UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

SYSTÈME INTÉGRÉ DE NAVIGATION AUTONOME DANS UN RÉSEAU DE GALERIES : EXPLORATION, GUIDAGE ET REPÉRAGE NATUREL

JOSEPH NSASI BAKAMBU

DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

THÈSE PRÉSENTÉE EN VUE DE L'OBTENTION

DU DIPLÔME DE PHILOSOPHIAE DOCTOR

(GÉNIE ÉLECTRIQUE)

DÉCEMBRE 2003

©Joseph Nsasi Bakambu, 2003

National Library
of Canada

Acquisitions and
Bibliographic Services

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque nationale
du Canada

Acquisisitons et
services bibliographiques

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-92160-3
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-92160-3

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

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

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this dissertation.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the dissertation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de ce manuscrit.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Cette thèse intitulée :

SYSTÈME INTÉGRÉ DE NAVIGATION AUTONOME DANS UN RÉSEAU DE GALERIES : EXPLORATION, GUIDAGE ET REPÉRAGE NATUREL

présentée par : NSASI BAKAMBU Joseph

en vue de l'obtention du diplôme de : Philosophiæ Doctor

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

M. GOURDEAU Richard, Ph.D, président.

M. COHEN Paul, Ph.D., membre et directeur de recherche

M. POLOTSKI Vladmir, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. AHMADI Mojtaba, Ph.D., membre

M. DUPUIS Érick, Ph.D., membre externe

À mes chers parents,
à la famille Bakambu,
à ma tendre épouse Doudou,
à ma chère belle soeur Pélagie et à ses enfants.

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier chaleureusement mon directeur de recherche Monsieur Paul Cohen pour m'avoir accueilli dans le Groupe de Recherche en Perception et Robotique (GRPR) et dans la chaire CRSNG industrielle en automatisation minière, pour avoir dirigé mon doctorat et aussi pour son soutien durant mon séjour au GRPR. Le GRPR est pour moi une famille.

Je remercie aussi Monsieur Vladimir Polotski pour m'avoir lui aussi encadré dans le long travail de cette thèse et, en particulier, pour toutes les discussions, souvent animées, que nous avons eues. C'est une occasion pour moi de vous témoigner ma gratitude en reconnaissant votre patience et votre expérience dans l'encadrement d'étudiants. Monsieur Hai Hong Nguyen et Monsieur Alexis Guigue méritent aussi ma reconnaissance pour les conseils et la révision de cette thèse. Je voudrais aussi que Wuwei, Xu Fuyi, Tong Weibing et Long Bo trouvent ici ma gratitude au nom de notre amitié.

Je voudrais exprimer ma gratitude à Monsieur Richard Gourdeau qui me fait l'honneur de présider le jury de cette thèse et qui a accepté la tâche de rapporteur.

Ma reconnaissance va également Monsieur Érick Dupuis pour avoir accepté de participer à ce jury comme membre et examinateur externe et aussi pour m'avoir très bien accueilli à l'Agence Spatiale Canadienne. Mes remerciements s'adressent aussi à Monsieur Ahmadi Mojtaba pour avoir accepté d'être membre du jury de cette thèse et aussi pour ses recommandations bénéfiques.

Je ne manquerai pas cette occasion pour remercier Nico Katembo Kombi, Jean Mari Lenga et Patrice Salama Nyembo pour leur soutien durant mes démarches pour venir au Canada. J'aimerais remercier particulièrement la famille Paku Mapangula Paphi, la famille Bakambu et la famille Mbi et surtout ma tendre femme pour tout.

Je remercie aussi toutes les personnes du Groupe de Recherche en Perception et Robotique (GRPR) pour leur aide directe ou indirecte. Je ne nommerai personne car la liste est trop longue et j'ai peur d'oublier quelqu'un de très cher, mais ils se reconnaîtront; ce sont des chercheurs, des associés de recherche, des étudiants, des stagiaires, des secrétaires qui sont restés parfois peu de temps au GRPR, souvent longtemps ou qui sont encore à l'École Polytechnique de Montréal.

J'adresse une pensée amicale à tous les amies et amis anciens et nouveaux étudiants étrangers en République Populaire de la Chine pour leurs conseils, leurs idées, leur aide et les fructueuses discussions qui en ont suivi. Pour terminer, un grand merci à mon père, ma mère, mes frères et mes sœurs.

Résumé

Le problème abordé dans cette thèse concerne la conception, le développement et la validation d'un système intégré de navigation autonome pour l'exploration et la navigation autonome dans des environnements de type réseaux de galeries inconnus ou partiellement connus. Les mines souterraines et les caves sont des exemples typiques d'environnements visés dans cette thèse. Dans ce contexte, nous proposons un système fonctionnant en deux modes : *l'exploration d'environnement* et *l'exécution autonome de missions globales de navigation.*

Dans le premier mode de fonctionnement, le système dispose en entrée d'un croquis préliminaire de l'environnement fourni, en ligne, par les capteurs. Le superviseur, à l'aide de l'interface humain-machine, guide le véhicule vers la région désirée. Les informations sur les déplacements, fournies par l'odomètre, le gyroscope et l'inclinomètre, et les mesures télémétriques sur l'environnement dans les plans osculateur et normal à la trajectoire du véhicule sont récoltées et concaténées en cartes métriques 2D et 3D.

Dans le second mode de fonctionnement, la carte métrique 2D construite à l'issue du mode précédent constitue l'entrée de référence du système. Il s'agit alors pour le véhicule

d'exécuter des tâches de navigation en se basant sur cette référence. À l'aide de l'interface, le superviseur définit sur la carte les missions globales de navigation. Le planificateur de mission traduit chaque mission en *actions de navigation*. Chaque action de navigation est délimitée par un repère naturel et est constituée d'un chemin de navigation et d'un mode de navigation. Le *contrôleur de navigation référencée par carte* exécute ensuite toutes les actions de navigation de façon autonome. L'exécution de missions implique la combinaison de différentes fonctionnalités : l'acquisition et le traitement de données sensorielles par intégration multicapteurs, le suivi de parois, la planification et le suivi de chemin, la détection d'obstacles, la reconstruction 2D et 3D de l'environnement, la localisation du véhicule et la détection de repères naturels.

Les fonctionnalités mentionnées ci-dessus ont toutes été développées et intégrées sur une plate-forme expérimentale qui a été testée avec succès en laboratoire et dans une mine souterraine. Cette thèse décrit la plate-forme, l'architecture du système ainsi que la structure algorithmique des modules. Les résultats des expériences réalisées en laboratoire et dans la mine souterraine Brunswick de Noranda sont présentés et des suggestions d'amélioration sont proposées. Ces résultats montrent que le système intégré proposé est fiable.

Les contributions innovatrices de ce travail portent sur les éléments suivants:

(1) Mise en évidence d'un *contrôleur de navigation référencée par carte*, celle-ci étant acquise préalablement par le véhicule. Ce contrôleur intègre dans sa

boucle de contrôle les informations topologiques de l'environnement, les informations télémétriques, odométriques et inertielles. Il permet d'apporter une solution au problème de guidage d'un véhicule autonome à la fois dans des galeries et dans des intersections de galeries.

(2) Développement de *stratégies d'intégration multicapteurs*, en l'occurrence un gyroscope, un inclinomètre et un odomètre. Les mesures d'inclinomètre sont utilisées pour compenser l'erreur du gyroscope due aux perturbations du tangage et du roulis provoquées par l'irrégularité du terrain. L'information gyroscopique corrigée est ensuite utilisée pour corriger l'orientation fournie par l'odométrie.

(3) Développement d'une méthode de localisation basée sur l'identification de *repères naturels* (baies et intersections). Ceci se fait par la mise en correspondance des repères naturels sur la carte avec ceux détectés en ligne.

(4) Réalisation d'un *système d'arpentage autonome 2D et 3D en milieu non structuré*.

Les domaines d'application du système proposé sont nombreux : l'exploration, l'arpentage et navigation dans un réseau de galeries (les mines souterraines par exemple), la surveillance intérieure de bâtiments, l'intervention en milieu dangereux ou sinistré, l'inspection de réseaux de distribution d'eaux, d'égouts, de pipelines, etc.

Abstract

This thesis addresses the problem of the design, development, and validation of an integrated autonomous navigation system for a mobile robot exploring and navigating in an unknown or partially known drift-type environments. Underground mines or caves are typical examples of such environment. In this context, we propose a system allowing two modes of operation: *exploration/surveying mode* and *autonomous navigation mode*.

In the exploration/surveying mode, the supervisor specifies a motion path through designated areas on a preliminary sketch of the environment provided on-line by sensors, using a remote interface. Geometrical data from range finder, odometry, and inertial sensors are then collected along the path and concatenated into 2D/3D metric maps of the environment.

In the autonomous navigation mode, high-level missions are specified based on the previously acquired 2D map. A motion planner translates each mission into a set of consecutive *navigation actions*; each one is delimited by natural landmarks (such as

intersections) and consists of a *navigation path* and a *navigation mode*. A map-based navigation *executive controller* executes navigation actions autonomously. Mission execution involves a combination of functions: multisensor data acquisition, processing and integration, odometry and wall-guided motion control, path planning and tracking control, obstacles detection, sensing and surveying, and 2D/3D maps building, vehicle localization, and natural landmarks detection.

Each function mentioned above is developed and integrated in an experimental platform which has been successfully tested in the laboratory and in an underground mine. This thesis describes the platform, the system architecture, the task execution algorithms structures, and it also presents the results of the experiments. Experiments were performed in the laboratory environment and in Noranda's Brunswick underground mine. The experiments results show that the proposed system can perform the expected tasks reliably in a real mine environment. However, suggestions are made for further improvements and developments.

The innovative contribution of this thesis can be summarized as follow:

(1) Design and development of an *executive controller* for map-based navigation. This uses the 2D map previously generated by the vehicle and addresses the challenging problem of steering a vehicle through drifts and intersections

autonomously. It uses the topological information of the environment, range data, odometry data, and inertial sensing data as inputs to its control loop.

(2) Development of *sensor integration strategies* to integrate data from the gyroscope, inclinometer and odometry. Data from the inclinometer are used to compensate the gyroscope error caused by ground unevenness; then the corrected gyroscope data are used to correct odometry-based orientation.

(3) Development of a self-localization method based on natural landmarks (intersections and bays) identification. The natural landmarks are detected on-line and matched with their correspondents in the map, and the vehicle coordinates are then computed.

(4) Development of an autonomous 2D/3D surveying system for an unstructured environment. Data from forward-looking and upward-looking rangefinders, odometry, and inertial sensors are collected and processed.

Targeted applications of this work are as follow: exploration, survey, and autonomous navigation in drift-type environments (underground mine for example), surveillance inside buildings, rescue operation in a dangerous or damaged area, inspection of pipelines, sewer and water distribution networks, etc.

Table des matières

Dédicace iv

Remerciements v

Résumé vi

Abstract ix

Table des matière xii

Liste des figures xviii

Liste des tableaux xxv

Chapitre 1 : Introduction 1

Chapitre 2: Architecture et configuration du système 13

2.1 Introduction 13

2.2 Les Architectures des systèmes existant 14

2.2.1 Les architectures délibératives ou hiérarchiques 14

2.2.2 Les architectures réactives ou comportementales 21

2.2.3 Les architectures hybrides 24

2.2.4 Comparaison de famille d'architecture 27

2.3 Architecture du système proposé 28

2.3.1 Description générale de l'architecture du système 28

2.3.2 Spécification des missions du système 30

2.3.3 Modules du système 37

2.4 Configuration du système proposé 45

2.4.1 Description de la configuration du système 45

2.4.2 Plate-forme mobile 46

2.4.3 Plate-forme multi-capteurs 47

2.5 Récapitulation 49

Chapitre 3: Navigation locale 50

3.1 Introduction 50

3.2 Intégration multi-capteurs 52

3.2.1 Introduction 52

3.2.2 Erreurs et Calibration du gyroscope 53

3.2.3 Intégration des données de l'inclinomètre avec celle de l'odométrie 59

3.2.4 Intégration de l'inclinomètre avec le gyroscope 60

3.2.5 Expériences et résultats d'intégration multi-capteurs 61

3.3 Localisation référencée multi-capteurs 64

3.3.1 Pourquoi la localisation est-elle importante? 64

3.3.2 Localisation basée sur l'odométrie 66

3.3.3 Intégration Inclinométrie-Gyroscopie-Odométrie 69

3.3.4 Synthèse de la technique de la localisation proposée..... 72

3.4 Détection d'obstacles 74

3.4.1 Objectif de la détection d'obstacle 74

3.4.2 Algorithme de détection d'obstacle 75

3.4.3 Expérience et discussion 77

3.5 Détection de repères naturels 80

3.5.1 Introduction 80

3.5.2 Définition d'éléments topologiques 82

3.5.3 Expérimentation et discussion 96

Chapitre 4 : Contrôleur de mouvements 98

4.1 Introduction 98

4.2 Description du problème 98

4.2.1 Décision 99

4.2.2 Adaptation 99

4.2.3 Commande 100

4.2.4 Observation 100

4.3 Contrôleur réactif référencé capteur 102

4.3.1 Tâches du contrôleur de mouvement 103

4.3.2 Modèle du véhicule 104

4.3.3 Erreurs de navigation et objectif du contrôleur 106

4.3.4 Loi de commande 107

4.4 Observateur des erreurs de navigation pour le suivi de parois 118

4.5 Guidage du véhicule dans les intersections 121

4.5.1 Guidage par suivi de chemin local dans l'intersection 122

4.5.2 Guidage par suivi de cibles locales dans l'intersection 123

4.6 Expérimentation du contrôleur des mouvements 129

4.6.1 Commande par placement de pôles 129

4.6.2 Commande optimale 131

4.6.3 Synthèse de résultats d'expérimentation 133

Chapitre 5 : Localisation par la mise en correspondance 135

5.1 Introduction..... 135

5.2 Problème et solutions alternatives 136

5.2.1 Approche iconique 138

5.2.2 Approche basée sur des primitives 139

5.3 Notre approche de localisation référencée carte 140

5.3.1 Prétraitement de la correspondance 142

5.3.2 Mise en correspondance 150

5.4 Expérimentation et synthèse de résultats 157

5.4.1 Expérimentation 157

5.4.2 Synthèse de résultats 167

Chapitre 6: Exploration et navigation globale 168

6.1 Introduction 168

6.2 Exploration initiale d'environnement 170

6.2.1 Exploration autonome (connectivité connue) 171

6.2.2 Exploration téléguidée (connectivité inconnue) 174

6.2.3 Acquisition de données sensorielles 176

6.3 Reconstruction des cartes d'environnement 178

6.3.1 Définition de la carte de l'environnement 178

6.3.2 Cartographie de l'environnement 179

6.3.3 Présentation de résultat de l'exploration et de la reconstruction de la carte de l'environnement 186

6.4 Navigation par carte de l'environnement 189

6.4.1 Interface homme-machine 189

6.4.2 Planification de missions et de chemins 193

6.4.3 Ordonnancement d'exécution de missions 195

6.5 Récapitulation et expérimentation 200

6.5.1 Récapitulation 200

6.5.2 Expériences avec le système intégré 201

Chapitre 7: Conclusion générale 217

7.1 Conclusion 217

7.2 Perspectives de recherche 219

Bibliographie 221

Liste des figures

Figure 1.1 : Scénario de fonctionnement du système navigation 9

Figure 2.1 : Architecture hiérarchique 15

Figure 2.2 : L'architecture du système MITHRA 18

Figure 2.3 : Architecture initiale de notre système 20

Figure 2.4 : Architecture réactive ou comportementale 21

Figure 2.5 : Architecture de subsomption 23

Figure 2.6 : Architecture de LAAS 26

Figure 2.7 : Architecture proposée 29

Figure 2.8 : Carte métrique 2D 31

Figure 2.9 : Carte métrique 3D 31

Figure 2.10 : Interface de spécification de missions 33

Figure 2.11 : Plan d'action de navigation : phase aller 36

Figure 2.12 : Aperçu du niveau décisionnel 39

Figure 2.13 : Aperçu du module de contrôle d'exécution ou niveau exécutif 41

Figure 2.14 : Configuration du système 45

Figure 2.15 : Notre véhicule : ***ATRV-2*** 46

Figure 2.16 : Les capteurs du système 48

Figure 3.1 : Mesures du gyroscope à l'état immobile : Biais 54

Figure 3.2 : Mesures du gyroscope à l'état immobile : Température.....55

Figure 3.3 : Estimation du Biais statique.....56

Figure 3.4 : Biais statique *vs.* Température.....57

Figure 3.5 : Biais exponentiel.....58

Figure 3.6 : Configuration de l'expérimentation clino-gyro.....61

Figure 3.7 : Manipulateur vs clino-gyro.....62

Figure 3.8 : Compensation de l'effet tangage/roulis 63

Figure 3.9 : Principe d'odométrie (déplacement élémentaire) 66

Figure 3.10 : Diagramme de blocs de la localisation référencée multi-capteurs 70

Figure 3.11 : Chemin : odométrie *vs.* clino-gyro-odométrie 71

Figure 3.12 : Carte : odométrie *vs.* clino-gyro-odométrie 72

Figure 3.13 : Configuration de la détection d'obstacles 74

Figure 3.14 : Organisation du module de détection d'obstacle 75

Figure 3.15 : Zone d'urgence 76

Figure 3.16 : LHD en C et ATRV-2 en A 77

Figure 3.17 : LHD et ATRV-2 quittent C et A respectivement 78

Figure 3.18 : *ATRV-2* détection l'obstacle (LHD) 78

Figure 3.19 : *ATRV-2* poursuit sa mission après la disparition de l'obstacle 79

Figure 3.20 : *ATRV-2* atteint sa position finale B 79

Figure 3.21 Exemple d'un réseau de galeries 83

Figure 3.22 : Forme 2D d'une galerie 84

Figure 3.23 : Forme générale d'une baie en 2D 85

Figure 3.24.a : Profil télémétrique d'une baie 85

Figure 3.24.b :Reconstruction d'une Baie 86

Figure 3.25 : Forme d'une intersection en 2D 87

Figure 3.25.a : Intersection en terme de distance (" T " degré 3) 87

Figure 3.25.b : Intersection en terme de distance (" X " degré 4) 88

Figure 3.26.a : Intersection en forme de " T " 88

Figure 3.26.b : Intersection en forme de " X " 89

Figure 3.27 : Diagramme de blocs de détection de baies 91

Figure 3.28 Détection de baie 93

Figure 3.29 : Diagramme de blocs de détection d'intersections 94

Figure 3.30 : Détection d'intersection 95

Figure 3.32 : Présence d'objets dans l'intersection 97

Figure 3.31 : La pente perçue comme une paroi 97

Figure 4.1 : Problème de contrôle d'un véhicule autonome.....101

Figure 4.2 : Commande référencée capteurs.....102

Figure 4.3 : Modèle simplifié du véhicule.....105

Figure 4.4 : Erreurs de navigation en suivi de chemin 106

Figure 4.5 : Schéma bloc du modèle dynamique des erreurs de navigation 109

Figure 4.6 : Erreurs de navigation en suivi de paroi 113

Figure 4.7 : Estimation des erreurs de navigation 119

Figure 4.8 : Problème de guidage dans une intersection 121

Figure 4.9 : Régions cibles pour le guidage à l'intersection 124

Figure 4.10 : Représentation polaire du modèle cinématique 126

Figure 4.11 : Observateur du vecteur d'état pour le guidage aux intersections 128

