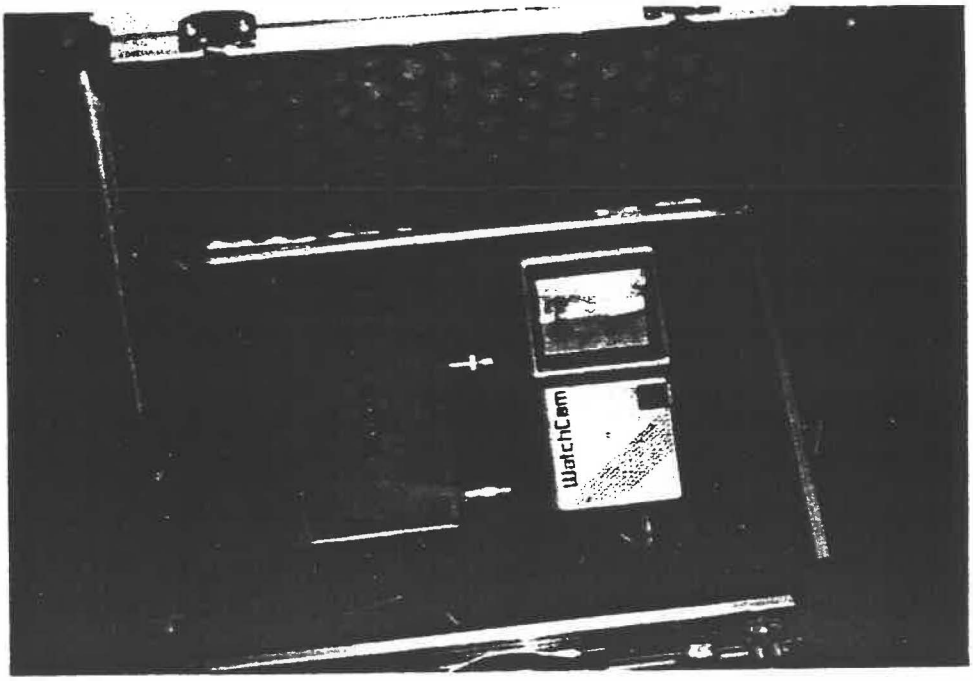
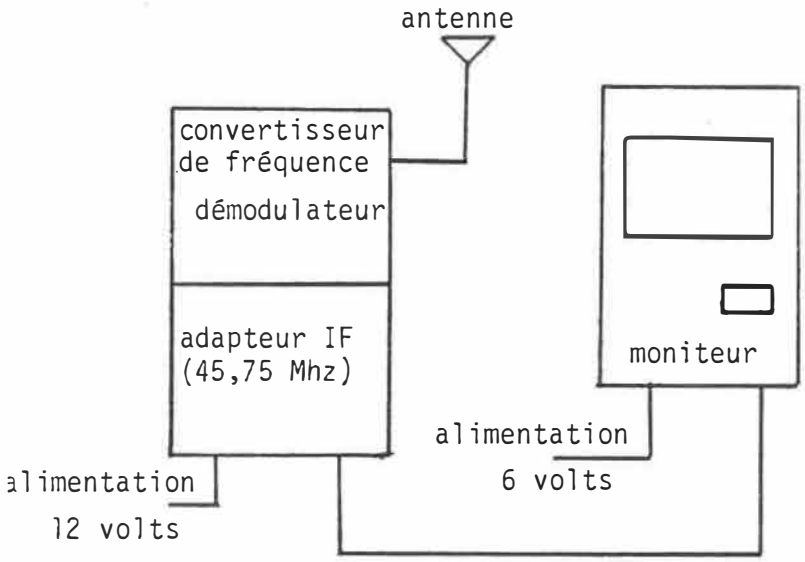


Figure 4.11: Montage de l'unité de réception



Caractéristique du récepteur

- Convertisseur de fréquence et adapteur de P.C. Electronics
- Moniteur 4 pouces Sony
- Convertisseur DC-DC 9-18 volts à 12 volts, 1,25 amp.
- Convertisseur DC-DC 9-18 volts à 6 volts, 2,5 amp.

Figure 4.12: Schéma et spécifications techniques du récepteur

Une fois l'installation complétée, le chargeur-transporteur fut conduit à un point de chargement. Le poste de contrôle fut installé à 23 mètres en retrait. Utilisant la télécommande, le chargement de la machine fut effectué jusqu'à ce que le godet apparaisse rempli sur le moniteur. Cette opération fut répétée à plusieurs reprises. L'expérience fut une réussite complète et fut suffisante pour démontrer l'utilité du système aux opérateurs.

Bien que le système ait résisté aux essais souterrains, l'émetteur s'est toutefois déréglé dans la rampe lorsque l'opérateur a

remonté le chargeur-transporteur en surface. Il fallait toutefois s'y attendre puisque le montage utilisé est de type expérimental et qu'il n'est pas fabriqué pour résister aux chocs durs. Cette situation peut être corrigée en construisant un émetteur de meilleure qualité.

Des problèmes ont également été rencontrés au niveau de la qualité de l'image reçue sur le moniteur. Cette image contient des zones blanches dues à l'éblouissement créé par la réflexion des phares du véhicule sur le métal nu du godet. Ce problème est toutefois facile à régler, soit en utilisant des filtres ou soit en réduisant l'intensité de l'éclairage du chargeur-transporteur lorsqu'on utilise le système de vision. Les parties métalliques éclairées devraient également être peintes en noir pour éviter les réflexions.

En plus de l'utilisation du système de vision pour le chargement, d'autres applications ont été envisagées par les dirigeants de la mine. Une application consiste à utiliser la caméra pour effectuer l'inspection des murs des chambres d'abattage. Une autre application consiste à utiliser le système pour aider à la récupération des chargeurs-transporteurs qui tombent en panne dans les chantiers ouverts. Jusqu'à présent, un système de crochet et d'attache a été développé mais il est très difficile de fixer l'attache autour du crochet de la machine en panne à l'aide d'un autre véhicule télécommandé, lorsque l'opérateur ne voit pas ce qu'il fait. Des essais ont été effectués avec le système de vision et l'opérateur a réussi assez facilement à fixer l'attache autour du crochet. L'opération demeure toutefois compliquée dû au fait

que l'opérateur ne perçoit pas l'effet de la profondeur sur le moniteur.

Les coûts des composantes du système vidéo installé sur le chargeur-transporteur sont indiqués au tableau 4.4. Ces coûts incluent uniquement les éléments du système vidéo et font exclusion de la main d'oeuvre et du matériel utilisé pour l'installation du système sur le véhicule.

items	coûts
caméra CCD Pulnix	2830 $
Lentille 8,5 mm auto-iris	415 $
Boîtier V-501	180 $
Moniteur Sony (WatchCam)	365 $
Transmetteur TX70-1	230 $US
2nd XTAL (434,0 - 439,25 MHz)	15 $US
Down Converter TVCX-70	115 $US
Receiver IF/ATV VRC45	100 $US
Boîtier Hammond #1590D	20 $US
Amplificateur Mirage D254N-ATV	220 $US
échange 32 %	224 $CA
Antennes	92 $
Régulateur et autres	1000 $
Total	5806 $

Tableau 4.4: Coûts des composantes du système vidéo

Quoi qu'il ait été relativement facile d'adapter le système sur le chargeur-transporteur, il n'en demeure pas moins que cette opération a demandé un certain temps et une bonne dose d'imagination et de sens pratique de la part des techniciens du département de génie électrique.

Une grande partie de ce travail a été effectuée en laboratoire dont entre autre, l'insertion de la caméra et de l'émetteur dans un boîtier étanche à l'épreuve de l'eau et de la poussière, de même que l'installation du moniteur de 4 pouces et du récepteur dans une mallette portative. Il a fallu ensuite développer les connexions appropriées pour rendre le système complètement portatif et facile d'entretien.

Tout ce travail s'est échelonné sur une période d'environ trois mois incluant les temps de commande du matériel. Par la suite, il a fallu trois postes de travail à la mine pour effectuer l'installation sur le chargeur-transporteur. Ce travail a consisté principalement à monter les fixations nécessaires sur la machine, à expérimenter différentes positions et différentes hauteurs de la caméra et à effectuer la mise au point du système.

Chapitre 5: REPRÉSENTATION GRAPHIQUE DU DÉPLACEMENT DU VÉHICULE EN TEMPS RÉEL

5.1 Généralités

Comme il a été vu à la section 4.1, la commande à distance d'un véhicule à l'aide de la téléopération comporte certaines difficultés, tout particulièrement dans les virages et les segments de parcours exigus. Ces difficultés proviennent du fait que l'opérateur n'a pas une vue complète du véhicule et qu'il est très difficile d'apprécier les distances à partir d'une image en deux dimensions. Ceci produit des temps de réaction très lents et occasionne des chocs le long des murs.

En vue de remédier à ce problème, une solution possible consiste à représenter graphiquement le déplacement du véhicule en temps réel. Ceci est équivalent à donner une vue à vol d'oiseau du déplacement du véhicule. Ces techniques sont utilisées dans les applications soumarines et spatiale [Sheridan 1978]. Elles permettent de compléter les informations reçues par une caméra en générant une image graphique du téléopérateur dans son environnement et/ou en fournissant une information alphanumérique superposer à l'image vidéo. Les représentations

graphiques permettent de réduire au minimum les informations utiles à l'opérateur pour ses manoeuvres.

5.2 Les informations extérioceptives

Pour créer une représentation graphique, il faut d'abord obtenir une information sur la position et l'orientation du véhicule dans son environnement. Bien entendu, il faut connaître l'environnement où le véhicule va circuler afin de pouvoir le localiser.

Les informations extérioceptives permettent de percevoir les caractéristiques du parcours (virage détecté par le système balise - interrupteur infra-rouge) et d'évaluer les déplacements du véhicule dans les corridors (système odomètrique). Ces informations s'obtiennent à l'aide des différents capteurs installés à bord du véhicule. Par la suite, ces informations sont traitées par micro-ordinateur et reproduites sur un écran cathodique.

5.3 Localisation du véhicule par intégration des déplacements

Afin de pouvoir représenter le déplacement du véhicule schématiquement, il faut connaître la localisation du véhicule en tout temps dans un environnement donné. Pour ce faire, la méthode de localisation utilisée est celle de l'intégration des déplacements à partir d'une position initiale connue.

Les encodeurs optiques installés aux roues arrières permettent

l'intégration du déplacement car les mesures obtenues à l'aide de ceux-ci donnent un déplacement incrémental; c'est-à-dire les déplacements de position Δx et Δy ainsi que l'orientation $\Delta\theta$.

Ce système de mesure est relié directement avec les caractéristiques physiques du véhicule tels que le diamètre des roues et la longueur de l'essieu. L'usure inégale des pneus, la présence de surface glissante ou le glissement des roues lors des virages ou encore d'éventuelles irrégularités sur le plancher peuvent réduire la précision de l'estimation de la position.

Quoi qu'il en soit, l'estimation de la position du véhicule (point central de l'essieu) se fait à l'aide de deux mesures prises dans un intervalle de temps t petit. En se référant à la figure 5.1, posons les définitions suivantes:

dg: distance parcourue par la roue gauche (en m) pendant l'intervalle de temps t;

dd: distance parcourue par la roue droite (en m) pendant l'intervalle de temps t;

dr: distance parcourue par le point central de l'essieu pendant l'intervalle de temps t;

$\theta(k)$: orientation final du point central de l'essieu;

$\Delta\theta$: variation de l'orientation du point central de l'essieu;

R: rayon de giration;

X(k): position du point final selon X;

Y(k): position du point final selon Y;

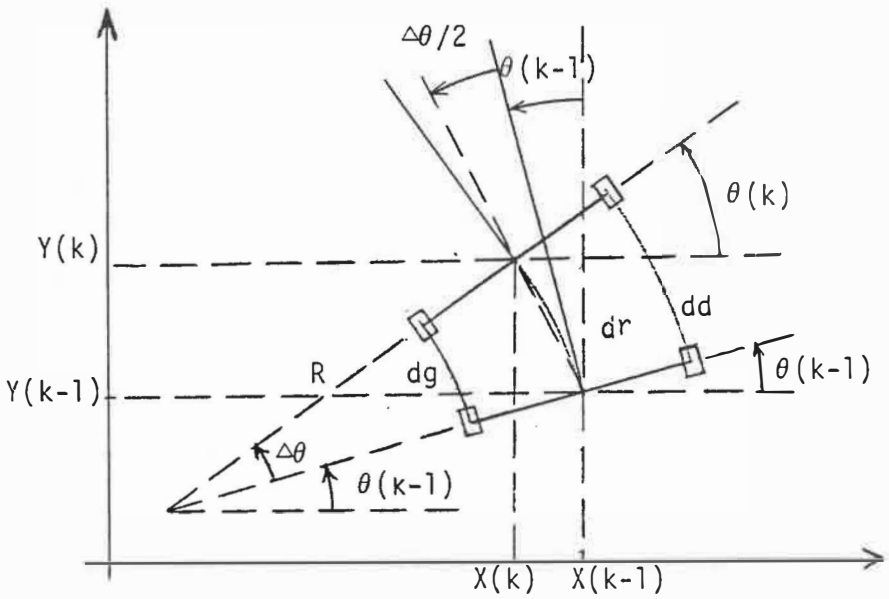


Figure 5.1: Principe de calcul de la localisation.