Figure 4.12.a : Suivi de paroi à 0.5 m/s 130

Figure 4.12.b : Erreur latérale à 0.5 m/s 130

Figure 4.13.a : Suivi de paroi à 1.0 m/s 130

Figure 4.13.b : Erreur latérale à 1.0 m/s 130

Figure 4.14.a : Suivi de paroi à 0.5 m/s 131

Figure 4.14.b : Erreur latérale à 0.5 m/s 131

Figure 4.15.a : Suivi de paroi à 1.0 m/s 132

Figure 4.15.b : Erreur latérale à 1.0 m/s 132

Figure 5.1 : Localisation par mise en correspondance 141

Figure 5.2 : Systèmes de coordonnées.....143

Figure 5.3 : Fenêtre de corrélation.....145

Figure 5.4 : Modélisation d'un ensemble des points en un segment de droite.....147

Figure 5.5 : Modélisation d'un profil en segments de droites 148

Figure 5.6.a : Image initiale avant projection.....149

Figure 5.6.b : Projection de l'image.....149

Figure 5.6.c : Résultat après la mise en correspondance.....149

Figure 5.7 : Détermination du segment cible.....150

Figure 5.8.a : Carte de référence et l'image avant la correspondance.....154

Figure 5.8.b : Résultat intermédiaire de la correspondance.....154

Figure 5.9 : Résultat final de la correspondance.....155

Figure 5.10 : Position initiale spécifiée.....157

Figure 5.11 : Correction de la position initiale.....158

Figure 5.12 : Mise en correspondance le long d'une galerie de mine souterraine 160

Figure 5.13 : Mise en correspondance près d'une baie de mine souterraine 162

Figure 5.14 : Mise en correspondance près d'une intersection de la mine souterraine..164

Figure 5.15 : Mise en correspondance près d'une intersection en " T " de la mine souterraine.....166

Figure 6.1 : Navigation globale *vs* navigation locale.....169

Figure 6.2 : Environnement initialement inconnu (reconstruit par le véhicule).....171

Figure 6.3 : Graphe de connectivité de l'environnement.....172

Figure 6.4 : Exemple de plan d'action de navigation pour l'exploration autonome.....173

Figure 6.5 : Illustration de résultat de l'exploration 173

Figure 6.6 : Illustration de l'exploration téléguidée.....175

Figure 6.7 : Plate-forme multi-capteurs embarquée au véhicule.....177

Figure 6.8 : Représentation de l'environnement par le véhicule.....180

Figure 6.9 : Carte d'arpentage manuel de la mine (construite par l'homme).....187

Figure 6.10 : Carte de l'arpentage automatisé.....187

Figure 6.11 : Reconstruction 3D à partir des données d'exploration.....188

Figure 6.12 : Menu principal d'interface homme-machine.....190

Figure 6.13 : Interface homme-machine : Phase d'exploration initiale d'environnement 191

Figure 6.14 : Interface homme-machine : Phase d'exécution autonome de missions de navigation 192

Figure 6.15 : Éditeur d'actions de navigation 194

Figure 6.16 : Éditeur des points intermédiaires : via points.....194

Figure 6.17 : Ordonnanceur : automate à états finis.....196

Figure 6.18 : Plan d'action de navigation.....198

Figure 6.19 : Exemple d'automate de coordination.....199

Figure 6.20 : Croquis du site d'expérimentation au laboratoire.....203

Figure 6.21 : Reconstruction 2D de l'environnement.....203

Figure 6.22.a : Reconstruction 3D.....204

Figure 6.22.b : Animation 3D.....204

Figure 6.23 : Exécution de missions.....205

Figure 6.24 : Carte du site des expériences 207

Figure 6.26 : La reconstruction de la carte 2D du site des expériences.....208

Figure 6.27 : La reconstruction de la carte 3D du site des expériences 209

Figure 6.28 : Carte 2D : aller-retour.....212

Figure 6.29 : Plan d'action de navigation: phase retour.....212

Figure 6.30 : Démonstration aller-retour.....214

Figure 6.31 : Trajectoires de la démonstration : aller-retour.....215

Figure 6.32 : Démonstration: phase aller.....215

Figure 6.33 : Démonstration: phase retour.....216

Figure 6.33 : Carte globale d'un réseau de galeries 219

Figure 6.33 : Les cartes relatives de différentes sections d'un réseau de galeries 220

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre les trois familles d'architecture 27

Tableau 2 : Terminaison du plan d'action de navigation 35

Tableau 5.1 : Résultats de la mise en correspondance le long de galerie de la mine souterraine 159

Tableau 5.2 : Résultats de la mise en correspondance près de baie 161

Tableau 5.3 : Les résultats de la mise en correspondance près d'intersection en forme de " X " 163

Tableau 5.4 : Les résultats de la mise en correspondance près d'intersection en forme de " T " 165

Chapitre 1 : Introduction

La conception de véhicules autonomes capables d'exécuter des tâches avec un minimum d'interventions humaines a fait l'objet de nombreux travaux de recherche en robotique mobile depuis le début des années 80. Les travaux réalisés ont permis de développer des systèmes basés sur l'utilisation de guides artificiels pour la locomotion et la localisation des robots mobiles. Cependant, les coûts élevés reliés à l'installation et la maintenance de ces guides artificiels restreignent les applications de tels systèmes à des environnements dans lesquels ces coûts demeurent limités. L'utilisation de guides artificiels est peu envisageable dans des contextes hostiles, car ils nécessitent une maintenance fréquente. Ils ne peuvent non plus être utilisés dans des environnements variables dans lesquels la configuration de l'espace navigable est susceptible de changer ou dans des lieux non préalablement explorés. L'applicabilité de la navigation autonome à des opérations dans de tels milieux nécessite donc de concevoir des systèmes nouveaux pouvant évoluer dans des environnements imparfaitement connus ou inexplorés, de configuration variable et non structurée. Les travaux de cette thèse portent sur la conception et la réalisation d'un tel système.

L'objectif de ce projet est de développer *un système intégré de navigation autonome pour des environnements de type réseaux de galeries*. Plus précisément, il s'agit de

réseaux dont, au départ, seule la *connectivité est connue* mais dont la *géométrie est inconnue* et est *susceptible de changer localement* (en raison de modification de la géométrie locale des galeries ou de la présence d'obstacles dynamiques). Les mines souterraines, les grottes, les réseaux de distribution d'eau et l'intérieur de bâtiment sont des environnements typiques visés par notre étude. Dans de tels environnements, un système de navigation autonome doit être capable d'accomplir les fonctions suivantes :

- ***Exploration initiale d'un environnement préalablement inconnu***

  Il s'agit d'un environnement dont la connectivité du réseau de galeries est connue au départ. Le véhicule doit être capable d'explorer ce réseau, de récolter et de traiter les informations sensorielles recueillies afin d'en extraire une carte métrique des galeries, des baies et des intersections de galeries rencontrées. À l'issue de l'exploration, le véhicule doit posséder une description géométrique de l'environnement sous forme de cartes métriques bidimensionnelle (2D) et tridimensionnelle (3D). Cette description sera appelée "*carte de référence*" dans la suite de cette thèse.

- ***Exécution autonome de missions globales de navigation***

  En se servant de la carte de référence obtenue lors de l'étape précédente, le véhicule doit pouvoir exécuter sans intervention humaine les missions suivantes :

  - Planification de chemin : à partir d'une position initiale et d'une position finale, spécifiées par un superviseur sur la carte de référence, le véhicule doit être capable de générer un chemin reliant les deux points, satisfaisant à certains critères d'efficacité.

- Localisation : au cours de l'exécution de sa mission de navigation, le véhicule doit pouvoir déduire des observations sensorielles courantes sa position et orientation par rapport à la carte de référence.
- Contrôle : le véhicule doit être capable de se déplacer de façon autonome et efficace dans le réseau de galeries, conformément au chemin planifié, de détecter des événements imprévus tels que l'apparition éventuelle d'obstacles et d'y réagir adéquatement.

Pour faire la preuve de concept du système que nous proposons dans cette thèse, nous avons à notre disposition un véhicule tout terrain à quatre roues motrices non directionnelles. De par sa cinématique, ce type de véhicule glisse pour tourner. Cette contrainte détériore la précision de l'estimation de la position et de l'orientation du véhicule par le système odométrique. Ce véhicule est également soumis à des contraintes cinématiques non-holonômes, c'est à dire que lorsque les roues du véhicule roulent sans glisser sur le sol, l'orientation du véhicule reste tangente au chemin. On suppose que, pour exécuter ses missions, le véhicule dispose des capteurs embarqués ci-dessous, ainsi que de la puissance de calcul nécessaire à la collecte et au traitement des données correspondantes :

- un senseur capable de collecter des données télémétriques dans le plan osculateur de la trajectoire locale, immédiatement en avant du véhicule;
- un senseur capable de collecter des données télémétriques dans un plan normal à la trajectoire locale;

- un système odométrique et des capteurs inertiels permettant de mesurer les déplacements du véhicule (translation et rotation).

Enfin, le véhicule considéré possède un système de communication permettant une interaction entre le véhicule et un superviseur humain.

Les principales difficultés liées à la conception d'un tel système de navigation autonome peuvent se résumer de la façon suivante :

- ***Complexité de l'environnement.***

  Un réseau de galeries (par exemple une mine souterraine) est constitué d'un ensemble d'interconnexion de sections tubulaires de géométrie, largeur et longueur variables. Cet environnement est décomposable en *éléments topologiques* tels que galeries, baies et intersections, différentiables par leur géométrie et leurs fonctions dans le réseau. Explorer un réseau de galeries dont la connectivité est connue, mais non pas la géométrie, exige que le véhicule soit capable :

  - de reconnaître sans erreur les éléments topologiques déjà explorés,
  - d'associer l'élément topologique en cours d'exploration à son homologue dans le graphe de connectivité,
  - de reconnaître qu'il s'engage dans une nouvelle galerie,
  - de reconnaître qu'il débouche dans une intersection,
  - de choisir, à partir d'un graphe de connectivité, la galerie suivante à explorer quand il débouche dans une intersection. Ce choix doit répondre à certains

critères d'efficacité et d'optimisation afin que le véhicule atteigne son but final avec un minimum d'énergie.

C'est par l'analyse des données sensorielles recueillies que le véhicule pourra répondre aux exigences énumérées ci-dessus. Ainsi, le succès du véhicule dépend directement de la qualité des capteurs.

- ***Imperfection des capteurs.***

L'autonomie d'un véhicule dépend de la connaissance à tout instant de son *état* et de son environnement. Un état du véhicule est représenté par la position, l'orientation et la vitesse du véhicule. Les limitations en précision, en sûreté et en applicabilité des capteurs individuels exigent l'utilisation et l'intégration de plusieurs capteurs (télémétrique, odométrique, inertiel etc.). En effet, un système odométrique, lorsqu'utilisé seul, peut être induit en erreur par le glissement des roues et les erreurs systématiques alors qu'un gyroscope est affecté du biais et des perturbations dues au tangage et au roulis et un inclinomètre quant à lui peut être affecté par l'accélération du véhicule. En outre, les caractéristiques de fonctionnement, la fréquence d'échantillonnage (des données), et l'incertitude de chaque capteur sont différentes d'un capteur à l'autre. Ces problèmes exigent de développer des techniques de fusion multi-capteurs pour pouvoir tirer profit de la redondance et de la complémentarité de données sensorielles.

- ***Problème de contrôle et de gestion du trafic de véhicules.***

Les galeries de circulation dans un réseau sont, pour des raisons économiques, généralement très étroites (à peine supérieure à la largeur du véhicule). Ceci soulève deux

problèmes majeurs : le contrôle des véhicules et la gestion de trafic des véhicules. Les galeries étant étroites, elles imposent une grande précision au contrôleur du véhicule dont le rôle est de faire suivre au véhicule un chemin désiré sans collision avec l'environnement. Les événements non contrôlables tels que la largeur variable de galeries, la présence d'obstacles fixes ou mobiles et l'existence des différents éléments topologiques (galeries, baies, intersections) exigent un contrôleur robuste et réactif. En plus, le véhicule doit pouvoir traverser les intersections de façon efficace et sécuritaire. Alors que dans des galeries ou dans des baies, un véhicule autonome peut utiliser les parois latérales comme guides naturels pour se déplacer, il n'en est pas de même dans le cas d'une intersection où aucune structure naturelle n'est disponible pour le guidage. De surcroît, les parois sont généralement non structurées, et le sol est en général irrégulier ce qui impose un niveau de robustesse accru au système de navigation.

Outre le problème de contrôle de véhicules, l'étroitesse de galeries nécessite une gestion efficace de trafic des véhicules. L'impossibilité de croisement de véhicules impose une connaissance continue de la position de tous les véhicules dans le réseau ainsi qu'une estimation fiable des temps de transit dans les galeries.

- ***Problème de communication (due à l'espace non libre)***

  Un système de communication par radio est nécessaire pour permettre au superviseur de communiquer avec le véhicule via une interface homme-machine. Dans un réseau de galeries, les parois constituent des obstacles à la libre propagation des signaux radio. De plus, la nature *intermittente* de ce type de communication impose une

autonomie accrue au véhicule. En cas d'interruption éventuelle de la communication, le véhicule doit pouvoir continuer à exécuter ses tâches de façon sécuritaire et reprendre le contact avec le superviseur dès que possible.

Dans ce travail, nous proposons une *solution intégrée* aux problèmes identifiés ci-dessus. Cette solution, que nous nommons ***système intégré de navigation autonome dans un réseau de galeries***, fonctionne en deux modes: un mode d'*exploration de l'environnement* et un mode d'*exécution autonome de missions globales de navigation.* Ce système répond aux critères ci-dessous:

- *Représentation* : le système est capable de modéliser son environnement de façon suffisamment précise pour la localisation, la planification de chemin et la locomotion en s'appuyant sur les primitives géométriques.
- *Indépendance de l'environnement* : le système est capable d'accomplir ses tâches en dépit d'éventuels changements locaux dans l'environnement. Aucun aménagement de l'environnement ne doit être envisagé pour aider ou assister le système à l'accomplissement de ses tâches.
- *Réactivité* : pour tenir compte de la nature localement dynamique de l'environnement, le système est capable de réagir aux changements et événements imprévus de l'environnement.
- *Robustesse* : le système a la capacité de traiter des entrées imparfaites. Les limitations en précision, en sûreté et en applicabilité des capteurs individuels sont compensées

par l'intégration de plusieurs capteurs complémentaires, en tirant profit des redondances des données sensorielles.

- *Évolution* : le système est ouvert à des ajouts ou modifications d'un module (fonctionnalité, traitement et représentation) sans que son fonctionnement global et ses performances ne soient remis en cause.

Le scénario du fonctionnement de notre système est schématisé par la figure 1.1. Soient un environnement ***W*** et un graphe de connectivité ***g*** de ***W***, connue *a priori*. Le graphe ***g*** ne fournit aucune information métrique sur les dimensions et la forme des galeries de ***W***.

Dans le premier mode de fonctionnement, le système dispose en entrée du graphe de connectivité ***g*** de l'environnement ***W*** et procède à l'**exploration** de l'environnement afin d'aboutir à la construction de deux cartes métriques, en deux dimensions (2D) et en trois dimensions (3D) tel qu'illustré dans la figure 1.1. Si aucune information sur l'environnement ***W*** n'est disponible, alors le véhicule explore ***W*** en suivant les parois des galeries et en affichant à l'interface homme-machine du système sa position/orientation et la carte locale de son environnement, permettant ainsi au superviseur de coordonner les mouvements du véhicule. Dans cette situation, le superviseur pourra à l'aide de l'interface, envoyer au véhicule les commandes du genre : "Suit la paroi droite", "Va tout droit", "Tourne à droite d'un angle quelconque" etc. Nous parlerons alors d'**exploration téléguidée**.

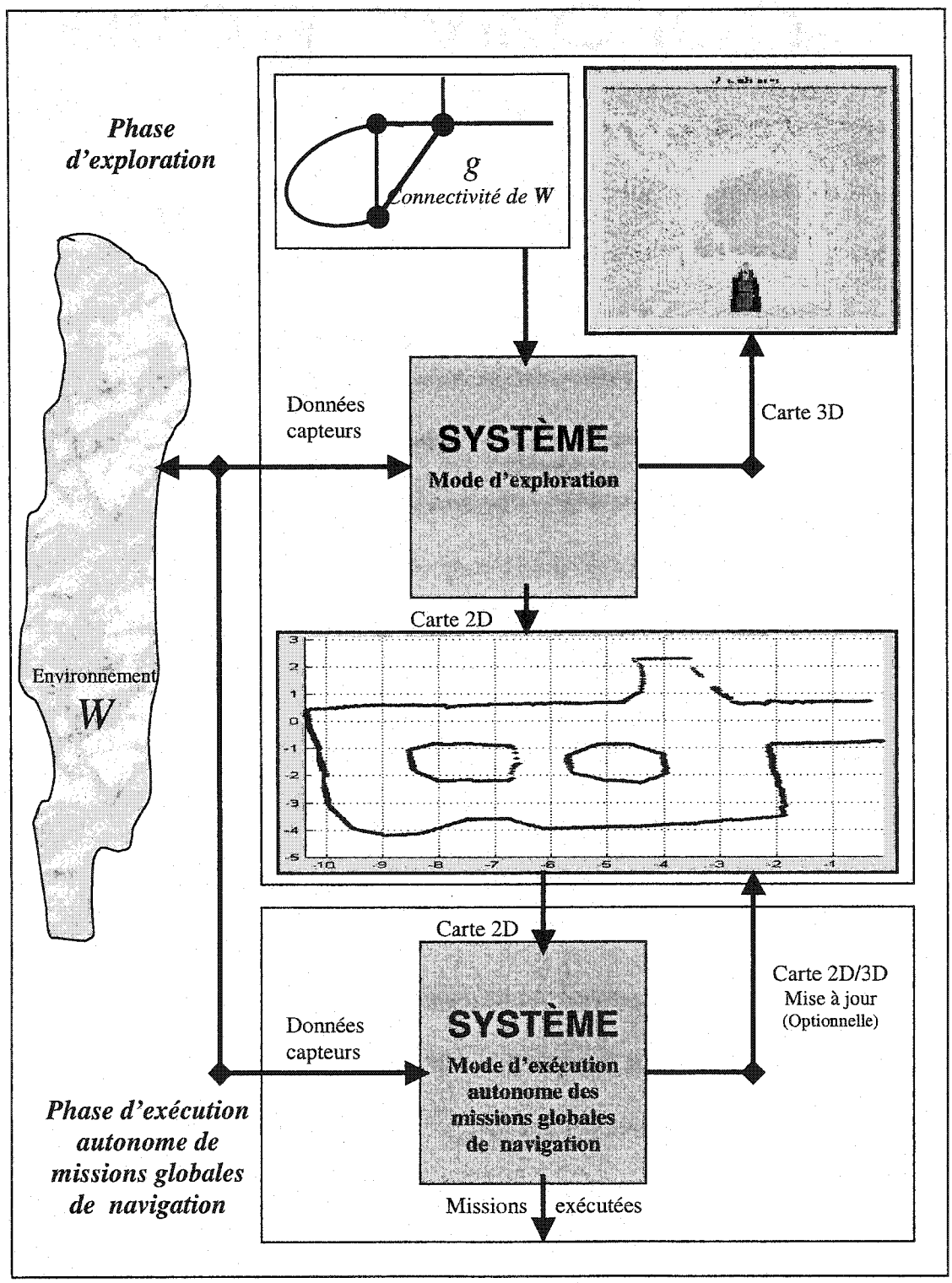


Figure 1.1 Scénario de fonctionnement du système navigation

Dans la seconde phase de fonctionnement, celle d'**exécution autonome de missions globales de navigation**, la carte métrique 2D construite à l'issue de la phase précédente ou une carte *a priori* constitue l'entrée de référence du système. Il s'agit alors pour le véhicule d'exécuter des tâches de navigation en se basant sur cette référence. A l'aide de l'interface humain-machine, le superviseur définit sur la carte les missions globales de navigation qui seront exécutées de façon autonome par le véhicule puis supervise leur exécution.

Les domaines d'application du système proposé sont nombreux : l'exploration, l'arpentage et navigation en milieu souterrain (les mines par exemple), la surveillance intérieure de bâtiments, l'intervention en milieu dangereux ou sinistré, l'inspection de réseaux de distribution d'eaux, d'égouts, de pipelines etc..

Les contributions innovatrices de ce travail portent sur les éléments suivants:

- Mise en évidence d'un *contrôleur de navigation référencée carte*, celle-ci étant acquise préalablement par le véhicule. Ce contrôleur intègre dans sa boucle de contrôle les informations topologiques de l'environnement, les informations télémétriques, les informations odométriques et inertielles. Il permet d'apporter une solution au problème de guidage d'un véhicule autonome à la fois dans des galeries et dans des intersections.
- Développement de *stratégies d'intégration multi-capteurs*, en occurrence le gyroscope, l'inclinomètre et l'odométrie.

- Développement d'une méthode d'auto localisation basée sur l'identification de *repères naturels* (baies et intersections).
- Réalisation d'un *système d'arpentage autonome 2D et 3D en milieu non structuré.*

Cette thèse est organisée comme suit. Le chapitre 2 débute par une revue bibliographique de principales architectures de système de navigation autonome : l'architecture hiérarchique ou délibérative, l'architecture réactive et l'architecture hybride. Dans ce même chapitre, nous décrivons l'architecture et la configuration du système de navigation proposé. Au chapitre 3, nous présentons les algorithmes et les résultats de validation de modules relatifs à la navigation locale. Ces modules sont : *l'intégration multi-capteurs* pour tirer profit de la redondance et la complémentarité des capteurs, *la localisation référencée multi-capteurs* pour l'estimation en temps réel de l'état du véhicule, *la détection d'obstacles* pour l'exécution de missions en toute sécurité et *la détection de repères naturels* pour la localisation et le guidage du véhicule. Le chapitre 4 est consacré au *contrôleur de mouvements du véhicule*. Nous y développons la *commande référencée capteur* pour le suivi de murs, le suivi de chemin et le guidage dans des intersections. Au chapitre 5, nous utilisons les repères naturels (introduits au chapitre 3) pour la localisation du véhicule par la mise en correspondance des cartes locales des repères naturels détectés en ligne avec la carte de référence. La *navigation globale du véhicule* est discutée au chapitre 6. Dans ce chapitre, nous décrivons les deux modes de fonctionnement du système : *exploration de l'environnement* et *exécution autonome de missions globales de navigation*. La carte géométrique 2D construite par le véhicule est ensuite utilisée pour la

planification de missions et la localisation du véhicule dans la phase d'exécution autonome de missions globales de navigation. Nous terminons le chapitre 6 par la présentation des expériences menées au laboratoire et dans une mine souterraine (Noranda au Nouveau Brunswick) pour valider le système intégré proposé. Nous concluons cette thèse et discutons les perspectives de la recherche au chapitre 7.

Chapitre 2: Architecture et configuration du système

2.1 Introduction

L'architecture de contrôle d'un système détermine les capacités de celui-ci à exécuter des tâches et surtout à réagir aux événements imprévus. Selon ALAMI (1998) et LAUGIER (1998), l'architecture de contrôle d'un véhicule autonome évoluant dans un environnement dynamique et imparfaitement connu doit assurer trois fonctions principales : *la perception, la décision* et *l'action.* A l'issu d'une revue de la littérature sur les systèmes existants, nous avons distingué trois familles d'architectures de contrôle : les architectures délibératives ou hiérarchiques, les architectures réactives et les architectures hybrides. Les deux premières familles suivent des approches opposées, alors que la dernière famille tente de combiner les avantages des deux premières familles.

Avant de poursuivre cette revue de la littérature, il est nécessaire de fournir quelques définitions utiles. Nous appellerons ***module*** une entité logicielle capable de réaliser un ensemble de services spécifiques, appelés *fonctionnalités,* au moyen d'actions sur les effecteurs, sur les capteurs et/ou sur les autres entités logicielles. Un module est conçu

pour être appelé par n'importe quel autre module du système. Un module est classé ***serveur*** si l'activité qu'il exécute est créée par un autre module. Et il est classé ***client*** si ses activités créent des activités sur les autres modules. Ainsi la communication entre modules se fait selon le protocole client/serveur.

2.2 Les Architectures des systèmes existant

2.2.1 Les architectures délibératives ou hiérarchiques

2.2.1.1 Description générale

Ces architectures utilisent un modèle de l'environnement, connu *a priori* ou obtenu à partir des données provenant de capteurs, pour planifier à l'avance les missions que le système doit exécuter. Cette vision de l'autonomie vise à reproduire le mode de raisonnement humain; elle conduit à une décomposition du traitement en une série d'opérations successives décrites par la figure 2.1.

La première opération, dans cette architecture, consiste à traiter les données capteurs sur l'état et sur l'environnement du véhicule. La deuxième opération (la plus importante mais aussi la plus gourmande en ressources de calcul) consiste à construire ou à mettre à jour, à partir de données des capteurs, le modèle de l'environnement dans lequel évolue le véhicule. Ce modèle est ensuite utilisé pour planifier les actions (plan d'action) que le véhicule doit réaliser pour atteindre le but qui lui est assigné. La dernière opération

consiste à générer et à exécuter les commandes permettant au véhicule de suivre son plan d'action.

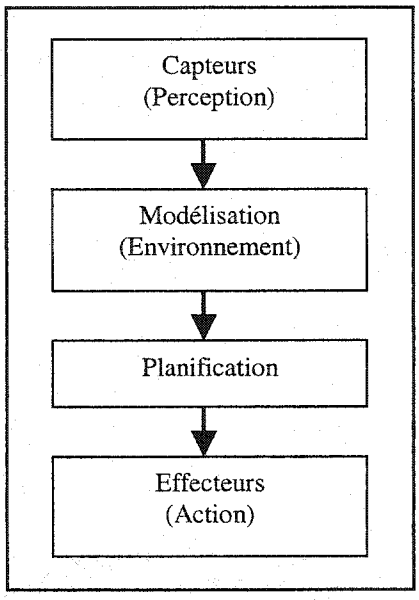


Figure 2.1 Architecture hiérarchique

Les premières architectures de système utilisées en robotique autonome sont de cette famille (GAUTHIER 1999). GAUTHIER (1999) cite le robot *Shakey*, conçu au début des années 70 au Stanford Research Institut. Le robot Shakey utilisait une caméra comme capteur et était capable d'évoluer dans un environnement très fortement contraint. La mission du robot Shakey était de trouver dans une pièce un objet de forme et couleur fixées à l'avance et de pousser cet objet jusqu'à un endroit spécifié. Chaque mouvement simple demandait plus d'une heure de calcul sur un ordinateur extérieur et présentait une forte probabilité d'échec.

2.2.1.2 Avantages et désavantages

Les systèmes hiérarchiques ou délibératifs possèdent un avantage important qui est la capacité de prendre en compte des raisonnements de haut niveau lors de la phase de planification. Il leur est possible en effet de gérer des missions complexes enchaînant plusieurs buts successifs (évitant ainsi les minimums locaux). Ceci n'est pas le cas pour les architectures réactives (cf. §2.2.2). Cependant, ce type d'architecture présente généralement les inconvénients suivants :

- *La lenteur de réaction* : les architectures purement hiérarchiques sont incapables de prendre en compte des obstacles dynamiques non détectés lors de la modélisation. Elles demandent une re-planification. Ceci ne peut généralement pas être effectuée en temps réel à cause de la lenteur des opérations de modélisation et de planification.
- *La complexité de la construction d'un modèle* : la modélisation d'un environnement naturel est une tâche très difficile. Ceci est dû en grande partie à l'imprécision des capteurs utilisés en robotique (BROOKS 1986).
- *Les erreurs du modèle* : les différences possibles entre l'environnement réel et son modèle introduisent des incertitudes sur l'état du véhicule et la position des obstacles. La prise en compte de ces incertitudes est indispensable pour réaliser d'un système robuste mais rend la tâche de planification beaucoup plus complexe.

2.2.1.3 Exemples d'architecture hiérarchique ou délibérative

Plusieurs systèmes autonomes ont été réalisés à base de cette famille d'architecture (GAUTHIER, 1999; HASSOUN, 1998; REIGNIER, 1998). Nous ne présentons que deux

architectures parmi d'autres : l'architecture du système MITHRA (REIGNIER, 1998) développée dans le cadre d'un projet de recherche européen (qui regroupe des partenaires de la région alpine Française, Italienne et Suisse) et l'architecture initiale de notre système de navigation autonome (NSASI et al., 1999; POLOTSKI et al., 2000).

- ***L'architecture du système MITHRA***

  Cette architecture est basée sur une coopération entre perception et action. Elle est constituée de cinq niveaux hiérarchiques (cf. figure 2.2):

  - *Le niveau 1 : sensori-moteur*

    C'est le plus bas niveau de la hiérarchie. On y trouve les contrôleurs des moteurs ainsi que le module d'acquisition et de gestion des données brutes des capteurs

  - *Le niveau 2 : contrôle du robot et modélisation*

    Ce niveau est responsable du contrôle du robot et de la modélisation locale de l'environnement. Le contrôleur assure l'exécution des trajectoires à suivre. Les informations des capteurs ultrasons sont intégrées dans un modèle géométrique local. Ce modèle est dit local car il n'intègre que les données situées dans l'environnement proche du robot mobile.

  - *Le niveau 3 : action de perception et de navigation*

    Ce niveau comprend les actions de perception tel que "trouver un objet", "trouver un chemin" etc. et les actions de navigation comme par exemple "suivre le chemin", "suivre le mur" etc.

  - *Le niveau 4 : superviseur*

Le superviseur est la partie symbolique centrale de système. Il a pour rôle de dialoguer avec l'opérateur afin de définir la mission du robot, de planifier et de contrôler l'exécution de cette mission.

- *Le niveau 5 : interface homme-machine*

  L'interface permet au superviseur de définir les missions du robot et de visualiser l'exécution de ces missions.

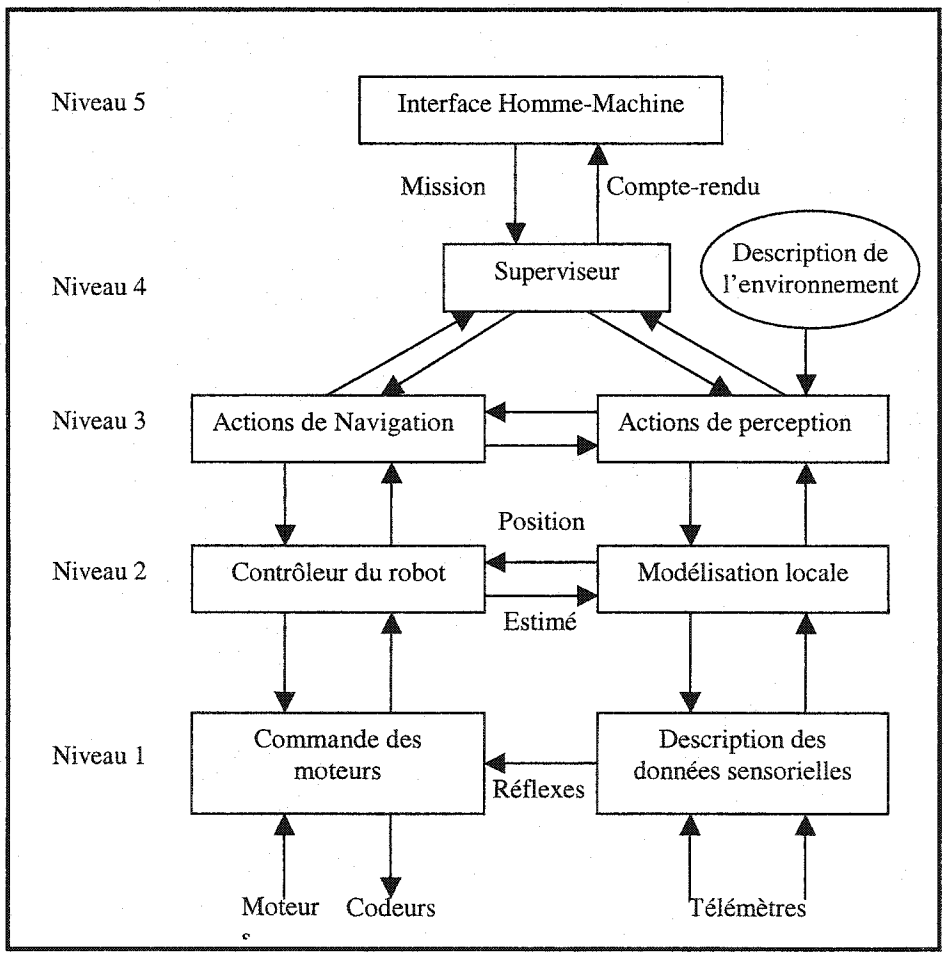


Figure 2.2 L'architecture du système MITHRA

- ***L'architecture initiale de notre système***

Nous présentons dans cette section, à titre d'exemple, l'architecture hiérarchique à trois niveaux (sans compter l'interface homme-machine) que nous avions initialement développée pour notre système. Comme illustré dans la figure 2.3, les trois niveaux du haut en bas sont :

- *Traitement et planification (hors ligne)*

  Les opérations de ce niveau sont effectuées hors ligne. Une carte de référence, disponible *a priori*, est traitée (numérisation et filtrage des bruits) pour la planification de mission et de chemin. Ces opérations consistent à l'extraction du graphe et des caractéristiques géométriques (droites, arcs) de la carte de référence et à la génération de chemin. Les caractéristiques géométriques obtenues sont par la suite utilisées pour la localisation du véhicule par la mise en correspondance avec des données capteurs perçues en ligne.