On peut écrire:

$dg = R * \Delta\theta$

$dd = (R + L) * \Delta\theta$

$dg - dd = (R * \Delta\theta) - (R * \Delta\theta) - (L * \Delta\theta)$

$\Delta\theta = \frac{dg - dd}{L}$

$dr = (R + L/2) * \Delta\theta$ et

$dr = \frac{(dg-dd)}{2}$

À l'aide de la figure 5.1, on peut déduire:

$\sin[\theta(k-1) + \Delta\theta/2] = [X(k-1) - X(k)]/dr$

$\cos[\theta(k-1) + \Delta\theta/2] = [Y(k) - Y(k-1)]/dr.$

Ceci permet de déterminer la position et l'orientation du point central de l'essieu, soit:

$$X(k) = X(k-1) - dr*\sin[\theta(k-1) + \Delta\theta/2]$$

$$Y(k) = Y(k-1) + dr*\cos[\theta(k-1) + \Delta\theta/2]$$

$$\theta(k) = \theta(k-1) + \Delta\theta$$

Expérimentalement, l'erreur de localisation du véhicule, en utilisant les encodeurs, est de l'ordre de 2 à 3 % de la distance parcourue.

5.4 Reproduction du déplacement sur écran cathodique

Tout d'abord, il faut reproduire le trajet qu'empruntera le véhicule. La figure 5.2 nous fait voir une reproduction graphique du parcours expérimental. Ensuite, il faut localiser le véhicule à l'intérieur de ce parcours. Les données nécessaires pour effectuer cette localisation sont obtenues à l'aide d'encodeurs optiques. Les capteurs ultrasons et les interrupteurs infra-rouges sont utilisés pour corriger les erreurs provenant du système odomètrique. Tous ces capteurs sont localisés sur le véhicule (voir chapitre 3).

Pour représenter les déplacements du véhicule, on fixe d'abord un point de départ le long du parcours et on initialise les encodeurs optiques à zéro. Par la suite, à intervalles de temps réguliers, on calcule la distance qui sépare le véhicule du point de départ. Ce calcul est effectué par intégration des déplacements. Le véhicule est alors

situé par rapport à son point de départ. Pour obtenir la position du véhicule par rapport à son entourage immédiat (distance qui sépare le véhicule de chacun des murs), on utilise l'information obtenue des capteurs ultrasons. Pour chaque point ainsi calculé, on représente le véhicule sur l'écran du moniteur. L'ensemble de ces déplacements successifs reproduit le mouvement du véhicule le long du trajet.

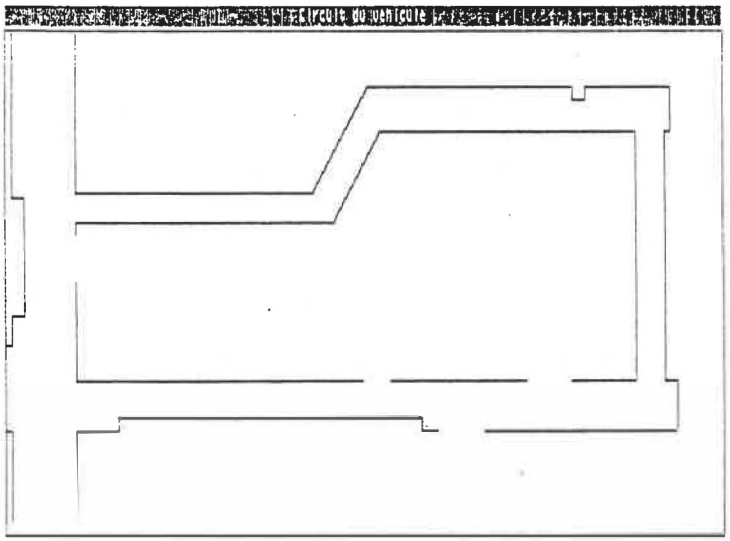
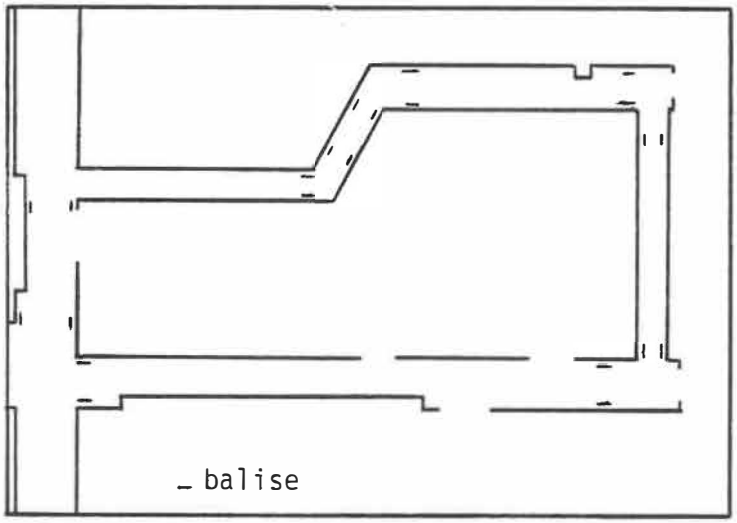


Figure 5.2: Représentation graphique du parcours expérimental

Les mesures odométriques induisent toutefois certaines erreurs (voir section 5.3). Ces erreurs sont cumulatives et il vient un temps où la position du véhicule, telle que montrée à l'écran, est tout à fait différente de l'endroit où se trouve le véhicule en réalité. Il faut donc procéder à un réajustement de position.

Deux types d'erreurs sont possibles: celles parallèles à la direction du déplacement et celles perpendiculaires à la direction du

déplacement. Le premier type d'erreurs a pour effet de faire bouger la position du véhicule vers la droite ou vers la gauche sur la représentation graphique. Pour effectuer la correction, on utilise les capteurs ultrasons latéraux montés sur le véhicule. Pour corriger le deuxième type d'erreur, on utilise un système de deux balises qui sont situées au début et à la fin de chaque virage (figure 5.3), et deux interrupteurs infra-rouges qui sont localisées sur le véhicule.



échelle
1 m : 3,5 mm

Figure 5.3: Position des balises dans le circuit expérimental

La localisation des balises est choisie de façon à obtenir la position exacte du véhicule avant et après les virages. Ceci permet de corriger les erreurs de position dues au glissements des roues dans les virages. Chaque fois que le véhicule passe devant les balises (points de coordonnées connus), les compteurs des encodeurs sont réajustés pour que la position calculée corresponde au déplacement réel. Quant à l'orientation, elle est donnée grâce à la distance parcourue (D) entre

les deux balises et la largeur du corridor (L). Le calcul de l'orientation est schématisé à la figure 5.4. Ceci annule du coup toutes les erreurs accumulées durant le déplacement précédent.

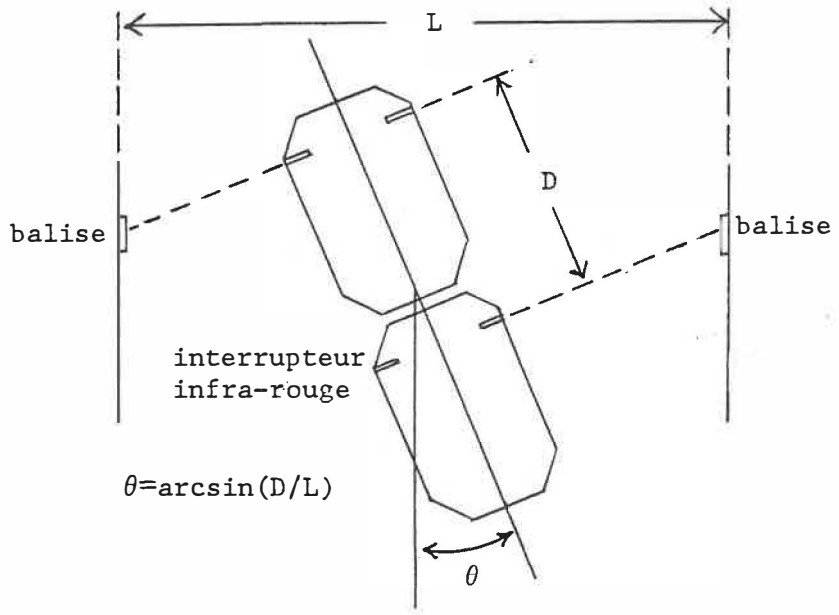


Figure 5.4: Principe de calcul de l'orientation du véhicule à l'aide des balises.

Lorsque le véhicule se déplace dans les segments rectilignes du trajet, tout le parcours est illustré à l'écran. Ceci permet à l'opérateur d'observer la position du véhicule par rapport à l'ensemble du trajet et d'anticiper les manoeuvres plus complexes à réaliser par la suite. Comme il est toutefois difficile d'évaluer la distance entre le véhicule et les murs, ces valeurs sont affichées à l'écran.

Dans les virages, on a besoin du maximum d'information sur la position du véhicule et sur son environnement. Pour minimiser les risques de collisions, on effectue un agrandissement de la zone où le virage est négocié. On produit ainsi une image à plus grande échelle d'où il est plus facile d'évaluer les distances entre le véhicule et les obstacles éventuels, tels que les parois des murs. Une fois le virage négocié, le trajet complet réapparaît de nouveau à l'écran à échelle réduite.

La programmation qui est reliée à la récolte des informations extéroceptives se retrouve à l'annexe 1. La programmation donnant la représentation graphique est donnée à l'annexe 2.

Chapitre 6: MISE AU POINT D'UN SYSTÈME ANTI-COLLISION ET D'ASSISTANCE DANS LES VIRAGES

6.1 Introduction

Lors des essais de téléopération en laboratoire, deux types de situations particulières ont rendu les manoeuvres de commande à distance difficiles et ont ainsi contribué à augmenter les temps de parcours et le nombre de chocs contre les murs. Ces situations se sont présentées lors des manoeuvres dans les couloirs étroits et lorsqu'il fallait négocier des virages serrés. De plus, il était difficile de percevoir d'éventuels obstacles le long du parcours lorsque la caméra était en plongé. Cette position donne une bonne vue des côtés du véhicule mais ne permet pas de voir adéquatement l'avant du véhicule.

Dans ces conditions, pour faciliter le travail de l'opérateur, il faut lui fournir une assistance supplémentaire. On peut alors faire appel à des éléments de la télérobotique en dotant le véhicule d'une certaine intelligence. Cette intelligence est toutefois de bas niveau puisqu'elle ne peut pas prendre de décision; elle peut toutefois réagir à certaines situations ce qui permettra d'éviter des obstacles, de

garder le véhicule à une distance sécuritaire des murs et de fournir un certain contrôle lors de la négociation de virages serrés pour éviter les collisions. La programmation de ces différents systèmes est donnée à l'annexe 3 et le relevé des capteurs est donné à l'annexe 1.

6.2 Système anti-collision frontale

Afin d'éviter de percuter d'éventuels obstacles pouvant survenir le long du parcours, un système anti-collision frontale a été développé. Ce système délimite une zone, à l'avant du véhicule, de façon à pouvoir immobiliser le véhicule d'essai avant qu'il n'y ait collision. Un obstacle est défini comme étant tout ce qui peut bloquer la route du véhicule; ce peut être un objet, un humain ou un trou dans le sol.

Des chercheurs de l'Université du Michigan [BORENSTEIN 1988] ont utilisé deux capteurs ultrasons sur un véhicule autonome pour délimiter une zone qui permet l'arrêt ou le contournement de l'obstacle par le robot. L'utilisation des capteurs ultrasons ne permet toutefois pas de détecter des trous le long du parcours, mais ces capteurs peuvent détecter des irrégularités grossières qui peuvent causer des collisions.

Dans le cas du véhicule expérimental téléopéré, un système semblable fut développé pour la détection d'obstacles. Les capteurs ultrasons sont localisés à l'avant du véhicule et ils effectuent un balayage frontal selon un cône de diffusion de 15°.

Afin de balayer la surface avant dans son entier, deux capteurs ultrasons sont inclinés à 30° par rapport à la verticale et sont situés à une hauteur de 41 cm du sol. Ce montage permet de couvrir une zone qui débute à 40 cm à l'avant du véhicule et qui s'étend jusqu'à 150 cm. Espacés entre eux de 12 cm et centrés à l'avant du véhicule, les capteurs ultrasons permettent de balayer une zone légèrement supérieure à la largeur du véhicule. La figure 6.1 montre l'arrangement des capteurs ultrasons et leur champ d'action.

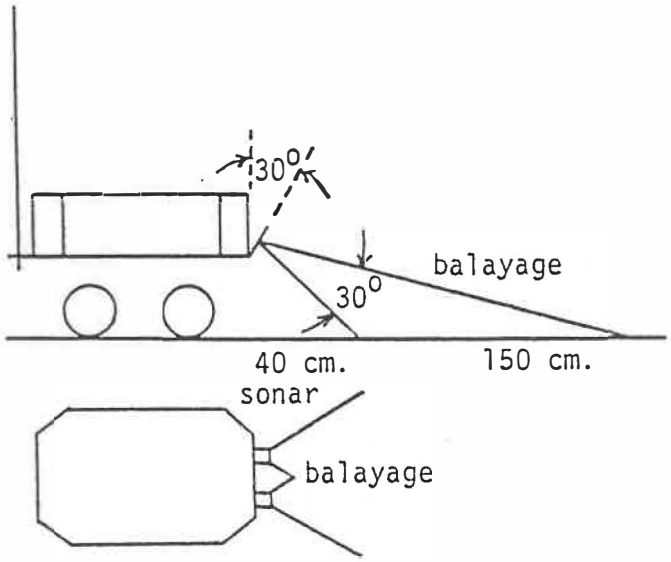


Figure 6.1 : Position des capteurs ultrasons pour le système anti-collision frontale

Avec cet arrangement, les capteurs ultrasons émettent des ondes qui frappent la surface balayée à des angles variables. Dans ces conditions, certaines lectures peuvent être totalement erronées, dépendamment de la valeur de l'angle de réflexion. Pour contrer ce problème, une lecture de base est prise et l'immobilisation du véhicule s'effectue lorsqu'un des capteurs donne une valeur différente de la lecture de

base. Si la lecture de base est trop sensible aux petits variations dues aux irrégularités du plancher, la lecture initiale des capteurs est réduite d'environ 5 %, ce qui résout le problème. La figure 6.2 montre le processus d'identification d'un obstacle.