- *Perception et intégration de données*

  Ce niveau est responsable de fournir continuellement au véhicule les informations sur son état et sur son environnement.

- *Contrôle d'exécution*

  Dans ce niveau, on trouve les modules de localisation, de détection d'obstacles, de construction des cartes 2D et 3D de l'environnement, du contrôleur pour le suivi des murs et de chemin. Ce niveau assure la navigation autonome du véhicule jusqu'à son but prédéfini (au niveau 1).

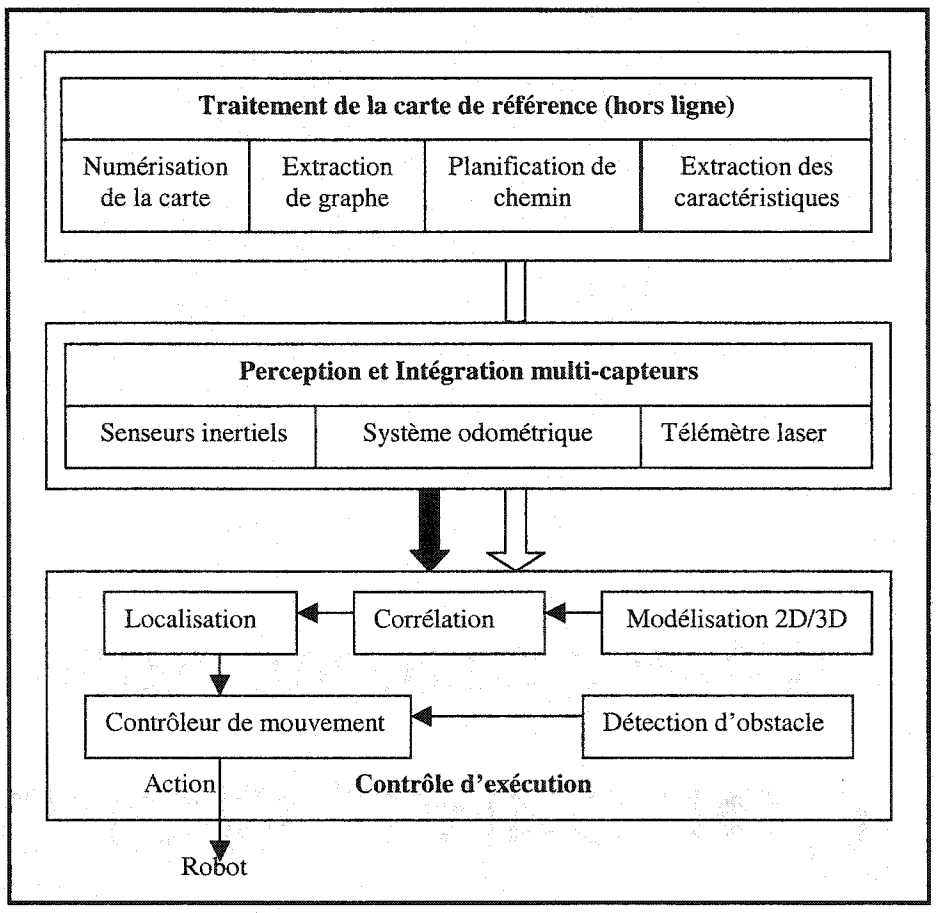


Figure 2.3 Architecture initiale de notre système

L'interface homme-machine sert à superviser l'exécution autonome des missions, à visualiser la carte 2D (en ligne et hors ligne) et la carte 3D hors ligne. Cette architecture a été implantée et testée avec succès au laboratoire (NSASI et al., 1999; COHEN et al., 2000; POLOTSKI et al., 2001) et dans une mine souterraine. Cependant, l'exigence d'avoir a priori une carte de référence précise d'une part, et l'absence des capacités réactives d'autre part, rendent cette architecture (comme toute autre architecture hiérarchique) moins efficace face à un environnement dynamique et imparfaitement connu. Afin de pouvoir augmenter l'autonomie de notre système,

nous avons reconsidéré les problèmes de l'architecture de notre système. Nous y reviendrons à la section 2.3, qui est consacrée à l'architecture proposée dans cette thèse.

2.2.2 Les architectures réactives ou comportementales

2.2.2.1 Description générale

Cette famille d'architecture ne nécessite pas une planification des missions. Elle s'appuie sur un couplage étroit entre les capteurs et les effecteurs du véhicule pour générer en continu les commandes à exécuter. Le système réagit uniquement aux stimuli externes de l'environnement. Le comportement global du véhicule est le résultat de l'interaction des divers comportements élémentaires, entre eux et avec l'environnement. Les comportements élémentaires peuvent être, par exemple, la détection d'obstacle, l'évitement d'obstacle, l'attirance vers un but, etc. tels que décrits dans la figure 2.4.

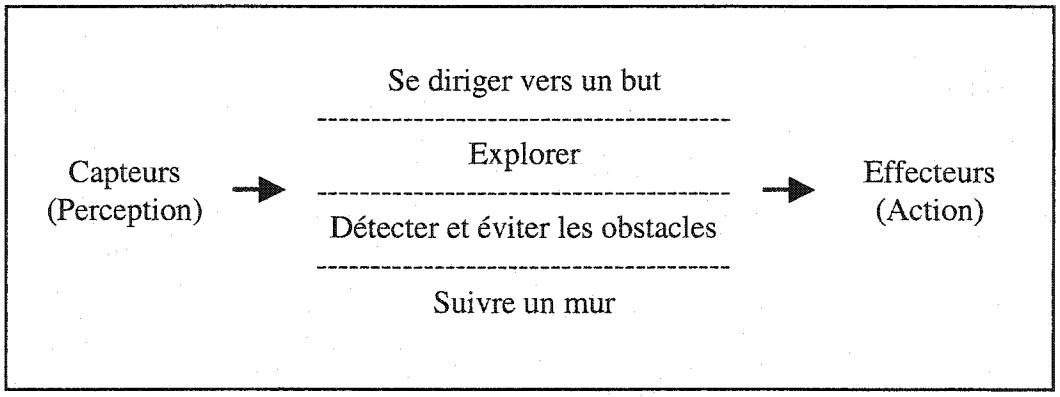


Figure 2.4 Architecture réactive ou comportementale

2.2.2.2 Avantages et désavantages

La simplicité du traitement réalisé, ainsi que le parallélisme des comportements permettent une *grande rapidité*. *La robustesse* découlant du parallélisme et *l'indépendance (modularité)* relative des comportements permettent au véhicule de continuer à fonctionner en cas de panne de l'un d'entre eux. Cependant, ces architectures sont critiquées à cause de leur manque de capacités de raisonnement haut niveau.

2.2.2.3 Exemples d'architecture réactive ou comportementale

L'une des premières, mais surtout la plus célèbre, des architectures réactives est *l'architecture subsomption* proposée par BROOKS (1986). Cette architecture utilise une hiérarchie de comportements, dans laquelle à un moment donné un seul module dirige le véhicule en utilisant éventuellement le résultat des autres comportements. Chaque comportement constitue un niveau de compétences recevant des données de capteurs et agissant sur les effecteurs. Tout comportement peut inhiber ceux de niveaux inférieurs au sien ou les utiliser pour son propre traitement.

BROOKS (1986) définit, dans le cas d'un robot d'exploration, 8 niveaux de compétences comme décrits dans la figure 2.5, à savoir :

- Éviter les obstacles fixes ou mobiles;
- Naviguer au hasard et sans but précis;
- Explorer le monde en cherchant les zones libres;

- Construire une carte de l'environnement et planifier les chemins menant d'un endroit à l'autre;
- Noter les changements dans l'environnement statique;
- Raisonner sur le monde en terme d'objets identifiables et réaliser des tâches relatives à certains objets;
- Formuler des plans pour modifier l'état du monde (environnement);
- Raisonner sur le comportement des objets dans le monde et modifier ces plans en conséquence.

Cette architecture (figure 2.5) a été implantée sur plusieurs robots du M.I.T (Massachusetts Institute of Technology). Cependant, seuls les trois premiers niveaux de compétences ont étés réalisés sur ces robots (BROOKS, 1986). D'autres exemples sont cités dans BROOKS, (1991), GAUTHIER (1999) et LAUGIER (1998).

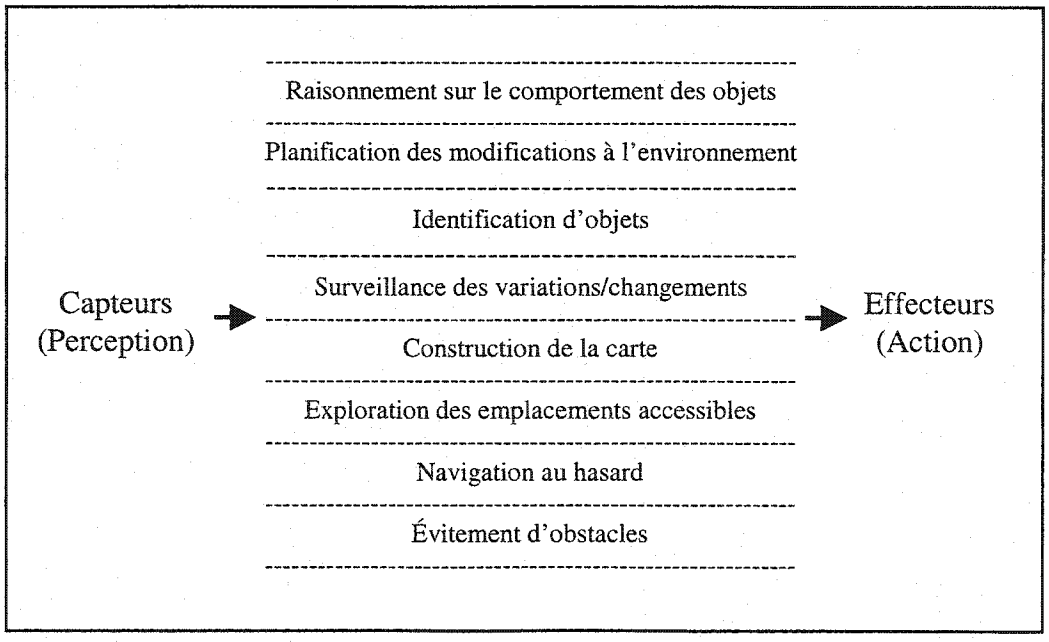


Figure 2.5 Architecture de subsomption.

2.2.3 Les architectures hybrides

2.2.3.1 Description générale

Les architectures hybrides tentent de combiner les deux familles précédentes afin de tirer parti de leurs avantages respectifs. Le but est de conserver les capacités de raisonnement de haut niveau des architectures hiérarchiques, tout en utilisant la robustesse, la modularité et la rapidité des architectures réactives. Cette famille d'architecture représente aujourd'hui la grande majorité des systèmes étudiés.

2.2.3.2 Avantages et désavantages

Comme nous l'avions déjà mentionné, une architecture hybride possède des capacités de raisonnement de haut niveau dérivant de sa partie délibérative, et les capacités de réaction rapide, de robustesse et de modularité dérivant de sa partie réactive.

2.2.3.3 Exemple d'architecture hybrides

A l'issu d'un examen des plus récentes architectures hybrides en robotique (GAUTHIER, 1999; HASSOUN, 1994; ALAMI et al., 1998; LACROIX et al., 1998 et 2002), nous avons choisi de présenter comme exemple celle proposée par ALAMI (1998) pour sa représentativité et son caractère généraliste. Il s'agit de *l'architecture du LAAS* (Laboratoire d'analyse et d'architecture de système, Toulouse/France). Cette architecture

(cf. figure2.6) est composée de trois niveaux hiérarchiques : le niveau fonctionnel, niveau exécutif et le niveau décisionnel. Voici la description de ces trois niveaux :

- *Le niveau fonctionnel.*

  Ce niveau inclut toutes les fonctionnalités de base nécessaires à la perception et l'action. Les éléments constitutifs de ce niveau peuvent être des fonctions de traitement des données, des boucles de commande ou des observateurs chargés de réagir à un événement précis. Ces éléments sont encapsulés dans des modules pouvant recevoir des commandes. La communication entre deux modules différents ou entre un module et le niveau exécutif s'effectue selon un protocole client/serveur. Lorsqu'une requête (qui peut inclure les paramètres d'initialisation) est envoyée, le module concerné est activé jusqu'à l'achèvement de la tâche demandée ou jusqu'à son blocage dans un état d'échec. Un module activé peut à son tour envoyer des requêtes aux autres modules dont les services lui sont nécessaires. Après l'achèvement de sa tâche, le module ayant reçu la requête émet un rapport d'exécution pouvant contenir des données résultats. L'organisation de ce niveau fait donc apparaître un véritable réseau de modules interagissant les uns avec les autres.

- *Le niveau exécutif ou de contrôle d'exécution*

  Ce niveau est purement réactif, sans capacité de planification. Il reçoit du niveau décisionnel des *séquences d'actions* à exécuter. Il contrôle et coordonne (sélectionne et transmet les paramètres) dynamiquement les modules du niveau fonctionnel.

- *Le niveau décisionnel*

Ce niveau prend en charge tous les traitements qui demandent une planification en avance, une connaissance globale de la tâche et une connaissance du contexte d'exécution. Il réalise les traitements délibératifs tels que la planification de séquences d'actions et la prise de décisions.

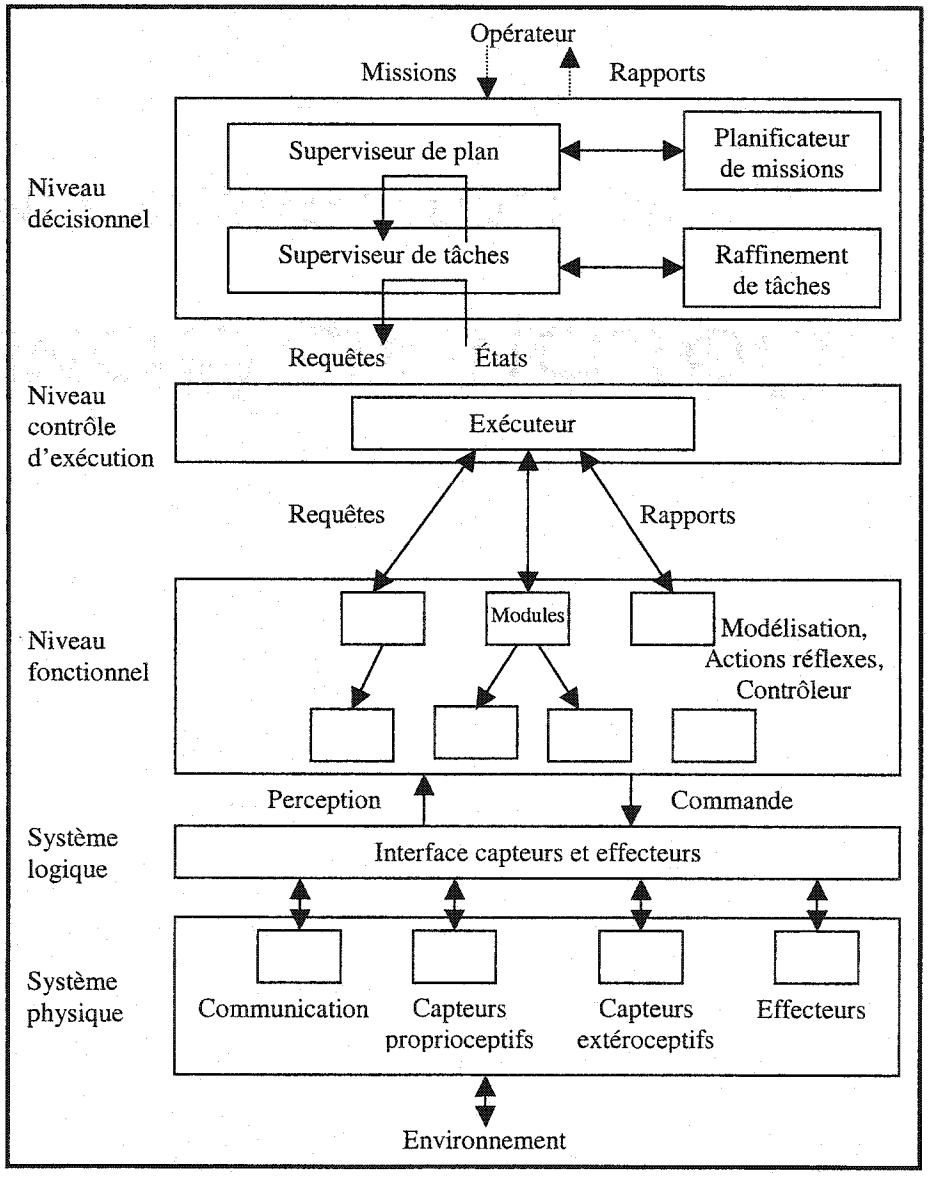


Figure 2.6 Architecture de LAAS

2.2.4 Comparaison de famille d'architecture

Cette revue bibliographique sur les architectures de systèmes proposés dans la littérature nous a conduit à faire la comparaison ci-dessus (Tableau 1) et à affirmer que l'avenir des systèmes autonomes repose sur l'utilisation des architectures hybrides.

Tableau 1. Comparaison entre les trois familles d'architecture.

Critères d'autonomie d'un système	**Architectures hiérarchiques**	**Architectures réactives**	**Architectures hybrides**
Programmabilité	Moyenne	Haute	Haute
Autonomie de mouvements	Oui	Oui	Oui
Adaptabilité	Non	Oui	Oui
Robustesse	Basse	Haute	Haute
Réactivité	Basse	Haute	Haute
Cohérence du comportement	Haute	Basse	Haute
Flexibilité	Non	Oui	Oui
Évolutivité	Oui	Oui	Oui

La section suivante, architecture du système proposé, décrit l'organisation informatique du système autonome développé dans cette thèse. Dans la section 2.4 intitulée configuration du système, nous décrivons les éléments matériels et logiciels de notre système.

2.3 Architecture du système proposé

2.3.1 Description générale de l'architecture du système

Rappelons que le but recherché est de doter le véhicule autonome d'un système décisionnel embarqué qui lui permette de percevoir et de modéliser son environnement (*perception*), de générer un plan d'action nécessaire à la réalisation de sa mission (*décision*), et finalement d'exécuter ce plan de manière réactive (*action*). Cette architecture doit aussi être *flexible* et *réutilisable* pour pouvoir s'adapter à diverses missions (exploration, navigation autonome, surveillance, etc.).

Tenant compte des objectifs (*cf.* Chap. 1) de cette thèse et de la revue de la littérature (cf. §2.2), nous avons opté pour une ***architecture hybride*** (cf. §2.2.3) afin d'intégrer à notre système des capacités de modéliser son environnement, de planifier ses actions et de réagir aux stimuli externes de l'environnement. Elle est illustrée à la figure 2.7.

Afin de faciliter le développement, l'intégration et la validation, nous avons décomposé notre système en modules pouvant être testés indépendamment. Les principaux modules que nous avons développés et implantés sont :

- *le module d'intégration multi-capteurs,*
- *le module de localisation,*
- *le module de détection d'obstacle,*
- *le module de détection de repère naturel,*

- *le module de contrôle de l'exécution,*
- *le module d'arpentage et de reconstruction de l'environnement,*
- *le module de planification de mission et de chemin,*
- *l'interface homme-machine.*

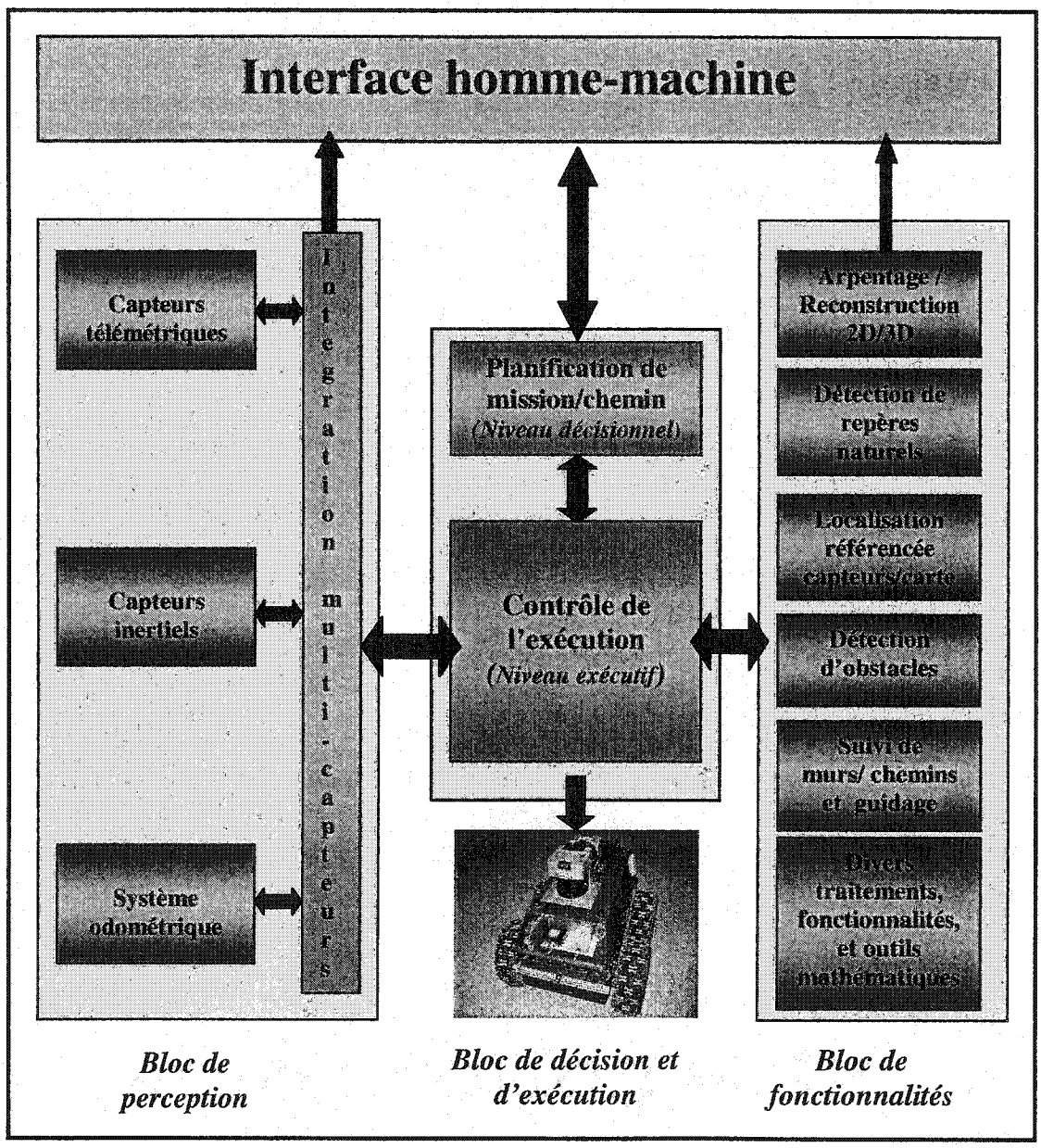


Figure 2.7 Architecture proposée

Remarque : à ce stade, cette architecture du système ne dépend ni du type de véhicule que nous allons utiliser, ni des capteurs de navigation utilisés, ni de l'environnement où va évoluer le véhicule (réseau de galeries dans notre cas). Ceci veut dire qu'une telle architecture pourrait servir pour un autre système autonome.

2.3.2 Spécification des missions du système

La navigation autonome d'un véhicule dans un environnement *de type réseau de galeries* dont seule la *connectivité est connue* mais dont la *géométrie est inconnue* et *susceptible de changer localement* est une tâche complexe. Elle exige des solutions à divers problèmes tels que : la perception et la reconstruction de l'environnement, la localisation du véhicule dans son environnement, la planification et le suivi de chemin, la détection et l'évitement d'obstacle, etc. La solution à ces problèmes offre deux modes de fonctionnement de base : *l'exploration initiale d'environnement préalablement inconnu et l'exécution autonome des missions globales de navigation dans un environnement déjà exploré.*

2.3.2.1 Spécification des missions pour l'exploration initiale

Dans ce mode, le véhicule collecte des informations sensorielles décrivant la forme géométrique des galeries, des baies et des intersections de galeries rencontrées dans l'environnement et construit deux cartes métriques bidimensionnelle (2D) et tridimensionnelle (3D) de cet environnement. La figure 2.8 illustre un exemple de carte

2D reconstruite à partir de données recueillies dans un environnement monté en laboratoire.

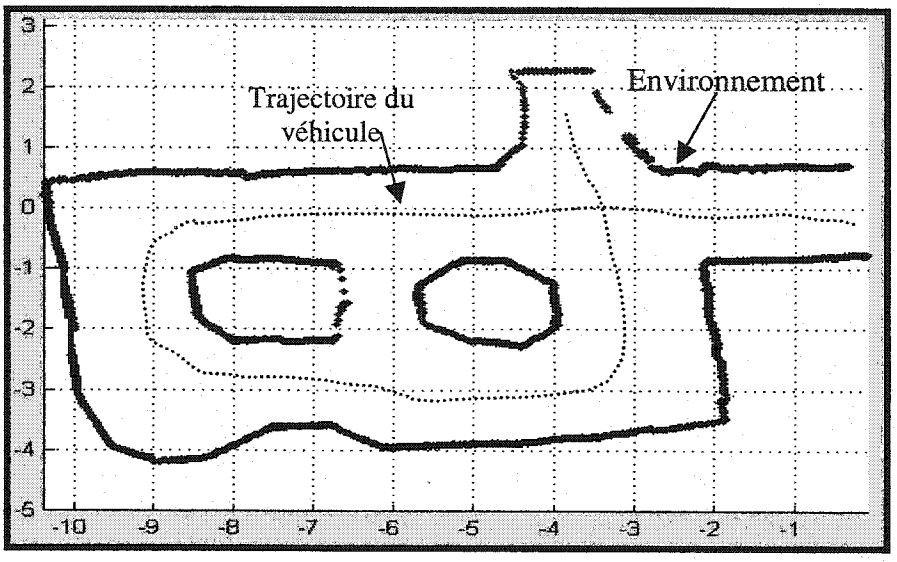


Figure 2.8 Carte métrique 2D

La figure 2.9 illustre une carte 3D reconstruite à partir de données sensorielles recueillies dans une mine souterraine (Noranda à Bathurst, Nouveau Brunswick, Canada).

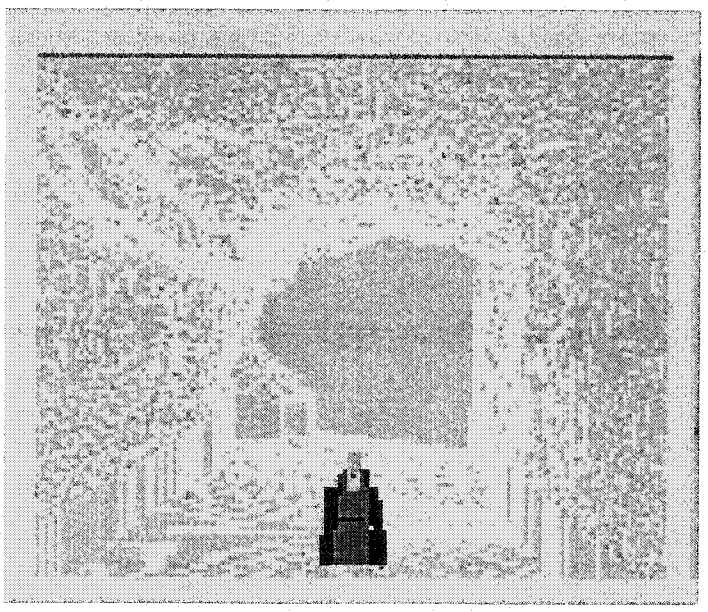


Figure 2.9 Carte métrique 3D

Pour effectuer l'exploration initiale d'un environnement, le superviseur spécifie à l'aide de l'interface humain-machine (*cf.* Figure 2.10), les éléments topologiques à explorer à partir d'un croquis préliminaire fournissant la connectivité de l'environnement. Il spécifie aussi les modes de navigation à utiliser pour chaque élément topologique. Un mode de navigation est basée sur la structure naturelle (paroi gauche, paroi droite, axe central entre deux parois) disponible pour le guidage du véhicule. En l'absence de structure naturelle, comme dans une intersection, le mouvement sera basé sur l'odométrie. Les modes de navigation sont donc le suivi de la *paroi gauche*, de la *paroi droite*, de l'*axe central entre deux parois* nommées dans la suite ***FollowLeft***, ***FollowRight***, ***FollowMiddle***, respectivement. A part ces trois modes, un autre mode nommé ***TraverseIntersection*** est utilisé pour la navigation en intersection où aucune paroi n'est disponible pour le guidage.

Pendant que le véhicule effectue l'exploration d'un environnement, il récolte simultanément des données sensorielles sur la géométrie de cet environnement et sur son déplacement. Ces données sont ensuite traitées et utilisées pour la construction des cartes métriques.

2.3.2.2 Spécification et exécution autonome des missions globales de navigation

Dans ce mode de fonctionnement, l'opérateur définit les missions de haut niveau (par exemple : "aller à tel endroit ", "chercher telle intersection ") sur la carte de référence obtenue après l'exploration (cf. Figure ci-dessous)

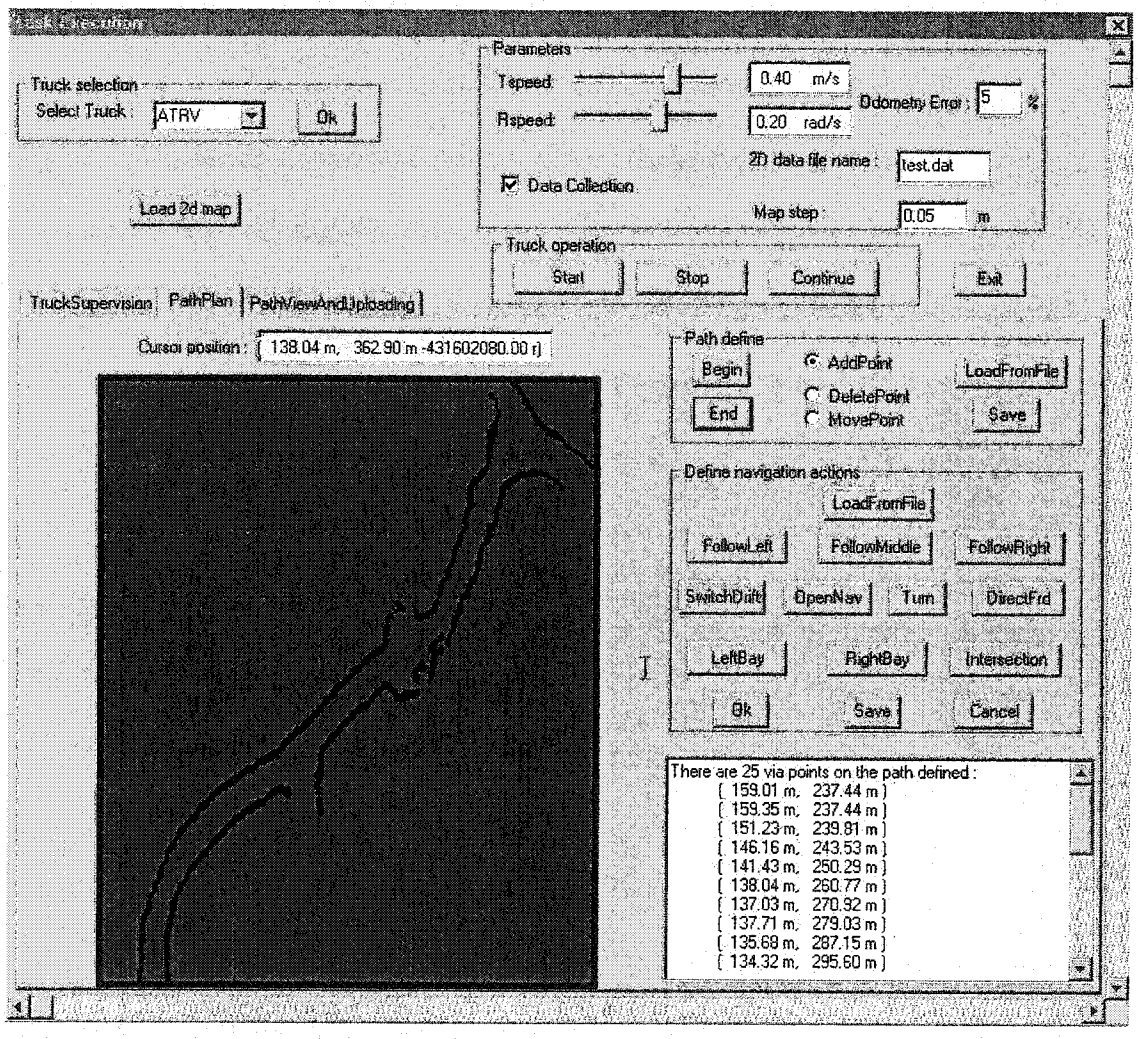


Figure 2.10 Interface de spécification de missions

Chaque mission est ensuite divisée en un ensemble de sous-missions consécutives que nous appellerons ***actions de navigation***. Cette division est effectuée par le planificateur

de missions. Chacune des actions de navigation est généralement délimitée par un repère naturel (une baie ou une intersection) ou par une distance spécifiée. Une action de navigation est définie par une combinaison d'éléments tels que : un chemin à suivre, un mode de navigation à exécuter, une distance à parcourir, un repère naturel à rechercher ou à identifier par mise en correspondance, etc.