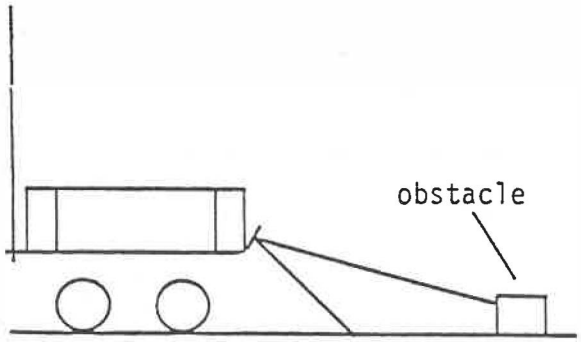


Figure 6.2: Repérage d'un obstacle, par les capteurs ultrasons

Lorsqu'un obstacle est identifié dans la zone de balayage des capteurs ultrasons, le système anti-collision prend charge du contrôle du véhicule et l'arrête automatiquement. Le véhicule demeure à l'arrêt jusqu'à ce que l'obstacle soit retirer de la zone. A ce moment l'opérateur reprend le contrôle du véhicule.

6.3 Système anti-collision latérale

Le système anti-collision latérale a pour but d'éviter que le véhicule n'aille percuter les murs. Ce genre de collision est dû à une fausse manoeuvre ou à une sous-évaluation des distances dans les corri-

dors qui ne permettent pas au véhicule une grande marge de manoeuvres perpendiculairement au sens du déplacement. Ce système utilise quatre capteurs ultrasons situés de part et d'autre du véhicule. La figure 6.3 indique le montage des capteurs ultrasons sur le véhicule. Cet arrangement permet de calculer la distance et l'angle entre le véhicule et mur.

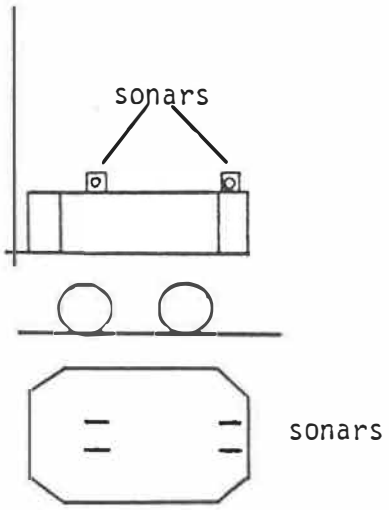


Figure 6.3: Position des capteurs ultrasons pour le système d'anti-collision latérale

Pour qu'il y ait risque de collision avec le mur, il doit y avoir un angle entre l'axe de déplacement du véhicule et le plan du mur. Plus cet angle est aigu et plus la distance entre le véhicule et le mur est faible, plus il y a imminence de collision. Il existe une valeur critique d'angle et de distance au-delà de laquelle la collision est inévitable. L'angle d'approche ne doit pas être supérieur à 25° (réflexion sur les blocs de béton) car au delà de cette valeur, les distances évaluées par les capteurs ultrasons ne sont plus fiables (section 3.4.3).

D'autre part, lorsque la distance mesurée perpendiculairement au mur par un capteur ultrason avant (distance d sur la figure 6.4) est inférieure à la distance critique (25 cm), l'ordinateur à bord du véhicule apporte automatiquement des corrections aux tensions qui sont appliquées sur les roues.

Les nouvelles tensions calculées sont fonction de l'angle de collision et de la vitesse d'approche. La trajectoire (figure 6.4) pour éviter la collision est calculée de sorte que lorsque la distance entre le véhicule et le mur atteint 15 cm, le véhicule redevient parallèle au mur.

Les nouvelles tensions calculées seront appliquées aux roues jusqu'à ce que le devant du véhicule ait atteint à nouveau une distance de 25 cm du mur. A ce moment, le contrôle est retourné à l'opérateur. La trajectoire empruntée par le véhicule lors des manoeuvres d'évitement de la collision est illustrée à la figure 6.4.

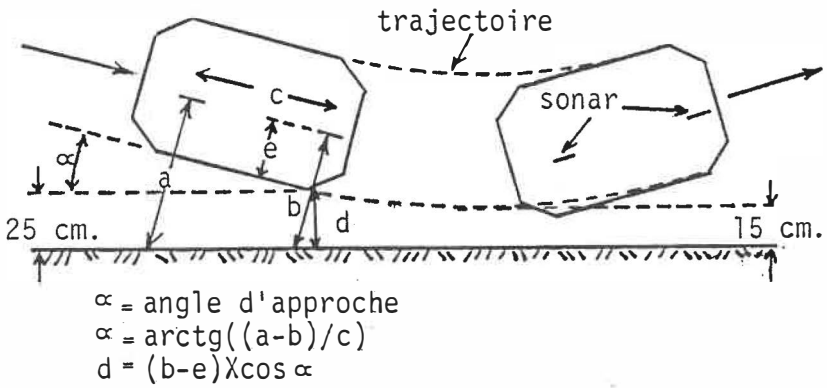


Figure 6.4: Trajectoire d'évitement de collisions avec le mur

Lors des essais en laboratoire, on a constaté que le système anti-collision ne permet pas toujours d'éviter les collisions. Ce problème résulte du fait que le système se base uniquement sur les données reçues des capteurs ultrasons pour effectuer ses calculs. Les capteurs ultrasons transmettent 3 à 5 mesures par seconde. Lorsque la vitesse du véhicule est élevée, cette fréquence de transmission est trop faible pour pouvoir calculer précisément la position du véhicule par rapport au mur, celui-ci ayant déjà parcouru une certaine distance en direction du mur dans cet intervalle de temps.

Cet exemple illustre bien le problème qui existe à représenter des informations extéroceptives en temps réel pour un véhicule en mouvement. Dans le cas présent, pour remédier à ce problème, il faudrait accélérer le taux des lectures des capteurs ultrasons pour qu'il puisse s'ajuster en fonction de la vitesse de déplacement.

6.4 Système d'assistance pour les virages serrés

Cette assistance devient nécessaire lorsque le système anti-collision latérale devient inefficace à cause des caractéristiques du parcours. Cette situation se présente lorsque les capteurs ultrasons ne peuvent plus suivre la courbure du parcours. A la figure 6.5, les positions (1) et (2) montrent des situations de parcours où le système anti-collision latérale peut être utilisé efficacement. La position (3) indique le type de virage où une assistance supplémentaire est requise.

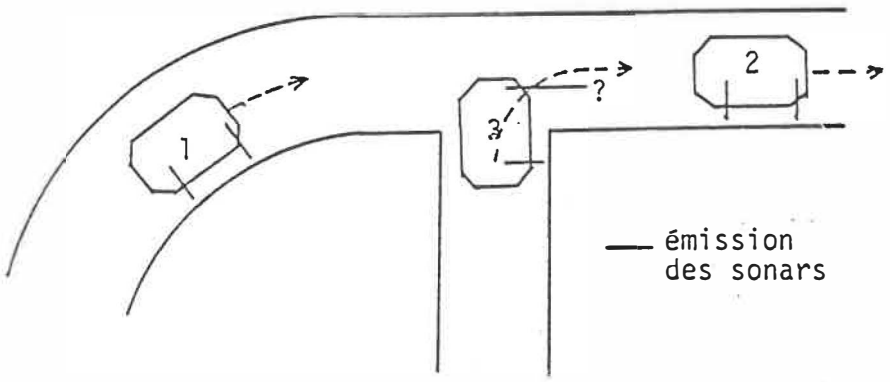


Figure 6.5: Situation de virage critique dans un parcours

Dans le parcours expérimental, le véhicule reconnaît qu'il doit effectuer un virage serré lorsqu'il rencontre une balise. A ce moment, l'opérateur détermine le sens du virage et le système d'assistance peut entrer en fonction.

Plusieurs rayons de courbure différents peuvent être utilisés pour négocier un virage. Ces rayons dépendent de la distance qui sépare le véhicule du mur lorsqu'il détecte une balise. Dans le cas où le véhicule est très près du mur, il doit tout d'abord avancer d'une certaine distance avant de pouvoir exécuter le virage. La figure 6.6 montre des rayons de courbure pour des positions limites du véhicule. Les lignes pointillées représentent la trajectoire que doivent suivre les roues arrières, car ce sont elles qui ont le contrôle de la direction du véhicule.

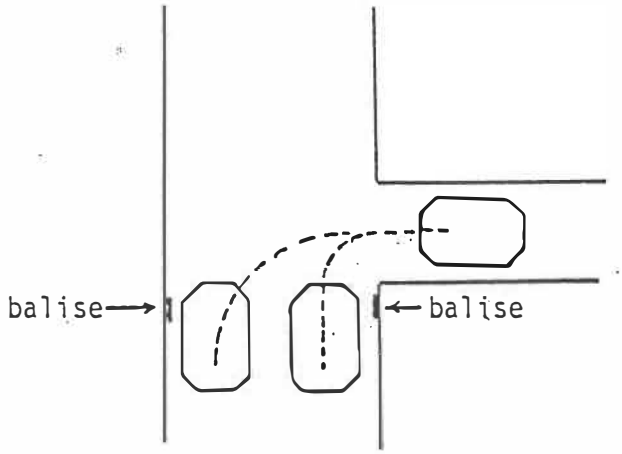


Figure 6.6: Différents rayons de courbures possibles pour effectuer un virage

Si le véhicule se situe en deça d'une distance minimale de 15 cm du mur, il ne peut pas entreprendre le virage. Cette distance est fixée par les dimensions du véhicule et celles du corridor.

La distance linéaire à parcourir (DL) avant d'amorcer un virage est fonction de la distance entre le véhicule et le mur (VM) et de la distance entre les roues motrices et le coin du corridor (RC).

$$DL = RC - (VM * RC)$$

Lorsque la distance entre le véhicule et le mur est petite, la distance linéaire à parcourir est grande, ce qui permet de dégager l'arrière du véhicule. Inversement, lorsque la distance entre le véhicule et le mur est grande, la distance linéaire est petite car le véhicule peut entreprendre un plus grand rayon de courbure. Le rayon est déterminé à partir de la distance entre le véhicule et le mur. Avec ces

données, de nouvelles tensions sont calculées. Ces tensions permettent aux roues arrières d'exécuter la trajectoire de virage sans que le véhicule ne percute contre le mur.

En théorie, ce système pourrait fonctionner pour toutes les ordres de vitesse. Cependant à grande vitesse, le système devient inefficace car les informations que l'on reçoit pour effectuer les calculs ne représentent plus la position réelle du véhicule par rapport à son cadre de référence, et que l'inertie du véhicule devient difficilement contrôlable.

Chapitre 7: ÉVALUATION DU POTENTIEL DE LA TÉLÉOPÉRATION APPLIQUÉE AUX ÉQUIPEMENTS MINIERS

7.1 Introduction

La téléopération peut aider grandement à l'amélioration de la qualité de vie au travail. Cette technique est utilisée dans différents domaines où la sécurité des opérateurs est en cause. Dans un environnement minier, la téléopération pourrait être utilisée pour tous les véhicules miniers. La figure 7.1 montre un schéma des fonctions nécessaires pour effectuer adéquatement la téléopération.

Le poste de contrôle comprend un premier moniteur pour recevoir les images vidéo et un second pour situer graphiquement la position du véhicule. À bord du véhicule, des capteurs sont installés afin de connaître son état de marche (monitoring), de détecter les obstacles qui se trouvent sur son parcours, d'éviter les collisions latérales et d'assister l'opérateur dans les manoeuvres difficiles. Ces informations sont transmises à un ordinateur pour y être traitées et pour apporter, s'il y a lieu, des corrections aux manoeuvres. Il faut également avoir un système de communication efficace entre le poste de contrôle et le

véhicule afin de maintenir une liaison constante entre l'opérateur et le téléopérateur.

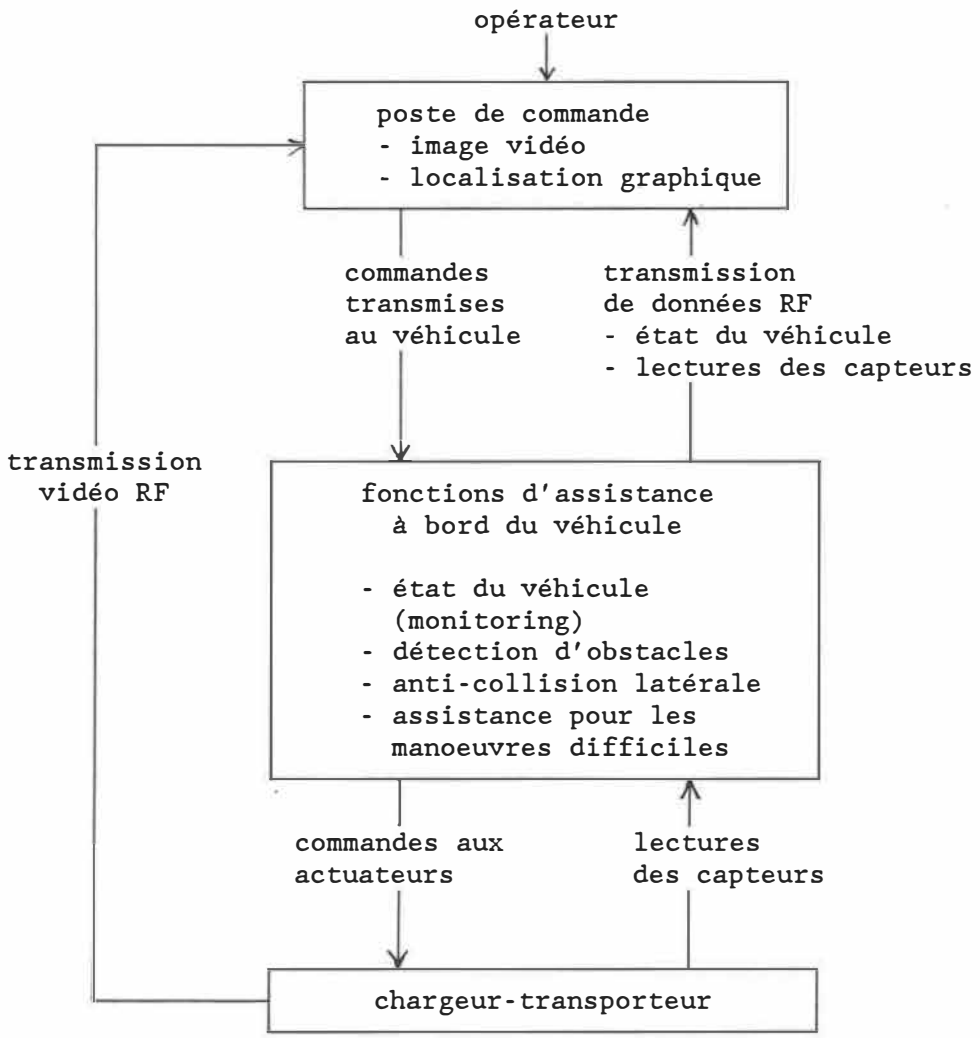


Figure 7.1: Système de téléopération.

7.2 Système de communication

La toute première chose à réaliser pour effectuer la téléopération en milieu souterrain est l'installation d'un système de communication entre l'opérateur et l'équipement (téléopérateur). L'opérateur peut être situé à la surface ou dans un poste de commande localisé sur un des niveaux de production.

Le système de communication doit permettre la transmission d'images, du son et des données relatives à l'état de l'équipement et de son environnement. Le système de communication doit être bidirectionnel afin de permettre la réception des informations provenant du téléopérateur et la transmission de commandes émises par l'opérateur.

Le système de communication le plus efficace est celui qui consiste à transmettre les informations par voie d'ondes herztiennes. Bien que ce type de communication soit flexible et peu encombrant, il demeure difficilement utilisable sous terre. La propagation des ondes en milieu souterrain est fiable seulement pour les parties rectilignes des galeries. Lorsqu'une courbe est présente dans le milieu de propagation, les ondes sont atténuées rapidement dans le roc.

Afin de contrer cet inconvénient, un câble électrique et/ou des relais pourraient être installés dans les galeries où la téléopération aurait lieu. Les ondes radios seraient alors transmises par ce câble et/ou ces relais et les informations seraient acheminées au poste de

contrôle. La figure 7.2 montre un système de communication par câble installé dans une galerie d'une mine de charbon. La figure 7.3a montre un système de communication dans un réseau de galeries et la figure 7.3b, un système de relais.

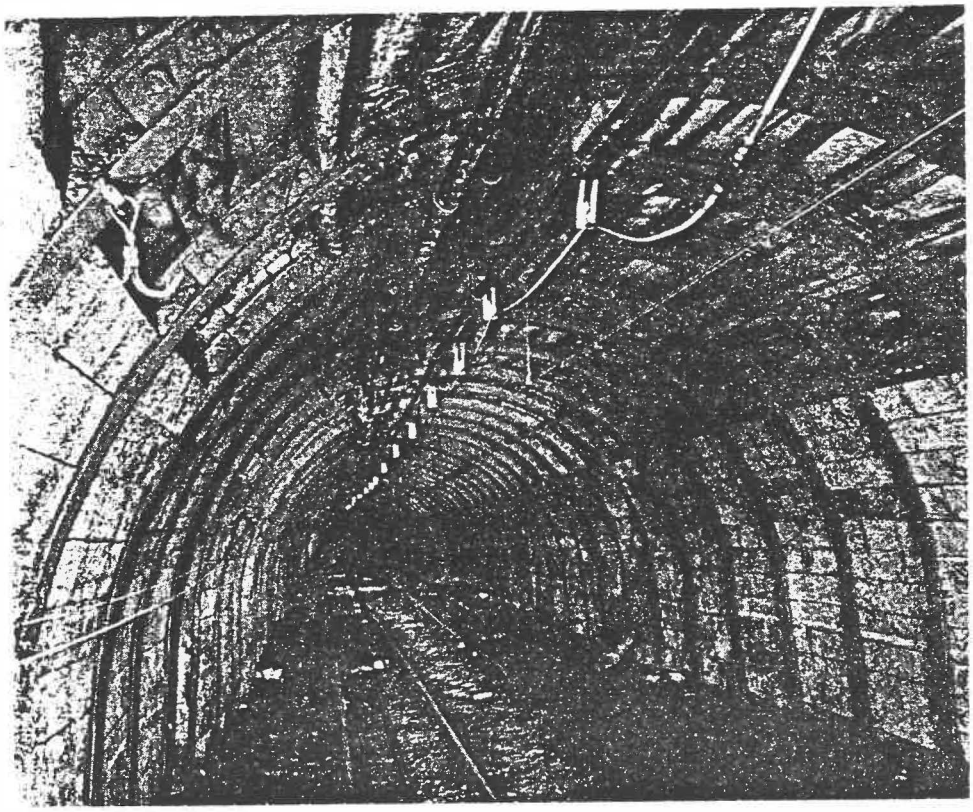
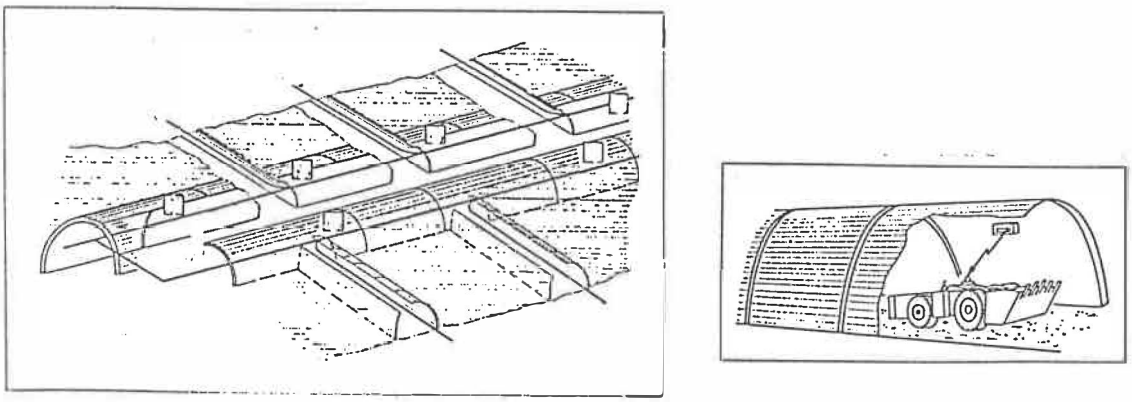


Figure 7.2: Système de communication dans un milieu souterrain.



a) b)

Figure 7.3: Système de communication dans un réseau de galeries et système de relais.

7.3 Application du système de vision

Comme il a été vu à la section 4.3, un système de vision a été installé avec succès sur un chargeur-transporteur. Dans cette application la caméra est installée et utilisée uniquement pour vérifier le chargement du godet. Afin de rendre le système plus performant et augmenter son utilisation, il faudrait jumeler la transmission du signal vidéo à un système de communication.

Ce système permettrait, avec un nombre de caméras approprié et un positionnement optimal, d'effectuer les déplacements du véhicule à l'aide du système de vision. Pour ce faire, il faudrait avoir une caméra pour le déplacement en marche avant et une autre pour la marche

arrière. Un jeu d'interrupteurs pourrait permettre à l'opérateur de visualiser la scène selon la direction du déplacement du véhicule.

Ces concepts de téléopération impliquant l'utilisation de caméras pour effectuer les déplacements pourraient être appliqués à d'autres types d'équipements. Par exemple, une foreuse jumbo téléopérée permettrait à un opérateur situé dans une salle de contrôle d'amener la foreuse au front de taille. De là, la foreuse pourrait réaliser automatiquement le patron de forage grâce aux développements technologiques accomplis sur les nouvelles foreuses. Pendant ce temps, l'opérateur serait disponible pour exécuter une autre tâche.

Un fois le forage complété, un véhicule téléopéré et muni d'un bras manipulateur pourrait effectuer le chargement des explosifs dans les trous de forage. Après le sautage de la volée, un chargeur-transporteur téléopéré exécuterait le déblaiement du front de taille.

Ainsi grâce à la téléopération, tout le développement horizontal pourrait se faire à partir d'une salle de contrôle. L'opérateur ne serait plus exposé à un niveau de bruit excessif lors du forage. De même, il ne serait plus exposé aux gaz toxiques et aux émanations de diesel dus à la difficulté de ventiler adéquatement le front de taille.

De plus, le système de vision pourrait être installé sur un chargeur à bras articulé (gathering arm loader). Cet équipement est muni de deux bras manipulateurs qui amènent le minerai sur un convoyeur et

qui le déverse dans une unité de transport. Présentement, cet équipement est contraint à demeurer à l'entrée du chantier pour ne pas exposer l'opérateur aux risques d'effondrements dans la chambre avec la machine. Dans les chantiers profonds, il en résulte une perte de minerai car l'opérateur ne peut pas atteindre le fond de la chambre avec la machine. L'installation d'une caméra sur cet équipement permettrait d'en retirer l'opérateur. Ainsi, grâce à une télécommande, celui-ci serait situé dans un endroit sécuritaire d'où il pourrait faire pénétrer le chargeur dans la chambre et augmenter le taux de récupération du minerai.

Dans une exploitation entièrement téléopérée, l'opérateur pourrait amener l'unité de transport (camion) au point de soutirage et le positionner pour le chargement. Par la suite, il pourrait effectuer le chargement du camion en transférant ses commandes à l'unité de chargement. Il en résulterait une meilleure productivité des opérateurs car les temps d'attente seraient abolis.

Les caméras utilisées dans ces applications peuvent être de type monoscopique ou stéréoscopique. Les caméras monoscopiques ont l'avantage d'être peu coûteuses et facile d'installation mais les images qu'elles transmettent peuvent être inadéquates lorsque l'on a besoin de l'effet de profondeur pour exécuter certaines tâches précises. La caméra stéréoscopique permet, elle, de fournir une image à trois dimensions de la scène d'opération. L'opérateur peut alors porter tout son attention aux commandes à effectuer.

Les récents développements technologiques effectués sur les caméras stéréoscopiques ont permis d'améliorer la qualité de réception de l'image et de l'effet de profondeur. Toutefois, leur installation s'avère plus complexe car il faut être très précis quant à la distance qui sépare les deux caméras et les deux moniteurs, puisque ce sont elles qui créent l'effet de profondeur. La caméra stéréoscopique est plus coûteuse que la caméra monoscopique.

Une étude portant sur l'application d'une caméra stéréoscopique en milieu sous-marin [PEPPER 1981] a permis de démontrer une amélioration dans les temps d'exécution d'une tâche. L'évaluation des performances a été faite à l'aide d'un manipulateur. Un environnement sous-marin a été reproduit en laboratoire. Les essais de manipulation ont été effectués avec un éclairage réduit et en présence de particules en suspension. Des opérateurs étant familiers avec la manipulation sous-marine ont exécuté une tâche qui requérait une évaluation de l'effet profondeur. La figure 7.4 donne les temps d'exécution de la tâche en fonction d'un degré de visibilité variant de bon à faible pour des essais réalisés à l'aide de caméras monoscopique et stéréoscopique. Les essais exécutés avec la caméra stéréoscopique démontrent bien que les temps d'exécution sont inférieurs à ceux exécutés à l'aide de la caméra monoscopique. La différence dans les temps d'exécution est d'autant plus forte que le degré de visibilité est plus faible.

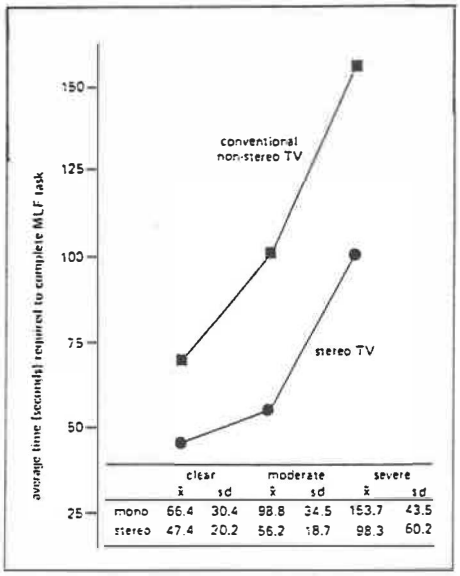


Figure 7.4: Résultats de manipulations, système de vision monoscopique versus stéréoscopique.

Il serait intéressant d'effectuer une étude semblable pour la téléopération d'un véhicule. Ceci permettrait de constater s'il y a des possibilités d'améliorer les performances de la téléopération comparativement à un système de vision monoscopique. Ce système n'est envisageable que pour des temps d'utilisation prolongés, car le poste de contrôle est difficilement transportable, à cause de la complexité des composantes qui le constitue.

Finalement, tout système de vision devrait être munis d'un mécanisme qui permettrait à l'opérateur de contrôler la rotation de la caméra dans un plan vertical et horizontal. Cette installation permettrait d'obtenir des champs de visions particuliers selon la tâche à exécuter.

7.4 Représentation graphique du déplacement

La représentation graphique du déplacement d'un véhicule peut servir d'outil de téléprésence à un opérateur. Elle complète l'image vidéo que l'opérateur reçoit du lieu d'opération en lui permettant de visualiser l'effet de profondeur et de localiser le véhicule dans son environnement immédiat.