- *Génération du chemin*

  Pour définir un chemin, l'opérateur choisit, sur la carte de référence, un point initial, quelques points intermédiaires et un point final. Ce choix de points est possible grâce aux fonctions d'édition (***Begin, Add, Move, Delete, End***) de l'interface[1] homme-machine (*cf.* Figure 2.10). Ces points intermédiaires seront appelés dans la suite par "*points de passage*". Le module de planification de chemin génère ensuite un chemin continu satisfaisant aux contraintes cinématiques non-holonômes du véhicule. Un chemin peut être sauvegardé, téléchargé et réutilisé.

- *Action de navigation*

  Une fois qu'un chemin est spécifié (ou téléchargé) sur la carte de référence (*cf.* Figure 2.10), le planificateur de mission génère une séquence d'actions de navigation associée à ce chemin, appelé "***plan d'action de navigation***". Ce plan d'action de navigation peut être généré, validé, sauvegardé et téléchargé par le superviseur à l'aide de l'interface humain-machine. Le passage automatique de

[1] L'interface homme-machine utilisée dans ce système n'entre pas dans le cadre de cette thèse.

l'exécution d'une action de navigation à une autre exige la détection d'un repère naturel ou l'accomplissement d'une distance donnée. Pour spécifier le repère naturel à détecter, nous utiliserons la terminologie indiquée au tableau 2.

Tableau 2 : Terminologie du plan d'action de navigation

Terminologie	Action correspondante
FollowLeft	Suivre la paroi gauche.
FollowRight	Suivre la paroi droite.
FollowMiddle	Suivre l'axe central entre deux parois.
TraverseIntersection	Traverser une intersection.
Intersection	Chercher une intersection.
LeftBay	Chercher une baie à gauche.
RightBay	Chercher une baie à droite.
Distance	Parcourir une distance spécifiée.
MapMatching	Se localiser par mise en correspondance
Turn	Tourner d'un angle spécifié
Start	Débuter l'exécution du plan d'action de navigation et prendre la pose spécifiée comme pose initiale.

La figure 2.11 illustre un plan d'action de navigation (*cf.* Chapitre 3 pour l'interprétation de ce plan d'action).

Start -80.00 45.00 45.00
MapMatching
FollowMiddle
Distance 35.84
RightBay
FollowLeft
MapMatching
Distance 8.90
FollowMiddle
Distance 13.94
Intersection 4
SwitchDrift 2
Distance 11.67
FollowMiddle
Distance 20.38
FollowRight
Distance 21.08

Figure 2.11 Plan d'action de navigation : phase aller

- *Exécution de mission*

  L'exécution des missions implique la combinaison de diverses fonctions réactives: suivi des parois et de chemin, détection de repères naturels, détection d'obstacles, etc.

- *Supervision de l'exécution*

  L'interface homme-machine permet de visualiser en temps réel l'état du véhicule et ses mouvements sur la carte de référence. Ainsi, le superviseur pourra à tout moment arrêter l'exécution d'une mission, redéfinir une autre mission ou continuer

une mission interrompue. Le superviseur pourra aussi visualiser en ligne les données sensorielles et l'environnement reconstruit par le véhicule de façon incrémentale.

2.3.3 Modules du système

Rappelons que l'aspect modulaire de notre architecture permet et facilite la modification de modules ainsi que le développement et l'intégration de nouveaux modules dans le système. Les principaux modules que nous avons développés et intégrés sont : *le module d'intégration multi-capteurs, le module de localisation, le module de détection d'obstacles, le module de détection de repères naturels, le module de contrôle de l'exécution, le module d'arpentage et de reconstruction de l'environnement, le module de planification de missions et de chemin et l'interface homme-machine.* Selon les fonctionnalités des modules, nous avons divisé l'architecture du système en trois blocs : le bloc de perception, le bloc de décision et d'exécution, et le bloc de fonctionnalités (*cf.* Figure 2.7).

2.3.2.3 Bloc de Perception

Ce bloc est responsable de fournir, en continu et en temps réel, au véhicule autonome les informations sur son état et sur son environnement local. Chaque capteur de notre *plate-forme multi-capteurs* (§2.4.3) constitue un serveur du système par l'intermédiaire du *module d'intégration multi-capteurs.*

Le module d'intégration multi-capteurs

Ce module prend en entrée les données brutes des capteurs et fournit au système des données traitées et filtrées. La tâche de ce module consiste à compenser les erreurs de chacun des capteurs en se servant des informations fournies par d'autres capteurs. Les dérives des capteurs, le biais du gyroscope par exemple, sont compensées par ce module. Le principal avantage apporté au système par le concept de module multi-capteurs est le fait que l'insertion ou le retrait d'un capteur dans la plate-forme multi-capteurs n'implique des modifications que dans ce module et non pas dans tout le système. Ceci permet au reste du système d'être *indépendant des capteurs* utilisés.

2.3.2.4 Bloc de décision et d'exécution

Ce bloc constitue la partie hiérarchique du système. Il a deux niveaux hiérarchiques : un niveau décisionnel et un niveau exécutif.

- ***Niveau décisionnel***

  Ce niveau communique avec le superviseur, génère le plan d'action de navigation, et supervise l'exécution du plan d'action de navigation par le véhicule. Il est constitué de deux modules qui sont : la planification de missions et la planification de chemins. La figure 2.12 illustre les entrées et les sorties de ce niveau.

  - ***Module de planification de missions***

    Ce module a pour tâche de définir les points de passage et de traduire, en se servant de la carte de référence, les missions (de haut-niveau d'abstraction)

définies par le superviseur en un ensemble de sous-missions ou ***actions de navigation***. Ce module appelle ensuite le module de planification de chemins (ci-dessous) pour relier tous les *points de passage*, générant ainsi un chemin de navigation. Ce chemin de navigation sera aussi appelé *chemin global* dans la suite de ce manuscrit. Le chemin global et les actions de navigation mentionnées ci-dessus constituent le *plan d'action de navigation* qui sera ensuite transmis au niveau exécutif.

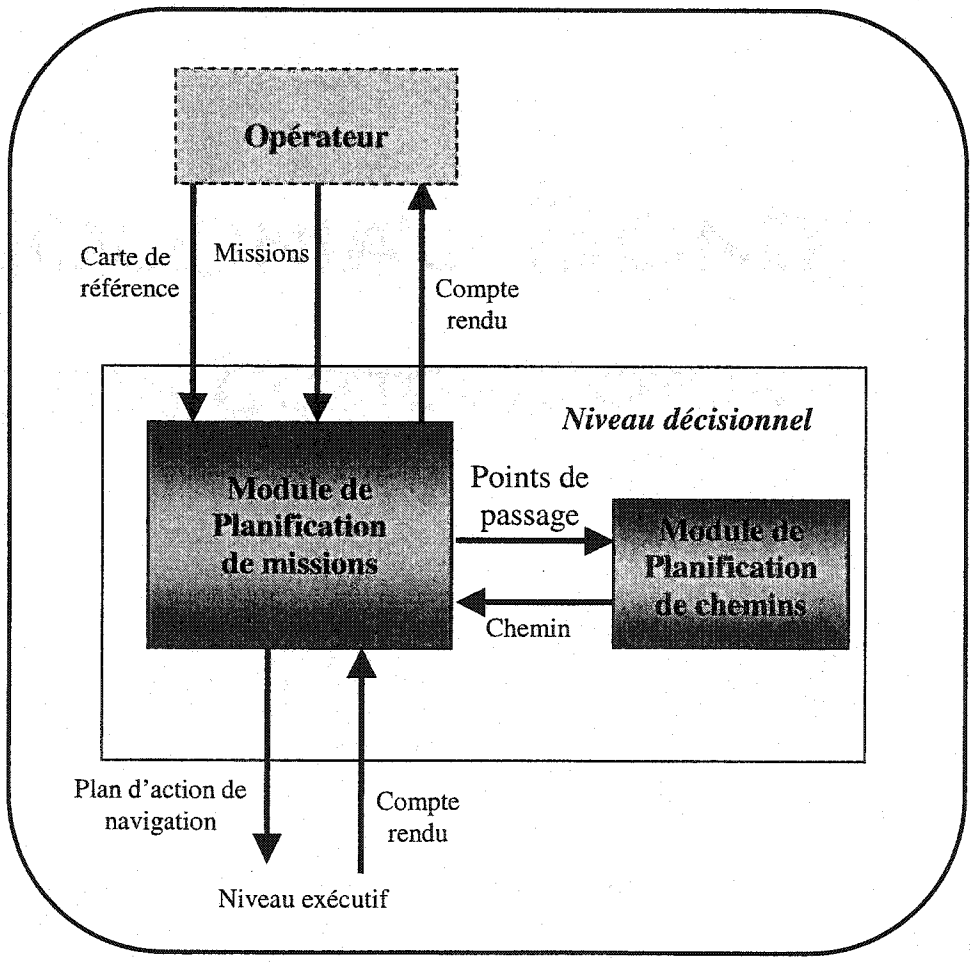


Figure 2.12 Aperçu du niveau décisionnel

- ***Module de planification de chemins***

  Ce module a pour tâche de générer un chemin lisse reliant les points de passage tout en respectant les contraintes cinématiques. Ce chemin est constitué de segments de droite et d'arcs de cercle.

- ***Niveau exécutif***

Ce niveau exécute de façon réactive le plan d'action de navigation. Il est constitué d'un seul module, le contrôleur d'exécution, mais est décomposé en deux sous-modules. Il contrôle et coordonne l'exécution des modules et des fonctionnalités temps réel. La figure 2.13 illustre les entrées et les sorties du niveau exécutif. Les entrées sont : le plan d'action de navigation, les données sensorielles sur l'environnement et l'état courant du véhicule. Les sorties sont des commandes assurant l'exécution du *plan d'action de navigation* par le véhicule. Les sous-modules du contrôleur d'exécution sont :

- ***Ordonnanceur d'exécution de missions***

  Son rôle est d'interpréter le plan d'action de navigation et de réagir en conséquence. Pour ce faire, il active (initialise), contrôle et coordonne l'exécution des modules et des fonctionnalités, en temps réel, (du bloc de fonctionnalité) nécessaires à l'exécution du plan d'action de navigation. La sortie de l'ordonnanceur est une instruction de type "*arrêter*", "*accélérer*", "*ralentir*", "*tourner à gauche ou à droite d'un angle quelconque*", etc. Par défaut, il envoie l'instruction "*suivre le plan d'action de navigation* ".

- ***Contrôleur de mouvement***

Le contrôleur de mouvement est un contrôleur référencé capteurs. Il est responsable de générer, de manière réactive, les commandes permettant au véhicule d'exécuter le plan d'action de navigation. Ceci se fait en suivant les parois de façon réactive ou en suivant un chemin généré en ligne.

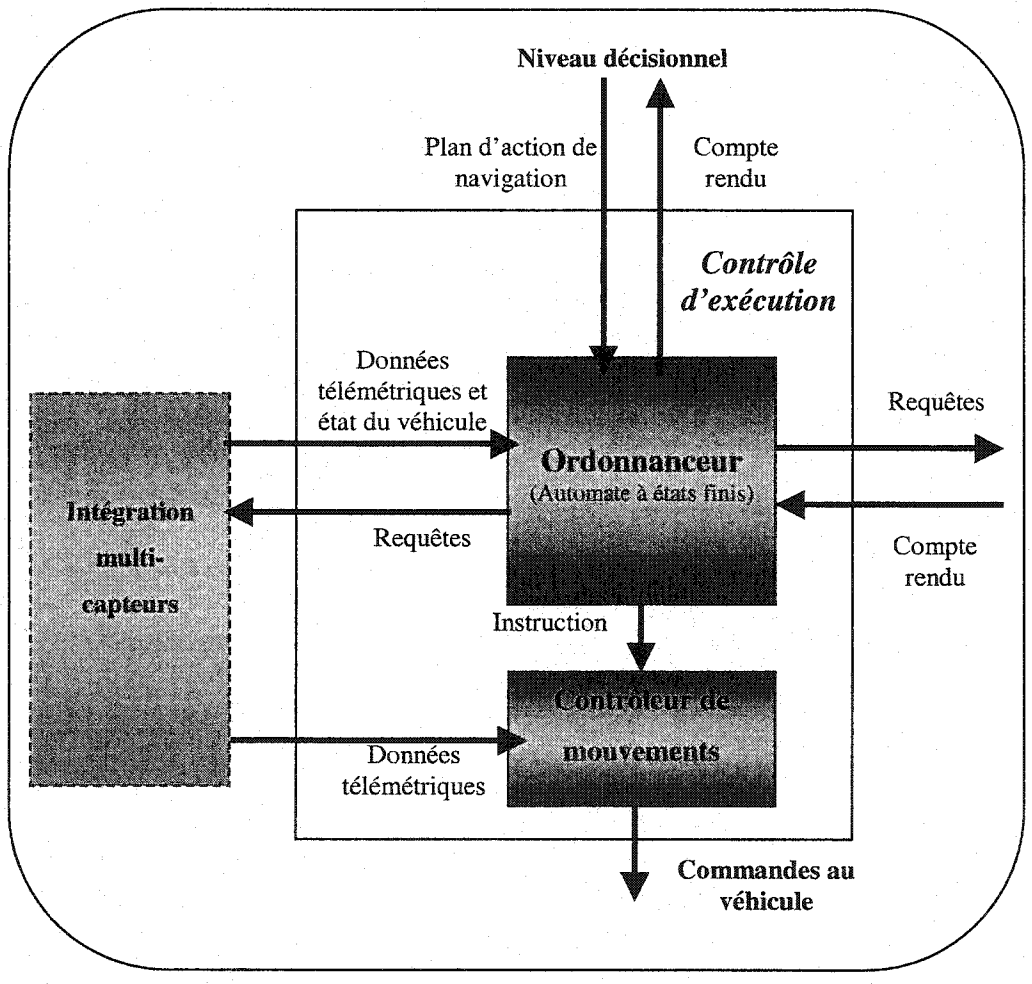


Figure 2.13 Aperçu du module de contrôle d'exécution ou niveau exécutif

2.3.2.5 Bloc de fonctionnalités

Il est composé des modules, des diverses fonctionnalités temps réel et outils mathématiques nécessaires au fonctionnement du système. Ce bloc constitue une librairie des modules et des fonctionnalités. Les principaux modules et fonctionnalités de ce bloc sont :

- ***Module de localisation référencée multi-capteurs/carte***

  Le module de localisation est un des plus importants modules dans un système de navigation autonome. Nous avons développé deux techniques dont la *localisation référencée multi-capteurs*, qui intègre les capteurs inertiels pour compenser l'erreur d'orientation du système odométrique, et la *localisation référencée carte*. La première technique permet au système d'estimer continuellement la position et l'orientation du véhicule. La deuxième technique, qui consiste à mettre en correspondance la carte de référence et la carte locale, permet de corriger l'erreur accumulée par la première technique. Pour réaliser sa tâche, ce module a besoin de données télémétriques, de l'état du véhicule et de la carte de référence. Il fournit, à la sortie, la position et l'orientation réelles du véhicule dans la carte de référence.

- ***Module de détection d'obstacles***

  La détection d'obstacles est une capacité nécessaire pour un véhicule autonome évoluant dans un environnement susceptible de changer localement. Ce module prend en entrée les données télémétriques sur l'environnement proche du véhicule qu'il traite, analyse et ensuite décide s'il y a ou non un obstacle. En cas d'obstacle, le

véhicule s'arrête et attend que la route se libère pour poursuivre sa mission. Ce module exécute sa tâche en parallèle avec d'autres modules et fonctionnalités.

- ***Module de détection de repères naturels***

  Dans d'autres systèmes l'installation de repères artificiels dans l'environnement permet au véhicule autonome de se localiser et de naviguer de façon fiable. Cependant, l'installation et la maintenance de telles infrastructures sont coûteuses, rendant l'utilisation de repères artificiels moins pratique dans un environnement dynamique, voire même impraticable dans un environnement inconnu. Notre système exploite, pour la localisation et le guidage du véhicule, des structures propres à l'environnement telles que les baies et les intersections, que nous appelons *repères naturels*.

  Ce module est responsable de la détection des baies et des intersections. Il prend en entrée des données télémétriques (prises par les télémètres frontal et latéral, cf. §2.4.3) de l'environnement du véhicule.

- ***Module d'arpentage et reconstruction de l'environnement 2D/3D***

  La capacité de construire la carte d'un environnement, à partir des données sensorielles, est très importante pour un véhicule autonome. Elle augmente la robustesse du système et améliore le comportement du véhicule navigant sur une longue distance (CHATILA 1985).

Ce module effectue l'arpentage des galeries, des baies et des intersections en collectionnant des informations télémétriques sur l'environnement et des informations sur le mouvement du véhicule. Il se sert ensuite des informations sensorielles recueillies pour la construction d'un modèle de l'environnement sous forme de cartes métriques bidimensionnelle (2D) et tridimensionnelle (3D). Les entrées de ce module sont : des données télémétriques dans les plans osculateur et normal à la trajectoire locale et des données sur les déplacements du véhicule. Ces deux cartes métriques 2D et 3D constituent la sortie du module.

- ***Fonction d'extraction de caractéristiques géométriques***

C'est l'une des fonctionnalités les plus sollicitées par les modules du système. Cette fonction permet de modéliser un nuage de points alignés en une droite. Elle intervient pour la reconstruction de l'environnement, pour la localisation référencée carte et pour l'estimation de la position/orientation du véhicule par rapport aux parois.