Cette technique peut être utilisée pour tous les véhicules. Dans une mine, l'environnement du véhicule est connu. Un point de départ est fixé, et le véhicule est représenté dans son réseau de galeries immédiat. Cette représentation doit être à une échelle qui permettra d'apprécier adéquatement les distances entre les parois de la galerie et du véhicule. Lors du passage du véhicule dans une zone à l'extérieur de celle représentée sur le moniteur, un nouveau réseau de galeries devra être amené à l'écran. Afin de reproduire le mouvement du véhicule dans les galeries, il faudra installer des capteurs sur celui-ci qui permettront d'évaluer adéquatement les déplacements et de connaître la localisation exacte du véhicule en tout temps. Le système de communication devra permettre la transmission des données à une unité de traitement qui effectuera les calculs et la reproduction du graphique.

Alors que cette technique pourra faciliter la tâche de l'opérateur dans la réalisation des manoeuvres, elle pourra aussi être utilisée comme système de télésurveillance de l'ensemble des opérations souterraines. Sur un écran ou sur un tableau électronique, tous les

niveaux seront représentés, ce qui permettra de visualiser le déplacement de tous les véhicules dans la mine.

Cette vue globale de l'exploitation permettra de situer les véhicules dans la mine et de planifier les opérations à court terme. Lorsqu'un incident surviendra, il sera plus facile de prendre rapidement les actions pour corriger la situation. Dans ce contexte, ce système de télésurveillance deviendra essentiel pour les exploitations où il y aura des véhicules guidés automatiquement.

7.5 Systèmes anti-collision et d'assistance dans les virages.

Les véhicules téléopérés devront être dotés d'un certain niveau de télérobotique pour réduire les risques de collisions. Cette intelligence artificielle fournie au véhicule permettra à un opérateur de le commander sans posséder d'informations kinesthésiques ou sans recevoir toutes les informations visuelles qu'il aurait s'il était à bord du véhicule.

Pour appliquer ces concepts, il faudra munir le téléopérateur de capteurs fiables et justes. Ceux-ci transmettant de l'information, qui une fois traitée par un ordinateur, permettra au véhicule de réagir à des situations délicates où l'opérateur ne peut intervenir de façon efficace.

Ces techniques sont aussi appliquées aux manipulateurs [Bejczy

1980]. Le manipulateur est muni de capteurs tactiles tels les capteurs de proximités, les retours de forces etc. Les informations sont traitées par ordinateur et celui-ci assiste l'opérateur dans les manipulations. Des essais de téléopération ont été effectués en laboratoire à l'aide d'un système vidéo assisté par ordinateur comparativement à des essais effectués uniquement à l'aide du système vidéo. Les résultats de ces expériences ont permis de démontrer que les essais assités par ordinateur donnent des manipulations plus rapides, plus faciles, plus sécuritaires et plus précises.

Des systèmes semblables pourraient être appliqués à des véhicules miniers. Il faudra assister l'opérateur lors des manoeuvres jugées critiques ou difficiles, requérant des informations supplémentaires ou difficilement évaluables sur un moniteur. Dans le cas d'un véhicule se déplaçant dans un réseau de galeries, les manoeuvres jugées critiques ou difficiles sont, sans aucun doute, les virages à angle droit, les risques de collisions le long des parois de la galerie et les risques de collisions frontales.

De tels systèmes appliqués à un véhicule minier permettraient à un opérateur d'augmenter ses performances en téléopération et d'accroître ainsi la productivité. La téléopération combinée à l'assistance par ordinateur est un pas de plus vers la possibilité de rendre un véhicule autonome. La différence, dans ce cas-ci, est que l'opérateur prend les décisions.

Chapitre 8: CONCLUSION

Dans cette étude, différents aspects de la téléopération ont été abordés tels que l'utilisation d'une caméra sur un véhicule, la production d'une image graphique et l'utilisation de certains concepts de la télérobotique. Plusieurs applications existent déjà dans le domaine spatial et sous-marin. Toutes ces applications ont pour but d'éloigner l'opérateur des sites d'opérations potentiellement dangereux. La téléopération peut-elle alors s'appliquer à un chargeur-transporteur?

Des essais de téléopération en laboratoire ont permis de démontrer la faisabilité de téléopérer un véhicule expérimental dans des corridors à l'aide d'une caméra reliée à un moniteur par onde hertzienne. L'emplacement de la caméra sur le véhicule influence les performances des opérateurs. La position optimale est celle qui permet de visualiser l'ensemble du véhicule et sa localisation dans son environnement afin de pouvoir le situer par rapport aux murs. De plus, les résultats obtenus ont permis d'observer que la téléopération réduisait les performances lors des déplacements comparativement aux essais effectués sans système vidéo (contact visuel direct sur le véhicule). Cette réduction des performances s'observe avec une augmentation de 15 à 20 %

en moyenne du temps de parcours sur l'ensemble du circuit et une augmentation du nombre de chocs pouvant varier du simple au triple selon les opérateurs. Il est important de noter que les pertes de performance se situent généralement dans les parties serrées du parcours (les virages à 90°). Dans les parties rectilignes du parcours, les pertes de performances sont de l'ordre de 5 à 10 % du temps de parcours.

Par la suite, les essais de téléopération furent reportés dans un milieu souterrain afin d'en prouver la faisabilité. Ces essais effectués à l'aide du véhicule expérimental furent couronnés de succès.

La mise au point du système de vision et les essais effectués sur un chargeur-transporteur ont permis de démontrer la faisabilité d'utiliser la téléopération lors des opérations de soutirage en chambre profonde. Suite à cette démonstration, il est donc possible d'envisager une exploitation minière souterraine où tous les équipements seraient entièrement téléopérés.

Toutefois, une phase critique reste encore à développer; soit celle d'implanter un système de communication bi-directionnel. Ce système permettrait de transmettre une image vidéo dans un sens et les commandes de l'opérateur dans l'autre.

Afin d'améliorer les performances de la téléopération sur le véhicule expérimental, une image graphique du véhicule en mouvement a été créée à l'aide des capteurs montés sur un banc d'essai. Cette anima-

tion graphique du déplacement permet à l'opérateur de mieux visualiser les distances entre le véhicule et le corridor et de le situer par rapport à son environnement. Ces informations sont difficilement évaluables à partie d'une image vidéo.

De plus, la représentation graphique du déplacement pourrait être élargie pour effectuer la télésurveillance des équipements dans toute la mine. Ce système permettrait de connaitre les taux de productions des engins et d'en contrôler leur utilisation.

Certains éléments de la télérobotique ont également été développés sur le véhicule expérimental afin d'éviter d'éventuelles collisions et d'améliorer la performance des opérateurs dans leurs manoeuvres. Le système anti-collision frontale, qui utilise les capteurs ultrasons fonctionne très bien pour détecter des objets à l'avant du véhicule, mais il devient inefficace pour détecter les trous dans le plancher de la galerie. Le système anti-collision latérale utilise lui aussi des capteurs ultrasons qui aident à déterminer les distances critiques des murs et calculer la trajectoire d'évitement. Pour des vitesses inférieures à environ 0,5 m/s et des angles d'approche inférieurs à 25° le système évite, dans la plupart des cas, la collision avec le mur. Mais à des vitesses et des angles supérieurs aux valeurs limites, le système devient inefficace car la réponse des capteurs est trop lente et les lectures obtenues ne représentent plus la position réelle du véhicule. Pour l'assistance dans les virages, le même phénomène de retard se produit et , de plus, à grande vitesse, l'inertie du

véhicule est difficilement contrôlable.

Avant d'utiliser de tels systèmes pour des essais de téléopération, des capteurs plus justes et une récolte d'informations en temps réel en provenance du véhicule mobile devront être développés. Suite aux résultats observés à faible vitesse, des systèmes plus performants devraient augmenter grandement la précision des manoeuvres effectuées par les opérateurs.

Dans le cas d'un chargeur-transporteur guidé automatiquement, un système de téléopération demeure essentiel. La téléopération permet à l'opérateur d'effectuer le chargement du véhicule et de prendre la relève si le système de guidage tombe en panne, ou lorsqu'un imprévu survient sur le parcours du véhicule. La téléopération permet à l'opérateur de superviser et de toujours rester maître de son équipement.

La télérobotique peut s'appliquer pour que le véhicule évite les collisions latérales et frontales lors de ses déplacements téléopérés. Vu que les développements sur l'autonomie d'un véhicule sont très lents et difficilement applicables du point de vue temps de calculs et temps d'exécution, la télérobotique demeure une solution attrayante et relativement peu coûteuse. Elle permet d'éviter les fausses manoeuvres mais confère le niveau de décision à l'opérateur.

Chapitre 9: RECOMMANDATIONS

1. Développer et implanter dans une mine un système de communication bi-directionnel pour effectuer la téléopération dans l'ensemble des opérations de halage.
2. Effectuer des essais de téléopération où il y aurait une caméra mobile dont l'inclinaison et l'orientation seraient contrôlées par l'opérateur.
3. Faire l'essai d'une caméra stéréoscopique en téléopération afin de donner à l'opérateur un effet de profondeur.
4. Utiliser des capteurs tactiles plus performants et plus justes que les capteurs ultrasons pour développer des systèmes de protection sur véhicule.
5. Utiliser le traitement d'images dans un système anti-collision frontale afin de pouvoir analyser l'état de la route.
6. Construire un véhicule expérimental ayant les mêmes caractéristiques qu'un chargeur-transporteur à échelle réduite afin que les concepts développés sur celui-ci soient plus facilement transférables à un véhicule réel.
7. Développer des éléments de télérobotique tels que des systèmes anti-collision et d'assistance dans les virages plus robuste afin

d'augmenter la performance des opérateurs dans l'exécution de leurs manoeuvres.

10. Références

[BEJCZY 1986] Bejczy, A.K., "Teleoperators". Encyclopedia of Artificial Intelligence. Wiley-Interscience Publication. Vol. 2 pp. 1100-1101 New York 1986.

[BEJCZY 1980] Bejczy, A.K., Sensors, Controls, and Man-Machine Interface for Advanced Teleoperation. Science. Vol. 208 No 4450. pp. 1327-1335 June 1980.

[BROWN 1976] Brown, J.W., Shuttle Remote Manipulator System Workstation -Man-Machine Engineering. Proceedings 6th Congress of the International Ergonomics Associations. pp. 149-153 July 1976.

[CANMET 1982] CANMET. The Identification of Potential Applications for Robotics and Remote Control Systems in Canadian Mining. Vol. 1. Consultant study report for CANMET by Robertson, Nickerson Limited. 1982.

[CHEVRETTE 1988] Chevrette, G., Mercier, V. & al. Installation of a Video Transmission System on LHD to Assist Remote-Controled Operations in Underground Mining. 3e Symposium canadien sur l'automatisation minière. Montréal, Sept. 1988 pp. 203-207.

[CHIBA 1978] Chiba, J. Radio Communication in Tunnels. IEEE Transactions on Microwave Theory and Technics. No 6. June 1978 pp.439-443.

[CONWAY 1986] Conway, T.W. ROV Mantis: A Dual-Purpose Underwater Vehicle. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. OE-11 No 3 pp. 418-421 July 1986.

[DUFF 1980] Duff, J., Tousignant, B.R., Radio Remote Control of LHD Equipement. Canadian Mining Journal. Vol. 101 No 9 pp.31-34 September 1980.

[EMSHIE 1975] Emshie, A.G. & al. Theory of the Propagation of UHF Radio Waves in Coal Mines Tunnels. IEEE Transactions on Antennas an Propagation. Vol. AP-23 No 2 pp. 192-205 March 1975.

[FALCONBRIDGE 1985] Falconbridge Limited, Research & Development in Manitoba mines communication system for isolated areas in mines. Final report phase 1, CANMET, Projet No 4-9147-2. July 1985.

[FREEDMAN 1977] Freedman, L.A., Crooks, W.H., Coan, P.P., TV Requirements for Manipulation in Space. Mechanism Machine Theory. Vol. 12 No 5. pp. 425-438 1977.

[HEER 1978] Heer, E., The role of robots and automation in space. JPL Publication 78-78 California Institute of Technology. Pasadena. September 1978.

[Hurteau 1988] Hurteau, R., Piché, A., St-Amant, M., Experimental Results of the Teleoperation and Automatic Guidance of LHD's. 1st IFAC WorkShop on Advances in Automation in Underground Hard Rock Mining. Ville D'Estérel. September 1988 pp. 2.2.1 à 2.2.9

[KALLIO 1988] Kallio, P., Utilization, Automation and Data Transfer in the Operation of LHD Machines. 3rd Canadian Symposium on Mining Automation. Montréal, Canada. pp. 223-229. 1988.

[KIM 1987a] Kim, W.S., Tendick, F. & Stark, L.W., Telerobotics: Display Control and Communication Problems. IEEE Journal of Robotics and Automation. February 1987 pp. 67-65.

[KIM 1987b] Kim, W.S., Tendick, F. & Stark, L.W., Visual Enhancements in Pick-and-Place Tasks: Human Operator Controlling a Simulated Cylindrical Manipulator. IEEE Jounal of Robotics and Automation. Vol. RA-3 No 5 pp. 418-425 October 1987.

[LAATIO 1980] Laatio, E. & Hursti, H., Remote Control Loading at Vihanti base metal mine. World Mining. Vol. 33 No 12 pp. 32-34 November 1980.

[LECLERQ 1986] Leclerq, A. & Villeneuve de Janti, P., Télésurveillance et automatisation des machines minières mobiles. Revue de l'Energie. No 385 pp. 511-518 Août 1986.

[LIDDLE 1986] Liddle, D. TROJAN: Remotely Operated Vehicule. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol. OE-11 No 3 pp. 364-372 July 1986.