2.4 Configuration du système proposé

Cette section présente la composition matérielle et logicielle de notre système intégré. Elle décrit la plate-forme mobile, la plate-forme multi-capteurs embarquée et les autres équipements.

2.4.1 Description de la configuration du système

La configuration de notre système est schématisée par la figure 2.14. Elle est composée d'un véhicule prototype de laboratoire et d'un ordinateur. Celui ci sert à lancer l'interface homme-machine et à établir la communication (par radio) avec le véhicule.

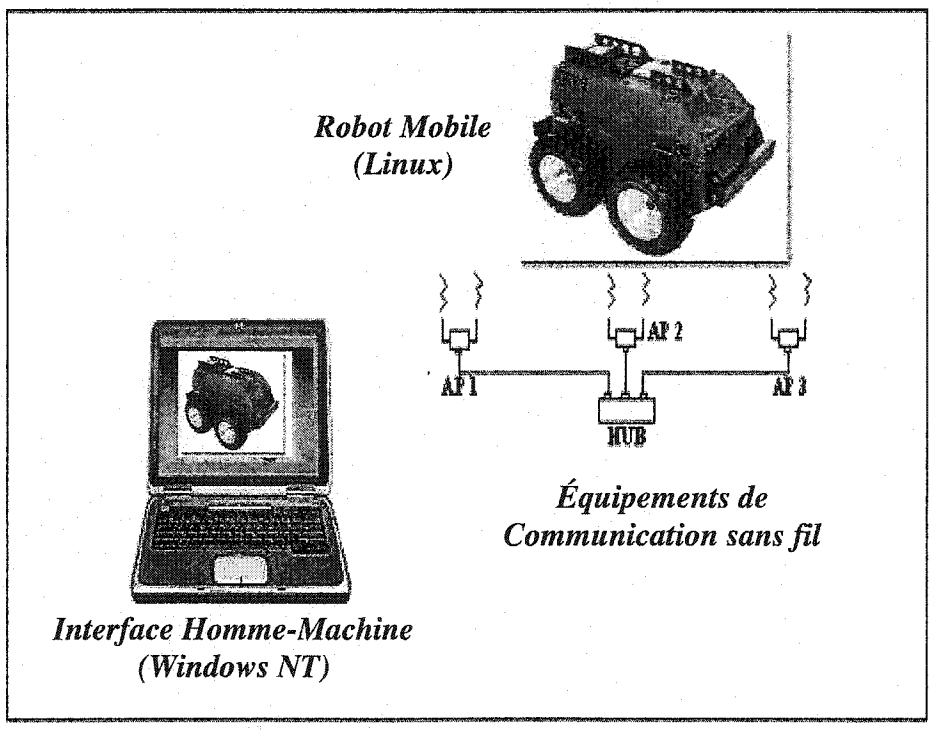


Figure 2.14 Configuration du système.

2.4.2 Plate-forme mobile

Notre véhicule expérimental nommé ***ATRV-2***, est de modèle ATRV-2 manufacturé par IS Robotics. ***ATRV-2*** est un véhicule tout terrain, ayant quatre roues motrices, non directionnelles et pouvant tourner sur place. Son système d'exploitation est linux et possède un logiciel appelé Mobility™ permettant l'intégration de nouveaux composants tant informatiques que matériels. Mobility™ est un logiciel d'intégration des robots conçu pour développer des programmes de contrôle pour des systèmes simple ou multi-robots. Mobility™ possède une architecture orientée-objet et distribuée, ce qui permet d'ajouter rapidement et assez efficacement toutes les composantes de notre système. Les détails sur les spécifications techniques de ***ATRV-2*** sont fournis dans COHEN et al (2000). La figure 2.15 illustre ***ATRV-2*** et ses capteurs télémétriques.



Figure 2.15 Notre véhicule : ***ATRV-2***

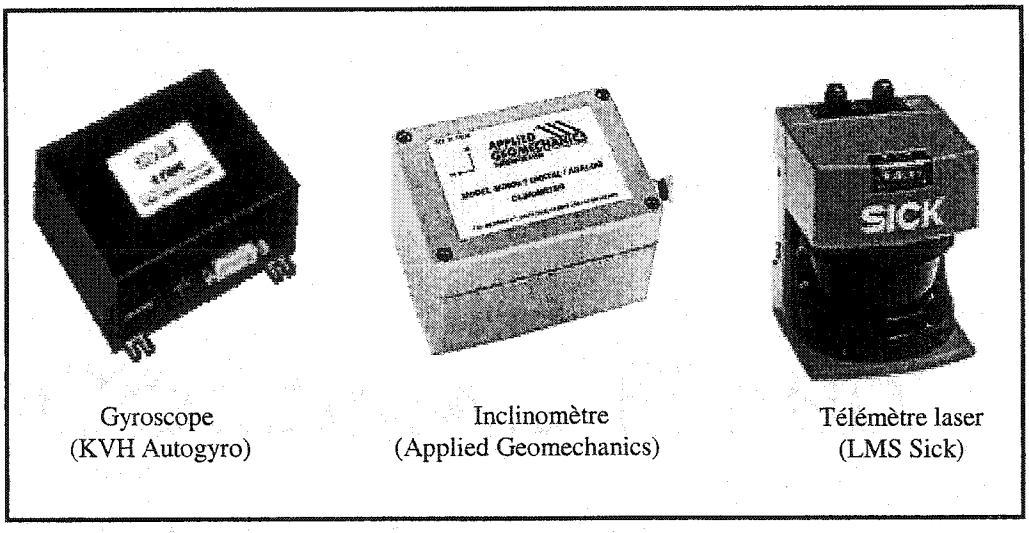
2.4.3 Plate-forme multi-capteurs

Au cours de cette thèse, nous avons *conçu* et *monté* une plate-forme multi-capteurs pour notre système. Par *conception* de la plate-forme multi-capteurs, nous sous-entendons le choix de capteurs dans une large gamme de capteurs de navigation (EVERETT, H. R., 1995) en tenant compte de l'usage que nous voulons en faire (voir les objectifs de cette thèse), de leur robustesse, de leur précision et de raisons économiques. Par *montage* de la plate-forme multi-capteurs, nous sous-entendons la mise en place de capteurs sur le véhicule, le développement logiciel de lecture et l'intégration de ces capteurs dans le système. Cette plate-forme multi-capteurs fournit au système des données sensorielles brutes sur l'environnement et l'état du véhicule. La plate-forme multi-capteurs est constituée :

- d'un gyroscope mono-axial, de modèle "Autogyro". Il mesure la vitesse angulaire du véhicule. L'estimation de l'orientation du véhicule se fait par intégration de cette vitesse angulaire.
- d'un inclinomètre bi-axial, de modèle "Clinometer", estimant la déviation du robot en tangage et en roulis.
- d'un système odométrique pour l'estimation de la position, l'orientation, les vitesses et les accélérations du véhicule.
- d'une ceinture de douze sonars (télémètres sonars) dont six en avant, deux en arrière et deux de chaque côté du robot. Nous les utilisons (optionnellement) pour la détection d'obstacle et le contrôle de mouvement du véhicule.

- de deux télémètres laser de marque " LMS Sick". Le premier, que nous appelons *télémètre latéral*, fourni des profils du plan normal à la trajectoire locale du véhicule. Ces données télémétriques sont utilisées pour la construction de la carte métrique tridimensionnelle (3D) de l'environnement ainsi que pour la détection de repères naturels. Le second, appelé *télémètre frontal*, fourni les profils du plan osculateur à la trajectoire locale du véhicule. Ces profils sont utilisés pour la reconstruction de la carte bidimensionnelle (2D) de l'environnement, le contrôle des mouvements du véhicule, la détection d'obstacles, la détection de repères naturels et la localisation du véhicule.

La figure 2.16 illustre le gyroscope, l'inclinomètre et le télémètre laser utilisés dans notre système.



Gyroscope (KVH Autogyro) | Inclinomètre (Applied Geomechanics) | Télémètre laser (LMS Sick)

Figure 2.16 Les capteurs du système

2.5 Récapitulation

Dans ce chapitre, nous avons fait un survol des architectures des systèmes proposés dans la littérature. Nous avons distingué et comparé trois familles d'architecture de systèmes, à savoir : les architectures hiérarchiques, les architectures réactives et les architectures hybrides. Nous avons présenté quelques exemples d'architecture y compris l'architecture initiale de notre système. Cette revue de la littérature nous a conduit à situer notre l'architecture dans la famille des architectures hybrides. L'organisation informatique (architecture du système) et la configuration de notre système ont ensuite été présentées. Les chapitres qui suivent concernent la réalisation et la validation du système intégré présenté dans ce chapitre.

Chapitre 3: Navigation locale

3.1 Introduction

La tâche d'un système de navigation autonome est de planifier un chemin conduisant à un endroit spécifié (ou un but) et d'exécuter ce plan en le modifiant pendant l'exécution si nécessaire pour éviter des obstacles imprévus. La navigation d'un véhicule peut être divisée en *navigation locale* et *navigation globale* suivant qu'elle utilise un *référentiel local* et exploite des informations sensorielles sur l'environnement immédiat du véhicule ou qu'elle utilise un *référentiel global* et exploite un modèle global de l'environnement. Un référentiel global est un repère fixe géographique lié à l'environnement et sa position est connue *a priori*. Le *référentiel local* est un repère lié au véhicule, dans notre cas au centre de masse du véhicule, et est donc mobile par rapport au repère global.

La navigation globale assure le guidage du véhicule pour atteindre le but spécifié. Les tâches de navigation globale sont généralement divisées en sous tâches exécutées par le système de navigation locale. Celui-ci réagit rapidement aux données sensorielles et modifie localement le chemin global lors de l'exécution, si nécessaire, pour faire face aux changements locaux de l'environnement. Ainsi, les opérations plus délibératives pour

atteindre un but sont réservées à la navigation globale, alors que les opérations réactives sont réservées à la navigation locale.

Dans ce chapitre, nous présentons les algorithmes et les résultats de validation de modules (de notre système) liés à la navigation locale. Ces modules sont : l'intégration multi-capteurs, la localisation référencée multi-capteurs, la détection d'obstacles et la détection de repères naturels. Remarquons que le contrôleur de mouvement est une activité de la navigation locale mais, vu son rôle dans notre système et le concept original que nous développons dans le domaine de la commande des robots mobiles, nous préférons le décrire dans un chapitre entier (chap. 4).

LEONARD (1991) a résumé le problème de la navigation en trois questions suivantes : *où suis-je (" Where am I")?*, *où vais-je ("Where am I going")?* et *comment y arriver ("How to get there")?*. Une solution complète au problème de navigation doit comprendre la connaissance, en chaque instant, de *l'état du véhicule*. C'est-à-dire la connaissance de la position, de l'orientation (tangage, roulis et lacet), de la vitesse longitudinale et angulaire et de l'accélération longitudinale et angulaire du véhicule. Le fait qu'un seul capteur ne peut pas fournir toutes ces informations motive l'intégration de plusieurs capteurs. Dans la section suivante (§3.2) nous proposerons des ***stratégies d'intégration multi-capteurs***. Ces stratégies permettront l'estimation en permanence de la position et de l'orientation du véhicule. C'est ce processus que nous appelons *localisation référencée multi-capteurs*. Notre approche ***localisation référencée multi-capteurs*** est développée dans la section 3.3. Une fois le véhicule capable de se localiser,

il doit être en mesure de se déplacer en toute sécurité, c'est-à-dire sans collision aux obstacles éventuellement présents. Pour ce faire, il est nécessaire que le véhicule soit doté de capacité de détection d'obstacles. La section 3.4 décrit le module de la ***détection d'obstacles***. Un véhicule intelligent ne doit pas seulement se déplacer sans collision mais doit aussi être capable de reconnaître les endroits précédemment visités. Pour cette raison, il lui faut des repères facilement détectables et reconnaissables. Ces repères peuvent être utilisés pour le guidage et la localisation du véhicule. Cette thèse utilise des structures propres à l'environnement comme repères; il s'agit des *intersections* de galeries et des *baies*, appelés *repères naturels* dans la suite. Dans la section 3.5, nous proposerons les algorithmes de ***détection de repères naturels*** dans un réseau de galeries. La reconnaissance de ces repères naturels, qui est possible par mise en correspondance de la carte de référence et la carte locale courante, est décrite au chapitre 5 (localisation par mise en correspondance).

3.2 Intégration multi-capteurs

3.2.1 Introduction

Dans cette section, nous proposons des stratégies permettant d'exploiter la redondance et la complémentarité des informations provenant de plusieurs capteurs pour accroître la précision de l'estimation de la pose du véhicule.

Rappelons que notre plate-forme multi-capteurs (§2.4.3) est équipée d'un gyroscope, d'un inclinomètre, d'un système odométrique et de deux capteurs télémétriques.

L'objectif de cette section est d'utiliser l'accélération provenant de l'odométrie pour corriger les données brutes d'inclinomètre (les estimés des angles de tangage et de roulis), puis ensuite d'intégrer les données corrigées d'inclinomètre à l'orientation (l'angle de lacet) estimée par le gyroscope, formant ainsi ce que nous appellerons le capteur inertiel " *clino-gyro*" (NSASI et al, 1999). Pour ce faire, nous commençons par la calibration du gyroscope, suivi de l'intégration ***clino-odométrie***, puis de l'intégration ***clino-gyro***. Des expériences de validation du concept original de *clino-gyro* sont ensuite présentées.

3.2.2 Erreurs et calibration du gyroscope

Le gyroscope est un capteur inertiel indépendant de l'environnement qui permet de mesurer en permanence la vitesse angulaire du véhicule et l'intégration de la vitesse angulaire donne l'estimé de l'orientation du véhicule. Cependant, ses mesures sont affectées par de la dérive appelée *biais*, ainsi que par la perturbation due aux angles de tangage et roulis du véhicule. En tant que capteur inertiel, les mesures du gyroscope sont aussi affectées par la rotation de la terre. Celle-ci étant constante et connue a *priori*, elle peut donc être prise comme une partie du biais. Le biais est considéré comme la source majeure d'erreur dans la navigation inertielle (BARSHAN et DURRANT-WHYTE 1995). L'accumulation de biais génère une erreur d'orientation non bornée. Ainsi l'estimation et la modélisation du biais sont d'une grande importance pour une estimation fiable de l'orientation du véhicule. Dans cette sous section, nous présentons deux stratégies pour estimer le biais du gyroscope afin de compenser son influence sur les

mesures de gyroscope : le *biais statique* et le *biais exponentiel*. Les figures 3.1 et 3.2 illustrent les mesures (vitesse angulaire et température) du gyroscope (Autogyro) placé immobile (stationnaire) au laboratoire pendant deux heures. En principe, les mesures d'un gyroscope immobile devraient être nulles, c'est-à-dire la vitesse angulaire égale à zéro degré par seconde, c'est qui n'est pas le cas en pratique. Cette différence est due au biais du gyroscope (incluant la rotation de la terre).

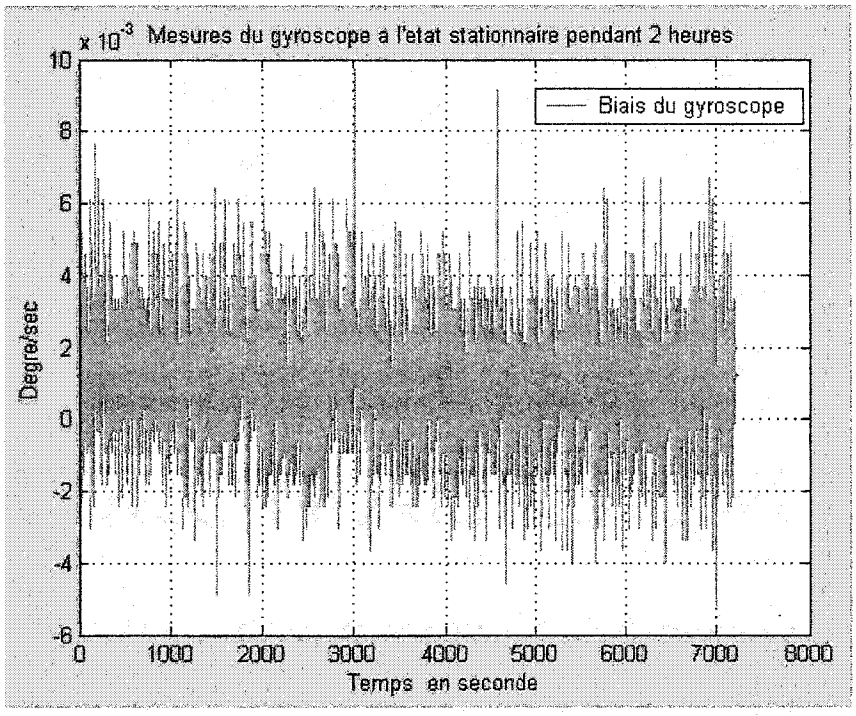


Figure 3.1 Mesures du gyroscope à l'état immobile : Biais.