[MARTIN 1982] Martin, D.J.R., Leaky Feader Communication in Tunnels. Wireless World. Vol. 88 No 1557 pp. 70-75 June 1982.

[MARTIN 1982] Martin, D.J.R., Leaky Feader Communication in Tunnels. Wireless World. Vol. 88 No 1558 pp.33-37 July 1982. (suite).

[MILLER 1982] Miller, D.P. Evaluation of Vision Systems for Teleoperated Land Vehicle. Proceedings 1987 IEEE International Conference on System, Man and Cybernetic. pp. 476-480.

[MIKHIREV 1986] Mikhirev, P.A., Design of Automated Loading Bucket. Soviet Mining Science. vol. 22. #4, pp. 292-297. 1986.

[OLAF 1985] Olaf, J., Underground Coal Transportation. Engineering and Mining Journal. Vol. 186 No 6 pp. 24G-24K June 1985.

[Pepper 1981] Pepper, R.L., & Cole, R.E., Stereo TV Improves Operators Performance Under Degraded visibility conditions. Optical Engineering. July/August 1981. Vol. 20, No 4 pp. 579-585

[POISSON 1981] Poisson, J.B., Télécommande et télésurveillance des chargeurs transporteurs en chambres soutirées. Industrie Minérale -Les techniques. pp. 199-204 Mars 1981.

[POLAROID 1984a] Polaroid, Ultrasonic Ranging System. 1984.

[POLAROID 1984b] Polaroid, Polaroid Ultrasonic Ranging System Handbook: Application Notes/Technical papers. 1984.

[SHERIDAN 1987] Sheridan, T.B., Telerobotics. 10th IFAC World Congress on Automatic Control. Munich. pp. 103-117 July 1987.

[SHERIDAN 1986] Sheridan, T.B., Human Supervisory of Robots Systems. IEEE 1986 International Conference on Robotics and Automation. April 1986 pp. 808-812.

[SHERIDAN 1978] Sheridan, T.B., Verplank, W.L., Human and Computer Control of Undersea Teleoperators. Report to the Office of Naval Research. Contract N00014-77-C-0256. Man-Machine Systems Laboratory, Mass. Institute of Technology. 1978.

[THOMAS 1983] Thomas, C., Perspective de robotique dans les mines métalliques. Industrie minérale - Les techniques. Juin 1983.

[TRIBOUT 1979] Tribout, D., Télécommande d'une chargeuse transporteuse. Industrie Minérale - Mine. Décembre 1979.

[TSUSAKA 1986] Tsusaka, Y., Ishidera, H., Itoh, Y. MURS-300 MK II: A Remote Inspection System for Underwater Facilities of Hydraulic Power Plants. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Vol OE-11 No 3 pp. 358-362 July 1986.

[VAGENAS 1987a] Vagenas, N., Introduction to Automated Guided Vehicles Technology. Technical Report 1987:13T, Lulea University, Sweden.

[VAGENAS 1987b] Vagenas, N., Remote-Controlled/Automatic LHD (Load-Haul-Dump) System a Prestudy. Technical Report 1987:14T, Lulea University, Sweden.

[VAGENAS 1988] Vagenas, N., Remote-Controlled/Automatic Load-Haul-Dump (LHD) System in Underground Mining. Licientiate Thesis 1988:01L, Lulea University, Sweden.

ANNEXE 1

Routine pour les lectures des capteurs
et commandes aux actuateurs.

L'annexe 1 décrit la déclaration des constantes utilisées dans la programmation. Ces constantes contiennent les adresses des ports de communication entre l'ordinateur et les différents capteurs.

Cette annexe décrit aussi la procédure d'initialisation des ports et les procédures qui permettent d'effectuer les lectures. Cette lecture des ports permet de connaître les valeurs des différents capteurs installés sur le véhicule (capteurs ultrasons, encodeurs optiques et interrupteurs infra-rouges).

De plus, les procédures permettant d'utiliser l'horloge programmable sont présentées. Ces procédures permettent de démarrer l'horloge, de générer et mesurer un délai.

Pour terminer, les procédures qui permettent de lire les tensions envoyées par la télécommande et d'appliquer une tension sur chacun des moteurs des roues sont inclues dans cette annexe.

```
{====  Déclaration des constantes utilisées dans la programmation  ====}

const

   lab_master = $0710;      { adresse de la carte Lab master}

   porco4 = $021C;          {PPI #4 du BaseBoard (sonar gauche)}
   porc4  = $021D;          {Output}
   porb4  = $021E;          {Input}
   pora4  = $021F;          {Input}

   porco3 = $0218;          {PPI #3 du BaseBoard (encodeur droite)}
   porc3  = $0219;          {Low: Input - High: Output}
   porb3  = $021A;          {Input}
   pora3  = $021B;          {Input}

   porco2 = $0214;          {PPI #2 du BaseBoard (encodeur gauche)}
   porc2  = $0215;          {Low: Input - High: Output}
   porb2  = $0216;          {Input}
   pora2  = $0217;          {Input}

   porco1 = $0210;          {PPI #1 du BaseBoard (sonar droit)}
   porc1  = $0211;          {Output}
   porb1  = $0212;          {Input}
   pora1  = $0213;          {Input}

   port1  = $03F8;          {Port RS-232 (com1)}
   port2  = $02F8;          {Port RS-232 (com2)}

{=================================================================================}

Procedure init(val:integer);

{ Initialisation des ports et des convertisseurs}

var
  dummy, ii : integer;

begin

{ initialiser le PPI #1 (Sonar droite):
    port A : Input
    port B : Input
    port C : Portut                                        }

    Port[PORCO1]:=$092;

{ initialiser le PPI #2 (Encodeur gauche):
    port A : Input
    port B : Input
    port C : Low: Input - High: Portut                     }
```

```
    Port[PORCO2]:=$093;
    Port[PORC2]:=$080;
    Port[PORC2]:=$000;   { raz du compteur (impulsion) }


{ initialiser le PPI #3 (Encodeur droit):
    port A : Input
    port B : Input
    port C : Low: Input - High: Portut                 }

    Port[PORCO3]:=$093;
    Port[PORC3]:=$080;
    Port[PORC3]:=$000;   { raz du compteur (impulsion) }

{ initialisation du compteur programmable #1 du 9513 (LabMaster)
   pour être utilisé comme horloge programmable                    }

    Port[lab_master+9]:=$017;
    Port[lab_master+8]:=$000;
    Port[lab_master+8]:=$080;
    Port[lab_master+9]:=$001;
    Port[lab_master+8]:=$00A;
    case val of
         1 : dummy:=27;
         10 : dummy:=28;
         100 : dummy:=29;
         1000 : dummy:=30;
         10000 : dummy:=31;
         else dummy:=30;
    end;
    Port[lab_master+8]:=dummy;    {   fréquence d'horloge = 1MHz.
                                 27 = divise par 1 (T=.001 msec)
                                 28 = divise par 10(T=.01 msec)
                                 29 = divise par 100(T=.1 msec)
                                 30 = divise par 1000(T= 1 msec)
                                 31 = divise par 10000(T= 10 msec)     }

    Port[lab_master+8]:=$000;
    Port[lab_master+8]:=$000;

{ initialisation du PORT1 (rs-232) }

    Port[PORT1+3]:=$080; { Dlab = 1 }
    Port[PORT1+1]:=$000; { set 9600 baud }
    Port[PORT1]:=$00C;   { set 9600 baud }
    Port[PORT1+3]:=$01A; { set Dlab=0, 7 bits, parité paire,
                           2 stop bits}
    Port[PORT1+1]:=$000; { disable interrupt }
    dummy:= Port[PORT1];
```

```
{ remise à zéro des convertisseurs N/A }

    for ii:= 0 to 1 do
    begin
      Port[lab_master + (ii shl 1) + 1]:= ( 0 shr 8) and $00FF;
      Port[lab_master + (ii shl 1)]:= 0 and $00FF;
    end;

{ initialisation de la photoswitch }

    Port[lab_master+$F]:=$09A;
    Port[lab_master+$E]:=$003;
    Port[lab_master+$E]:=$000;

end;

{=================================================================}

Procedure horlogo;

{ procédure qui démarre l'horloge programmable
  (compteur #1 en mode ascendant)}

begin
  Port[lab_master+9]:=$061;
end;

{=================================================================}

Procedure horlotim(t:integer);

{ procédure qui permet de générer un délai de t/s seconde    }
{ après l'appel de HORLOGO. t = délai en unité "prs".   }

var
  dth, val, vah : integer;

begin
  dth:= 0;
  while ( dth < t ) do
  begin
    Port[LAB_MASTER+9]:=$0A1;
    Port[LAB_MASTER+9]:=$011;
    val:= Port[LAB_MASTER+8];
    vah:= Port[LAB_MASTER+8];
    dth:= (vah shl 8) or val;
  end;
end;

{=================================================================}
```

```
Function horlotes:integer;

{  procédure qui permet de calculer le délai de t/s seconde    }
{                  après l'appel de HORLOGO.                   }

       var
  dt, val, vah : integer;

begin
  Port[lab_master+9]:=$0A1;
  Port[lab_master+9]:=$011;
  val:= Port[lab_master+8];
  vah:= Port[lab_master+8];
  dt:= (vah shl 8) or val;
  writeln('Délai mesure dt = ',dt:8);
  horlotes:=dt;
end;

{=================================================================}

Function sonar(numero : integer) : real;

{ procédure qui retourne la valeur des sonars (en mètres):
                          numéro = 0 : arrière droit
                                   1 : avant droit
                                   2 : devant
                                   3 : avant gauche.}

var
  ii, jj : integer;
  s : array[0..2] of integer;
  valeur : real;

begin
  port[PORCO1]:=$092;
  case numero of
       0 : for ii:= 0 to 2 do
           begin
             Port[PORC1]:=ii*85;
             for jj:= 0 to 5 do;
             s[ii]:= Port[PORA1] and $000F;
           end;
       1 : for ii:= 0 to 2 do
           begin
             Port[PORC1]:=ii*85;
             for jj:= 0 to 5 do;
             s[ii]:= (Port[PORA1] and $00F0) shr 4;
           end;
       2 : for ii:= 0 to 2 do
           begin
             Port[PORC1]:=ii*85;
```

```
            for jj:= 0 to 5 do ;
            s[ii]:= Port[PORB1] and  $000F;
          end;
      3 : for ii:= 0 to 2 do
          begin
            Port[PORC1]:=ii*85;
            for jj:= 0 to 5 do;
            s[ii]:= (Port[PORB1] and $00F0) shr 4;
          end;
      else
         for ii:= 0 to 2 do s[ii]:= 0;
  end;
  valeur:= (s[0] * 0.1 + s[1] + s[2] * 10)*0.3048;
  sonar:=valeur;
end;

{=================================================================}

Function distance(numero:integer) : real;

{ procédure qui retourne la valeur d'un encodeur en mètres,
  numéro = 0: droit
           1: gauche.}

var
  valeur : real;
  tempo : integer;

begin
  case numero of
      0 : begin
          tempo:= Port[PORA2];
          valeur:= (tempo shl 8) or (Port[PORB2]);
          valeur:= valeur/kpd;
          end;
      1 : begin
          tempo:= Port[PORA3];
          valeur:= (tempo shl 8) or (Port[PORB3]);
          valeur:= -valeur/kpg;
          end;
      else valeur:=0;
  end;
  distance:= valeur;
end;

{=================================================================}
```

```
Function photolire(val:integer) : integer;

{ fonctions qui retourne l'incrémentation due à la détection
  d'une balise, numéro = 0: interrupteur droit
                         1: interrupteur gauche}
var
  valeur : integer;

begin
  case val of
  0: valeur:= Port[lab_master+$C];
  1: valeur:= Port[lab_master+$D];
  end;
  photolire:=valeur;
end;

{=================================================================}

Procedure moteur(sortie:byte; volt:real);

{ procédure qui applique une tension de plus ou moins 10 volts
  sur les moteurs sortie = 0 : moteur droit.
                         = 1 : moteur gauche. }

var
  vv : integer;

begin
  vv:= round(volt*204.7);
  if (vv >  2047)  then vv:=  2047;
  if (vv < -2047)  then vv:= -2047;

  PortW[lab_master + ((sortie) shl 1) + 1]:=(vv shr 8) and $00FF;
  PortW[lab_master + ((sortie) shl 1)]:= vv and $00FF;
end;

{=================================================================}

Function convan(canal:integer) : real;

{ fonction de conversion A/N via un des canaux (0 @ 15)
  de la carte lab_master}

var
  val : integer;

begin
  Port[lab_master+4]:=128;
  Port[lab_master+5]:=canal;
  Port[lab_master+6]:=0;
  while (Port[lab_master+4] < 128) do;
```

```
  val:= PortW[lab_master+5];
  convan:= val / 204.7;
end;

{=================================================================}

Procedure urgence;

{ procédure qui fait une remise a zéro des convertisseurs N/A afin
  d'arrêter le véhicule.}

var
  vt, ii : integer;

begin
  vt:= 0;
  for ii:= 0 to 1 do
  begin
    Port[lab_master + (ii shl 1) + 1]:=( vt shr 8) and $00FF;
    Port[lab_master + (ii shl 1)]:= vt and $00FF;
  end;
end;

{=================================================================}
```

Annexe 2

Programme: Représentation graphique

L'annexe 2 décrit la programmation qui a permis d'effectuer la reproduction graphique du déplacement. Ce programme inclut les différentes procédures de l'annexe 1, ce qui permet de faire la lecture des capteurs.

À l'aide de ces lectures, les procédures de ce programme calculent:

- à l'aide des encodeurs optiques:
  - la distance parcourue par le véhicule;
  - l'orientation du véhicule;
- à l'aide des capteurs ultrasons:
  - la correction de la trajectoire selon la distance entre le mur et le véhicule;
- à l'aide des interrupteurs infra-rouges:
  - le repositionnement du véhicule à une position absolue et connue;
  - l'orientation du véhicule selon la distance parcourue entre les deux balises.

De plus, les procédures graphiques qui permettent de reproduire le circuit et de générer le déplacement de la schématisation du véhicule sont aussi inclues.

```
Program Vehicule;

uses
   crt, gdriver, gkernel, gwindow, gshell, dos;

var
   monde, bid0, switch0, bid1, switch1, t, i, Flag2 : integer;
             B1,B2,B3,B4,Figure,Corr,A1,A2,A3,A4,No : integer;
   Positx,Kpd,Kpg,Angle,Temps,Periode,Posidr,Posiga : real;
                   Posidr1,Posigal,Posidr2,Posiga2 : real;
        phdistd, phdistg, Orien1,Orien2,Distx,Disty : real;
              Resetg,Resetd,Capt1,Capt2,Capt3,Capt4 : real;
                              photog, photod, Flag1 : Boolean;

const
   Larg = 0.53;

{$I b:\program\const.pas}
{$I b:\program\init.pas}
{$I b:\program\sonar.pas}
{$I b:\program\distance.pas}
{$I b:\program\photolir.pas}

Procedure Parcours;

{-----------------------------------------------------------------------
               Tracer du parcours du véhicule (corridor)
-----------------------------------------------------------------------}

Begin
  Drawline(0,0,-198,0);Drawline(-300,0,-1346,0);
  Drawline(-1346,0,-1346,353);Drawline(-1346,515,-1346,544);
  Drawline(-1346,544,-408,544);Drawline(-408,544,-232,870);
  Drawline(-232,870,682,870);Drawline(682,870,682,0);
  Drawline(682,0,480,0);Drawline(318,0,0,0); Drawline(0,-183,-76,-183);
  Drawline(-76,-183,-76,-137);Drawline(-76,-137,-1222,-137);
  Drawline(-1222,-137,-1222,-183); Drawline(-1222,-183,-1346,-183);
  Drawline(-1591,-500,-1591,-183); Drawline(-1591,-183,-1750,-183);
  Drawline(-1750,122,-1591,122);Drawline(-1591,122,-1591,220);
  Drawline(-1591,220,-1546,220);Drawline(-1546,220,-1546,641);
  Drawline(-1546,641,-1591,641);Drawline(-1346,-183,-1346,-500);
  Drawline(0,-183,877,-183); Drawline(-1591,641,-1591,1613);
  Drawline(-1346,1613,-1346,656);Drawline(-472,656,-277,1026);
  Drawline(-277,1026,491,1026); Drawline(491,1026,491,984);
  Drawline(491,984,537,984);Drawline(537,984,537,1026);
  Drawline(537,1026,870,1026); Drawline(852,870,794,870);
  Drawline(794,870,794,0); Drawline(794,0,877,0);
  Drawline(-1346,656,-472,656); Drawline(852,870,852,1026);
  Drawline(877,0,877,-183); Drawline(-1246,50,-1146,50);
  Drawline(-1146,50,-1146,150);Drawline(-1146,150,-1246,150);
  Drawline(-1246,150,-1246,50); Drawline(-1246,400,-1146,400);
```

```
  Drawline(-1146,400,-1146,500);Drawline(-1146,500,-1246,500);
  Drawline(-1246,500,-1246,400); Drawline(-400,900,-500,900);
  Drawline(-500,900,-500,1000);Drawline(-500,1000,-400,1000);
  Drawline(-400,1000,-400,900); Drawline(500,700,600,700);
  Drawline(600,700,600,800);Drawline(600,800,500,800);
  Drawline(500,800,500,700); Drawline(500,50,500,150);
  Drawline(500,150,600,150);Drawline(600,150,600,50);
  Drawline(600,50,500,50);
End;

Procedure Orientation;

{-------------------------------------------------------------------}
{Calcul de l'orientation du véhicule selon la valeurs des encodeurs }
{-------------------------------------------------------------------}

Begin
     Posidr:=(Posidr2-Posidrl)/Kpd;
     Posiga:=(Posiga2-Posigal)/Kpg;
     If (Posiga-Posidr<0.001) and (Posiga-Posidr>-0.001) Then
       Orien2:=0
     else
     Begin
       Orien2:=(Posiga-Posidr)/Larg;
       Orienl:= Orienl+Orien2;
     End;
End;

Procedure Distxy;

{-------------------------------------------------------------------}
{  Calcul des distances du véhicule selon la valeur des encodeurs   }
{-------------------------------------------------------------------}

var
  Theta,Long,ray : Real;

Begin
    If (Posidr-Posiga>0) and (Orien2<>0) Then
    Begin
       ray:=Posidr/Orien2-Larg;
    End;
    If (Posidr-Posiga<0) and (Orien2<>0) Then
    Begin
       ray:=Posiga/Orien2-Larg;
    End;
    If (Posiga-Posidr<0.001) and (Posiga-Posidr>-0.001) Then
    Begin
       Disty:= Disty+cos(Orienl)*Posiga;
       Distx:= Distx+sin(Orienl)*Posidr;
    End;
```

```
    If (Posiga-Posidr>0.001) or (Posiga-Posidr<-0.001) Then
    Begin
       Long:=sin(Orien2)*(ray+Larg/2)/(sin((3.1416-Orien2)/2));
       Theta:=3.1416/2-Orien1+Orien2/2;
       Distx:=cos(Theta)*Long+distx;
       Disty:=sin(Theta)*Long+disty;
   End;
End;

Procedure Tracer;

{-----------------------------------------------------------------}
{           Impression schématique de la position du véhicule       }
{-----------------------------------------------------------------}

Var
  X,Y : Integer;
  C1, C2, C3, C4 : Real;

Begin
    SetColorBlack;
    Drawline(A1,A2,A3,A4);
    Drawline(A1,A2,A1-B3,A2-B4);
    Drawline(A3,A4,A3-B3,A4-B4);
    Drawline(A1-B3,A2-B4,A3-B3,A4-B4);
    Drawline(A1-B3,A2-B4,A1-B3,A2-B4);
    SetColorWhite;
    X:=-Round(Disty*100);
    Y:=Round((Distx*100)-(Positx*100-10));
    B1:=Round(cos(-Orien1)*33);
    B2:=Round(sin(Orien1)*33);
    A1:=X+B2; A2:=Y+B1; A3:=X-B2; A4:=Y-B1;
    Drawline(A1,A2,A3,A4);
    B3:=Round((sin(-Orien1+3.1416/2)*104));
    B4:=Round((cos(Orien1+3.1416/2)*104));
    Drawline(A1,A2,A1-B3,A2-B4);
    Drawline(A3,A4,A3-B3,A4-B4);
    Drawline(A1-B3,A2-B4,A3-B3,A4-B4);
    Drawline(A1-B3,A2-B4,A1-B3,A2-B4);
End;

Procedure Correction;

{-----------------------------------------------------------------}
{        Correction de la trajectoire à l'aide des sonars          }
{-----------------------------------------------------------------}

Begin
  Posiga2:=Posiga2-Resetg; Posidr2:=Posidr2-Resetd;
  If (Capt1-Capt2<0.005) and (Capt1-Capt2>-0.005) and Flag1 Then
  Begin
```

```
    If (Posiga2-Posigal-Posidr2+Posidrl)=0 Then
       Corr:=Round(Posiga2-Posidr2)+Corr;
  end;
  Posiga2:=Posiga2-Corr/2;
  Posidr2:=Posidr2+Corr/2;
End;

Procedure Repositionne;

{-----------------------------------------------------------------}
{ Annulation des erreurs et repositionnement du véhicule lorsqu'une }
{ balise est détectée. (position absolue, et orientation selon la   }
{ selon la distance parcourue entre les deux balises.               }
{-----------------------------------------------------------------}

   Function arcsin(x:real):real;
   begin
      if x>=1 then arcsin:=3.1416/2
      else arcsin:=arctan(x/sqrt(-x*x+1));
   end;

   Function Angle(x:real):real;  { calcul de l'orientation }
   var
     distd, distg, longueur : real;
     chif : integer;
   begin
     distd:=distance(0); distg:=distance(1);
     longueur:=sqrt(sqr(distd-phdistd)+sqr(distg-phdistg));
     if photod then chif:=-1 else chif:=1;
     angle:=chif*arcsin(longueur/x);
   end;

Begin
  Resetg:=Posiga2+Resetg;
  Resetd:=Posidr2+Resetd;
  Corr:=0; Posidrl:=0; Posigal:=0;
  Case Flag2 of
  1:Begin
    Distx:=(Positx-0.1)-(Captl)-0.1;
    Disty:=12.46;
    Flagl:=false;Orienl:=angle(1.83);
    end;
  2:Begin
    Distx:=(Positx-0.1)+0.54;
    Disty:=13.46+(Captl+Capt2)/2+0.1;
    Flagl:=true;Orienl:=angle(2.45)+(3.1416/2);
    end;
  3:Begin
    Distx:=(Positx-0.1)+4.54;
    Disty:=13.46+(Captl)+0.1;
    Flagl:=false;Orienl:=angle(2.45)+(3.1416/2);
```

```
      end;
    4:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+5.44+(Capt1+Capt2)/2+0.1;
      Disty:=12.92;
      Flag1:=true;Orien1:=angle(1.12)+3.1416;
      end;
    5:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+5.44+(Capt1+Capt2)/2+0.1;
      Disty:=5.72;
      Flag1:=false;Orien1:=angle(1.12)+3.1416;
      end;
    6:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+6.72 ;
      Disty:=4.05 ;
      Flag1:=True;Orien1:=angle(1.13)*(2/3*3.1416);
      end;
    7:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+8.12 ;
      Disty:=3.35 ;
      Flag1:=false;Orien1:=angle(1.13)*(2/3*3.1416);
      end;
    8:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+8.7+(Capt1+Capt2)/2+0.1;
      Disty:=1.82;
      Flag1:=True;Orien1:=angle(1.56)+3.1416;
      end;
    9:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+8.7+(Capt1)+0.1;
      Disty:=-6;
      Flag1:=false;Orien1:=angle(1.56)+3.1416;
      end;
   10:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+8.2;
      Disty:=-6.82-(Capt1+Capt2)/2-0.1;
      Flag1:=True;Orien1:=angle(1.12)+(3/2*3.1416);
      end;
   11:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+1;
      Disty:=-6.82-(Capt1)-0.1;
      Flag1:=false;Orien1:=angle(1.12)+(3/2*3.1416);
      end;
   12:Begin
      Distx:=(Positx-0.1)+-(Capt1+Capt2)/2-0.1;
      Disty:=-6.32;
      Flag1:=true;Orien1:=angle(1.83)+(2*3.1416);
      end;
    end;
    Flag2:=Flag2+1;
  End;
```

```
{ Procédure Monde"x" permette de faire un zoom dans certaines parties  }
{                              du parcours.                             }

Procedure Monde1;

Begin
    ClearScreen;
    DefineWorld(1,-1650,1388,1050,-500);
    DefineHeader(1,'Circuit du vehicule');
    SelectWorld(1);
    SelectWindow(1);
    Parcours;
    SetHeaderOn;
    Drawborder;
End;

Procedure Monde2;

Begin
    ClearScreen;
    DefineWorld(2,-1750,325,-837,-228);
    DefineHeader(1,'Premier virage');
    SelectWorld(2);
    SelectWindow(1);
    SetHeaderOn;
    DrawBorder;
    Parcours;
End;

Procedure Monde3;

Begin
    ClearScreen;
    DefineWorld(3,-1750,803,-837,250);
    DefineHeader(1,'Deuxieme virage');
    SelectWorld(3);
    SelectWindow(1);
    SetHeaderOn;
    DrawBorder;
    Parcours;
End;

Procedure Monde4;

Begin
    ClearScreen;
    DefineWorld(4,-780,1056,100,500);
    DefineHeader(1,'Troisieme et quatrieme virage');
    SelectWorld(4);
    SelectWindow(1);
    SetHeaderOn;
```

```
    DrawBorder;
    Parcours;
End;

Procedure Monde5;

Begin
    ClearScreen;
    DefineWorld(5,220,1050,860,650);
    DefineHeader(1,'Cinquieme virage');
    SelectWorld(5);
    SelectWindow(1);
    SetHeaderOn;
    DrawBorder;
    Parcours;
End;

Procedure Monde6;

Begin
    ClearScreen;
    DefineWorld(6,350,200,990,-200);
    DefineHeader(1,'Sixieme virage');
    SelectWorld(6);
    SelectWindow(1);
    SetHeaderOn;
    DrawBorder;
    Parcours;
End;

Procedure Localisation;

{            Procédure permettant de déterminer le secteur            }
{                     où le véhicule se déplace                       }

Begin
    If (Disty>11) and (Disty<16) and (Distx>-2) and (Distx<2.5) Then
      Figure:=2
    else
    Begin
      If (Disty>11) and (Disty<16) and (Distx>2.5) and (Distx<7) Then
        Figure:=3
      else
      Begin
        If (Disty>-1) and (Disty<6.5) and (Distx>5) and (Distx<10) Then
          Figure:=4
        else
        Begin
        If  (Disty>-8.4) and (Disty<-2.5) and (Distx>7.5) and (Distx<11)
           Then Figure:=5
          else
```

```
          Begin
          If  (Disty>-8.5)  and  (Disty<-6) and (Distx>-2) and (Distx<2)
              Then Figure:=6
            else
            Begin
              Figure:=1;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
end;

Procedure Fenetre;

{    Procédure qui donne la représentation graphique selon un secteur  }
{                                du parcours.                          }

Begin
    Case Figure of
    1:Begin
      If Monde=1 Then Monde1;
      Monde:=2;
      end;
    2:Begin
      If Monde=2 Then Monde2;
      Monde:=3;
      end;
    3:Begin
      If Monde=3 Then Monde3;
      Monde:=1;
      end;
    4:Begin
      If Monde=2 Then Monde4;
      Monde:=1;
      end;
    5:Begin
      If Monde=2 Then Monde5;
      Monde:=1;
      end;
    6:Begin
      If Monde=2 Then Monde6;
      Monde:=1;
      end;
    end;
    SelectWorld(figure);
    Selectwindow(1);
end;
```

```
Procedure InitVar;

{         Procédure qui initialise les variables de départ              }

Begin
    Kpd:= 2000/(2*3.1416*(9.75/2)*0.0254);
    Kpg:= 2000/(2*3.1416*(9.75/2)*0.0254);
    Orienl:=0; Posigal:=0; Posidrl:=0; Distx:=0; Disty:=0;
    Flagl:=True; i := 0; Corr:=0; Resetg:=0; Resetd:=0;
    Monde:=1; Flag2:=1; no:=0; Captl:=sonar(2); Capt2:=sonar(1);
    photod:=false; photog:=false; Positx:=(captl+capt2)/2;
end;

BEGIN { Programme principal }

    t:=10;
    init(t);
    InitVar;
    InitGraphic;

    {boucle principale qui permet d'exécuter le parcours de 12 virages}

    while i <= 12 do
       begin
       bid0:=photolire(0); switch0:=bid0;
       bid1:=photolire(1); switch1:=bid1;

       {boucle qui permet le déplacement du véhicule entre les virages}

       While (bid0=switch0) or (bid1=switch1) do
       begin
         no:=no+1;

         { Lecture des capteurs }

         Posidr2 := distance(0)*kpd;
         Posiga2 := distance(1)*kpg;
         Captl   := sonar(2);
         Capt2   := sonar(1);
         Capt3   := sonar(0);
         Capt4   := sonar(3);

         { représentation numérique de l'angle, la distance parcourue }
         { et la valeur des capteurs }
         gotoxy(20,3);
         Write('ang= ',angle:8:3,'  y= ',Disty:8:3,'  x= ',Distx:8:3);
         gotoxy(20,4);
         write('dr1= ',captl:8:3,' dr2= ',capt2:8:3,' ga3= ',Capt4:8:3);
         switch0:=photolire(0); switch1:=photolire(1);
```

```
          Correction;
          Orientation;
          Distxy;
          Localisation;
          Fenetre;
          Tracer;
          angle:=Orienl/3.1416*180;
          Posidrl:=Posidr2; Posigal:=Posiga2;

          { calcul de la distance de parcours entre les 2 interrupteurs }

          if (switch0<>bid0) and not(photog) and not(photod)then
          begin
             photod:=true;
             phdistd:=distance(0); phdistg:=distance(1);
             sound(1000); delay(50); nosound;
          end;
          if (switchl<>bidl) and not(photod) and not(photog) then
          begin
             photog:=true;
             phdistd:=distance(0); phdistg:=distance(1);
             sound(1000); delay(50); nosound;
          end;

        end;

        bid0:=switch0; bidl:=switchl;
        sound(4500);
        delay(50);
        nosound;
        Repositionne;
        photog:=false; photod:=false;
        i:=i+1;

     end;

Gotoxy(1,20);
Write('Pressez une touche');
Repeat until KeyPressed;

END.  { programme principale }
```

Annexe 3

Programme: Anti-collision frontal et latéral;
Assistance dans les virages.

L'annexe 3 contient le programme qui permet de générer les systèmes anti-collisions latéral et frontal et l'assistance dans les virages serrés. Ce programme inclut aussi les procédures de l'annexe 1 afin de relever la valeur des capteurs et de pouvoir contrôler les commandes aux roues.

Le programme effectue la lecture des différents capteurs et de la tension envoyée par la télécommande. Par la suite, le programme fait appel aux procédures qui vérifient s'il y a possibilité de collision frontale et latérale ou s'il faut entreprendre un virage. Si les conditions sont remplies par l'une ou l'autre des procédures, le système réagit soit aux risques de collision frontale ou latérale ou bien il assiste l'opérateur dans un virage.

```
Program Assistance;

uses
   crt,dos;

var
 chif, switchg, bidg, switchd, bidd, t, fin : integer;
                                      capt : array[0..8] of real;
             initcapt2, initcapt3, kpd, kpg : real;
                        tensiond, tensiong : real;
                              distd, distg : real;
                           viragecomplet : boolean;
                                   bidon : char;

const
      roue = 0.57;
      cote = 0.77;

{$I a:\program\const.pas}
{$I a:\program\init.pas}
{$I a:\program\sonar.pas}
{$I a:\program\distance.pas}
{$I a:\program\urgence.pas}
{$I a:\program\moteur.pas}
{$I a:\program\convan.pas}
{$I a:\program\photolir.pas}

{=================================================================}

Function Arcsin(x:real) : real;

{ Calcul de l'inverse du sinus }

begin
   if x>=1 then
      arcsin:=3.1416/2
   else
      arcsin:=arctan(x/sqrt(-x*x+1));
end;

{=================================================================}

Procedure Lecture;

{ Procédure permettant la lecture des différents capteurs }

begin
   capt[0]:=sonar(0);
   capt[1]:=sonar(1);
   capt[2]:=sonar(2);
   capt[3]:=sonar(3);
```

```
   capt[4]:=sonar(4);
   capt[5]:=sonar(5);
   capt[6]:=sonar(6);
   tensiond:=convan(6);    {roue de droite, canal 6}
   tensiong:=convan(7);    {roue de gauche, canal 7}
   distd:=distance(0);
   distg:=distance(1);
   switchd:=photolire(0);
   switchg:=photolire(1);
end;

{=================================================================}

Function Angle(distd2, distg2, ref : real):boolean;

{ Fonction permettant de déterminer si le virage est complété }

var
  posidr, posiga, orien :real;
const
  larg = 0.53;

begin
  posiga:=distd-distd2;
  posidr:=distg-distg2;
  orien:=(posiga-posidr)/larg;
  if (orien<ref) and (orien>-ref) then angle:=true
  else angle:=false;
  if (tensiond-tensiong<0.1) and (tensiond-tensiong>-0.1) then
  angle:=false;
end;

{=================================================================}

Procedure Courbe;

{ Procédure qui permet d'assister l'opérateur dans les virages }

var
   temps, gauche, rayon, longueur, distd2, distg2 : real;
   ref, tension, arcg, arcd, vitg : real;

   Procedure Gauche;

   { Procédure qui permet d'effectuer le virage à gauche }

   begin
      arcg:=3.1416*(rayon+roue);
      arcd:=3.1416*(rayon-(roue/2));
      while Angle(distd2,distg2,ref) do
      begin
```

```
            if tensiond>0 then
            begin
               temps:=arcd/tensiond;
               vitg:=arcg/temps;

               { Si la vitesse est trop élevée,  une  tension  inverse  est
                 appliquée  à  l'autre  roue,  ceci  permet de contrecarrer
                 l'inertie du véhicule }

               if tensiond>6 then vitg:=-tensiond;
               gauche:=vitg;
            end
            else gauche:=0;
            moteur(0,tensiond);
            moteur(1,gauche);
            lecture;
         end;
      end;

      Procedure Droite;

      { Procédure qui permet d'effectuer le virage à droite }

      begin
         arcd:=3.1416*(rayon+roue);
         arcg:=3.1416*(rayon-(roue/2));
         while Angle(distd2,distg2,ref) do
         begin
            if tensiong>0 then
            begin
               temps:=arcg/tensiong;
               vitd:=arcd/temps;

               { Si la vitesse est trop élevée,  une  tension  inverse  est
                 appliquée  à  l'autre  roue,  ceci  permet de contrecarrer
                 l'inertie du véhicule }

               if tensiong>6 then vitd:=-tensiong;
               droite:=vitd;
            end
            else droite:=0;
            moteur(0,droite);
            moteur(1,tensiong);
            lecture;
         end;
      end;

   begin
      distd2:=distd; distg2:=distg;
      ref:=1.3;
      longueur:=0.77-((capt[0]+capt[1])/2-0.2)*0.77;
```

```
   rayon:=(capt[0]+capt[1])/2-0.2;
   distd2:=distd; distg2:=distg;

   { À une tension supérieure à 5,5, le virage s'exécute immédiatement,
     à cette vitesse, l'inertie du véhicule compense la distance
     linéaire à parcourir.}

   if tensiond>5.5 then
   begin
     urgence; delay(10);
   end
   else
   begin

     { boucle permettant d'effectuer la distance linéaire avant le
       virage }

     while longueur>(sqrt(sqr(distd2-distd)+sqr(distg2-distg))) do
     begin
        tension:=(tensiond+tensiong)/2;
        moteur(0,tension);
        moteur(1,tension);
        lecture;
     end;
   end;
   distd2:=distd; distg2:=distg;
   if tensiond > tensiong then Gauche;
   if tensiond < tensiong then Droite;
   bidd:=switchd; bidg:=switchg;
end;

{=================================================================}

Procedure obstacle;

{ Procédure qui évite les collisions frontales }

var
   i : integer;
   stop : real;

begin
   i:=1;
   while ((capt[2]<initcapt2) or (capt[3]<initcapt[3])) do
   begin
      clrscr;
      urgence; gotoxy(1,1);
      gotoxy(10,10);
      writeln('OBSTRUCTION !!!!    Déplacer l''obstacle');
      capt[2]:=sonar(2);
      capt[3]:=sonar(3);
```

```
      writeln;
   end;
end;

{=================================================================}

Function Tension(vites,distance,alpha:real):real;

{  Fonction  qui  calcule la tension d'une roue pour éviter la collision
  latérale}

var
   temps, arc, rayon, vit : real;

begin
   if alpha>0.4 then alpha:=0.4;
   rayon:=(distance*cos(alpha)-0.4)/(1-cos(alpha));
   arc:=alpha*rayon;
   if vites=0 then
      tension:=0
   else
   begin
      temps:=arc/vites;
      arc:=alpha*(rayon+roue);
      vit:=arc/temps;
       tension:=vit;
   end;
end;

{=================================================================}

Procedure antichoc;

{ Procédure permettant d'éviter les collisions latérales }

var
  distlim, alpha, tensd, tensg : real;

begin
   alpha:=(abs(arctan((capt[1]-capt[0])/cote)));
   distlim:=0.6/cos(alpha);
   if (capt[1] <= distlim) and (capt[0] > capt[1]) then
   begin
      while (capt[1]<distlim) do
      begin
         alpha:=(abs(arctan((capt[1]-capt[0])/coted)));
         distlim:=0.6/cos(alpha);
         if tensiong>4 then tensiong:=4;
         if alpha<0.15 then alpha:=0.15;
         if alpha=0 then
            tensd:=tensiong
```

```
          else
             tensd:=tension(tensiong,0.45,alpha);
          if capt[1]/cos(alpha)<0.5 then
          begin
            if tensiong>3 then tensiong:=3;
            moteur(0,2.5+tensiong);
            moteur(1,tensiong);
            delay(10);
          end;
          if (tensiond>tensiong) then tensd:=tensiond;
          moteur(0,tensd);
          moteur(1,tensiong);
          gotoxy(1,10);
          lecture;
          if ((bidd<>switchd) or (bidg<>switchg)) then
          begin
             writeln('Trop près pour excuter le virage');
             bidd:=switchd; bidg:=switchg;
          end;
       end;
    end;
    if (capt[4] <= distlim) and (capt[5] > capt[4]) then
    begin
    while (capt[4]<distlim) do
    begin
       alpha:=(abs(arctan((capt[4]-capt[5])/cote)));
       distlim:=0.6/cos(alpha);
       if tensiond>4 then tensiond:=4;
       if alpha<0.15 then alpha:=0.15;
       if alpha=0 then
          tensg:=tensiond
       else
          tensg:=tension(tensiond,0.45,alpha);
       if capt[4]/cos(alpha)<0.5 then
       begin
          if tensiond>3 then tensiond:=3;
          moteur(0,2.5+tensiond);
          moteur(1,tensiond);
          delay(10);
       end;
       if (tensiong>tensiond) then tensg:=tensiong;
       moteur(0,tensg);
       moteur(1,tensiond);
       lecture;
       if ((bidd<>switchd) or (bidg<>switchg)) then
       begin
          writeln('Trop près pour excuter le virage');
          bidd:=switchd; bidg:=switchg;
       end;
    end;
end;
```

```
end;

{=================================================================}

Procedure Variation(var td, tg :real);

{ Procédure permettant de limiter la  différence  de  tensions  entre  2
roues que l'opérateur peut transmettre.}

begin
   if tg-td>2.5 then
      tg:=td+2.5;
   if td-tg>2.5 then
      td:=tg+2.5;
end;

{=================================== Programme principal ==============}

begin
   t:=1;
   viragecomplet:=false;
   init(t);
   bidd:=photolire(0); switchd:=bidd; bidg:=photolire(1); switchg:=bidg;
   kpd:=2000/(2*3.1416*(9.75/2)*0.0254);
   kpg:=2000/(2*3.1416*(9.75/2)*0.0254);
   clrscr;
   writeln('Pressez un touche pour débuter');
   repeat until keypressed;
   read(bidon);
   initcapt2:=sonar(2);
   initcapt3:=sonar(3);
   while not keypressed do
   begin
     lecture;
     variation(tensiond,tensiong);
     obstacle;
     antichoc;
     if ((bidd<> switchd) or (bidg<>switchg)) then Courbe;
     moteur(0,tensiond);
     moteur(1,tensiong);
     gotoxy(1,10);
   end;
   read(bidon); urgence;
end.
```

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL
3 9334 00290844 8