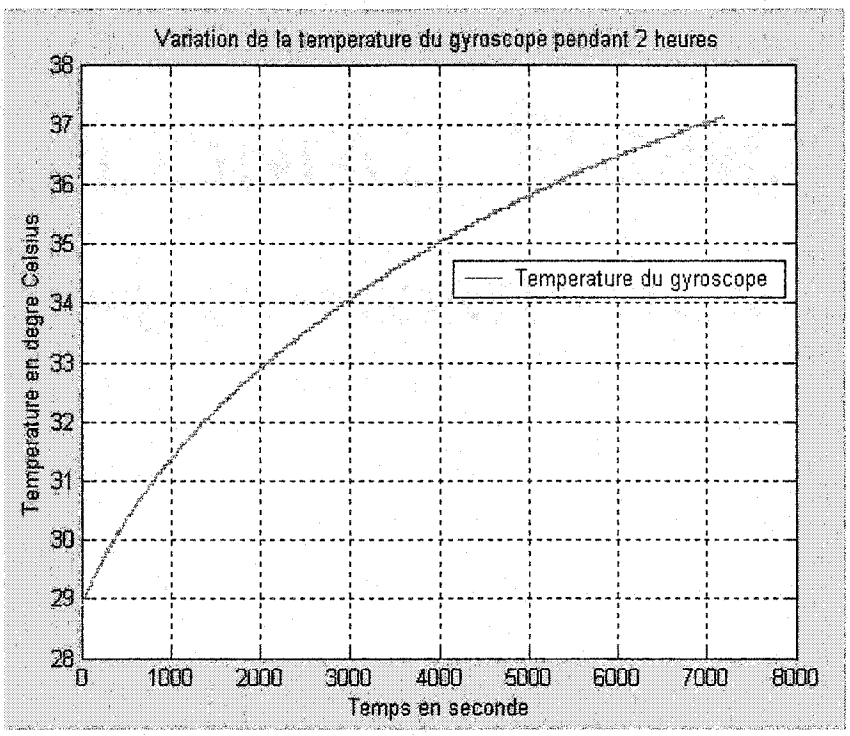


Figure 3.2 Mesures du gyroscope à l'état immobile : Température

3.2.2.1 Estimation du biais statique

En collectant plusieurs échantillons (pendant 15 à 20 secondes) des mesures du gyroscope à l'état immobile, généralement avant que le véhicule ne commence l'exécution de ses missions de navigation, l'estimé *biais statique* peut être donnée par :

$$B_s = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(\Omega_{out})_i \qquad (3\text{-}2\text{-}1)$$

où B_s est le biais statique, Ω_{out} est la mesure brute du gyroscope (vitesse angulaire) et n est le nombre total d'échantillon (n =150 pour 15 secondes d'échantillonnage avec Autogyro). Remarquons que la rotation de la terre est aussi incluse dans B_s. La figure 3.3 illustre l'estimé du biais statique. La compensation du biais statique sur les mesures

brutes du gyroscope permet d'améliorer considérablement l'estimation de l'orientation du véhicule (OJEDA (2000), BARSHAN (1995)).

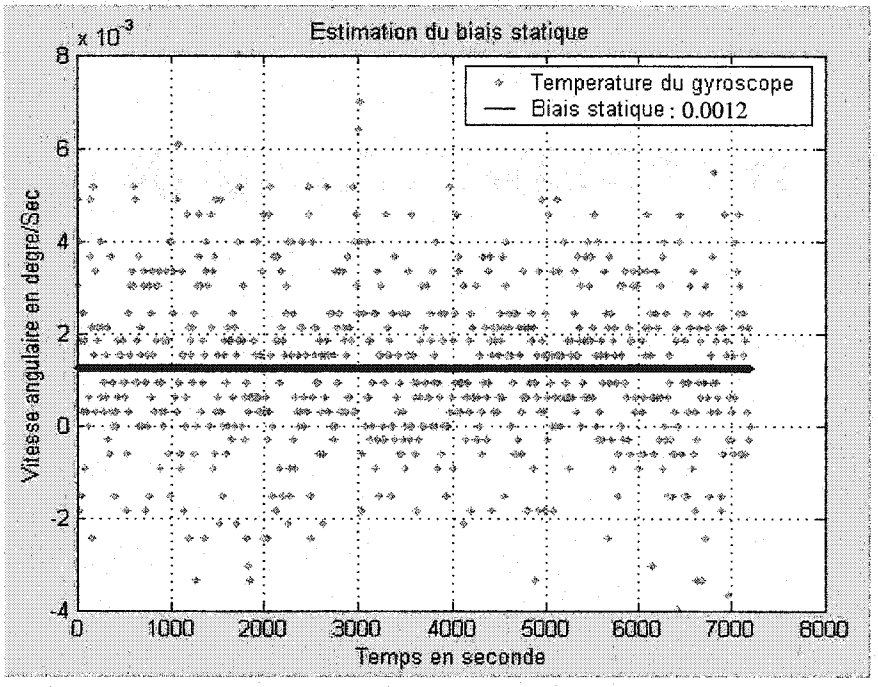


Figure 3.3 Estimation du Biais statique

3.2.2.2 Modèle exponentiel du biais

Observons maintenant les mesures du gyroscope aux figures 3.1 et 3.2. En subdivisant le biais en différents groupes selon différentes températures et en calculant le biais statique correspondant à chaque groupe, on obtient la courbe illustrée à la figure 3.4.

Cette courbe montre que le biais augmente au fur et à mesure que la température augmente. Cette relation peut être exprimée en terme d'une fonction exponentielle (BARSHAN et DURRANT-WHYTE (1995), BORENSTEIN (1998), NSASI et al (1999)) par le modèle exponentiel du temps que nous proposons est :

$$B_{\exp}(t) = C_1 + C_2 e^{-t/T(t)} \qquad (3\text{-}2\text{-}2)$$

où $T(t)$ est la température du gyroscope au temps t et les paramètres C_1 et C_2 sont des constantes à déterminer de façon à ce que $B_{\exp}(t)$ approxime le biais du gyroscope.

Remarquons ici que T n'est pas une constante comme proposé dans BARSHAN et DURRANT-WHYTE (1995). La meilleure estimation de C_1 et C_2 par la méthode de moindre carré nous donne (NSASI et al, 1999):

$$B_{\exp}(t) = 0.0012 - 0.0009e^{-t/T(t)} \tag{3-2-3}$$

Ainsi, la vitesse angulaire devient :

$$\Omega_z(t) = \Omega_{out}(t) - B_{\exp}(t) \tag{3-2-4}$$

où Ω_z est la vitesse angulaire et Ω_{out} est la vitesse angulaire brute mesurée par le gyroscope. La figure 3.5 illustre la courbe du modèle exponentiel du biais de l'Autogyro.

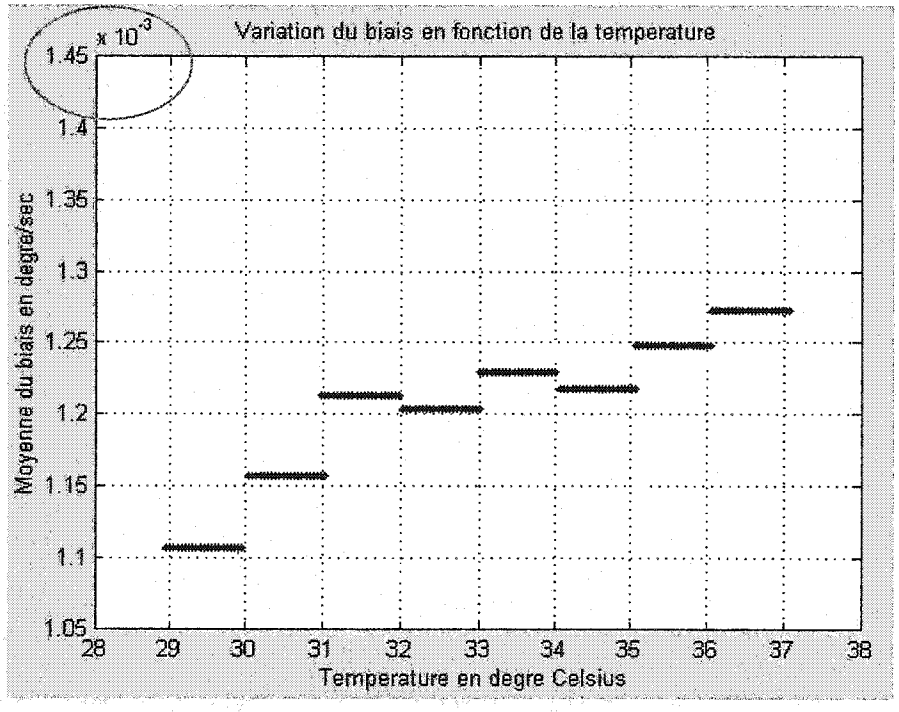


Figure 3.4 Biais statique *vs.* Température

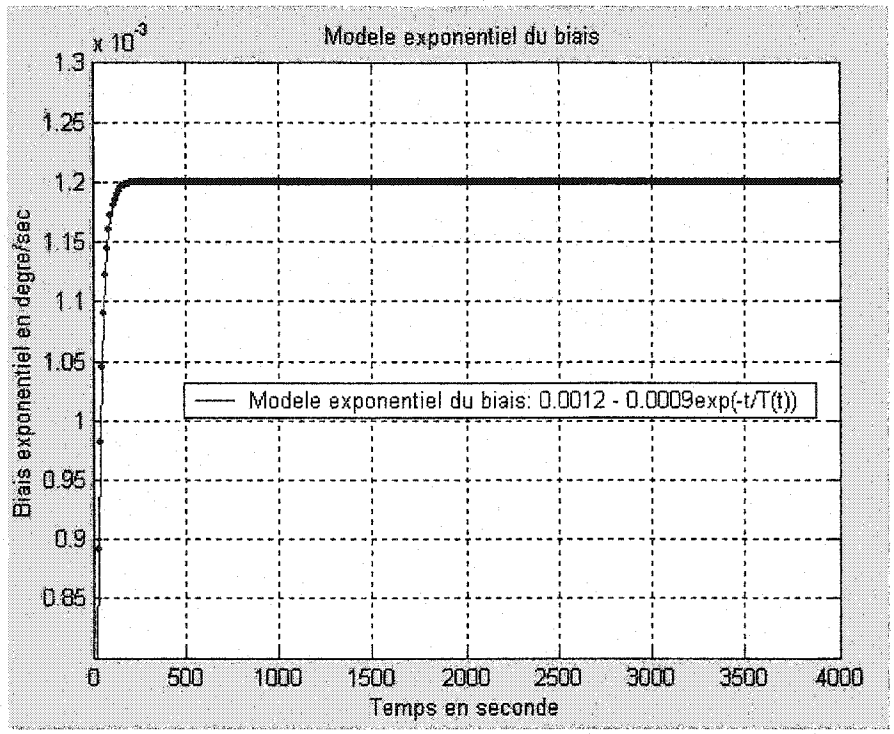


Figure 3.5 Biais exponentiel

Remarquons qu'à ce stade, nous n'avons pas encore compensé l'erreur du gyroscope provoquée par les perturbations de tangage et de roulis provoquées par l'irrégularité de la route dans le cas d'un véhicule à roues. Le gyroscope, de par son principe de fonctionnement (EVERETT, 1995), mesure la vitesse de rotation autour de l'axe perpendiculaire et non pas autour de l'axe vertical. Ainsi, si le gyroscope est incliné, c'est-à-dire que son axe n'est pas vertical, alors ses mesures ne correspondent plus à la vitesse angulaire réelle du véhicule, qui elle est mesurée autour de l'axe vertical. Pour palier aux effets des perturbations de tangage et de roulis, il faut un capteur pouvant estimer les angles de tangage et roulis. Pour ce faire, nous avons ajouté un inclinomètre à notre plate-forme multi-capteurs.

La sous-section suivante propose une stratégie pour améliorer l'estimation des angles de tangage et de roulis fournis par l'inclinomètre. Ces angles seront ensuite utilisés dans la section 3.2.4 pour compenser l'erreur provoquée par des perturbations de tangage et de roulis sur les mesures du gyroscope.

3.2.3 Intégration des données de l'inclinomètre avec celle de l'odométrie

L'inclinomètre étant un senseur basé sur la gravité (EVERETT, 1995), ses mesures (tangage/roulis) sont affectées par l'accélération du véhicule a. Celle-ci est déductible de l'odométrie. Ainsi, l'effet de l'accélération sur les mesures d'inclinomètre peut être compensé en intégrant l'inclinomètre avec l'odométrie par la relation proposée dans BARSHAN et DURRANT-WHYTE (1995) :

$$\beta,\gamma = \delta_{x,y}^{out} - \tan^{-1}(a_{x,y} / g), \qquad (3\text{-}2\text{-}5)$$

où β et γ dénotent les angles de tangage et de roulis respectivement, $\delta_{x,y}$ sont les mesures brutes d'inclinomètre correspondant aux angles de tangage et de roulis respectivement, a_x et a_y sont les composantes horizontales de l'accélération du véhicule, et g = 9.8 m/s^2 est l'accélération de la gravité. La relation (3.2.5) sera appelée, relation de **clino-odométrie**.

3.2.4 Intégration de l'inclinomètre avec le gyroscope

Le but de l'intégration de l'inclinomètre avec le gyroscope est de compenser les perturbations du tangage et du roulis dues à l'irrégularité de la route.

Soient Ω_{out} , Ω_b et Ω_z respectivement les mesures brutes du gyroscope, l'estimé du biais ($\Omega_b=B_s(t)$ ou $\Omega_b=B_{exp}(t)$) et les mesures calibrées du gyroscope. On a alors:

$$\Omega_z = \Omega_{out} - \Omega_b \tag{3-2-6}$$

La relation permettant la compensation de l'effet de tangage/roulis sur le gyroscope est déduite, en considérant l'aspect non-holonomique des mouvements angulaires décrits par les équations d'Euler :

$$\dot{\alpha} = \frac{\Omega_z + \dot{\beta}\sin\gamma}{\cos\beta\cos\gamma} \tag{3-2-7}$$

où $\dot{\alpha} = \Omega_{gc}$ est le résultat de l'intégration clino-gyro. Elle représente l'estimation correcte de la vitesse angulaire du gyroscope.

De (4-2-1) et (4-2-3), on peut déduire l'équation finale suivante pour l'intégration clino-gyro :

$$\Omega_{gc} = \frac{\Omega_z + \dot{\delta}_x^{out}\sin(\delta_y^{out} - \tan^{-1}(a_y/g))}{\cos(\delta_x^{out} - \tan^{-1}(a_x/g))\cos(\delta_y^{out} - \tan^{-1}(a_y/g))} \tag{3-2-8}$$

Les performances de cette intégration ont été testées en laboratoire sur un robot manipulateur et sur le véhicule. Les résultats sont présentés dans la sous-section 3.2.5

3.2.5 Expériences et résultats d'intégration multi-capteurs

Les performances de l'intégration clino-gyro comme senseur d'estimation de l'orientation d'un véhicule différentiel ont été évalués dans NSASI (1999). Ci-dessous, nous présentons les résultats obtenus en plaçant la plate-forme clino-gyro sur un bras manipulateur (CRS A465 à six degrés de liberté) tel qu'illustré sur la figure 3.6. Le bras manipulateur est ensuite programmé pour exécuter des trajectoires combinant des mouvements de rotation linéaire et de rotation ondulatoire. Les mouvements ondulatoires permettent de simuler les perturbations tangage/roulis dues à l'irrégularité de la route suivie par le véhicule.

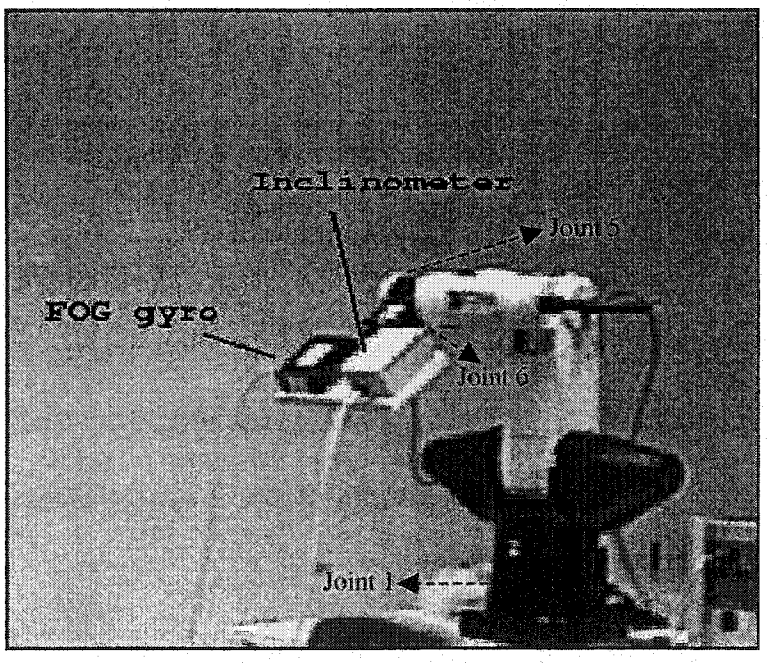


Figure 3.6 Configuration de l'expérimentation clino-gyro

Pendant que le bras manipulateur exécute les trajectoires prédéfinies, les mesures de clino-gyro ainsi que celles des encodeurs de joints du bras manipulateur sont enregistrées.

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 3.7. Sur cette figure, la partie gauche illustre les mesures respectives des joints 6, 5 et 1 du bras manipulateur et la partie droite illustre celles du clino-gyro. Du haut en bas, on a respectivement les mesures correspondant aux angles[1] de tangage ("Pitch "), roulis ("Roll ") et lacet ("Yaw ").

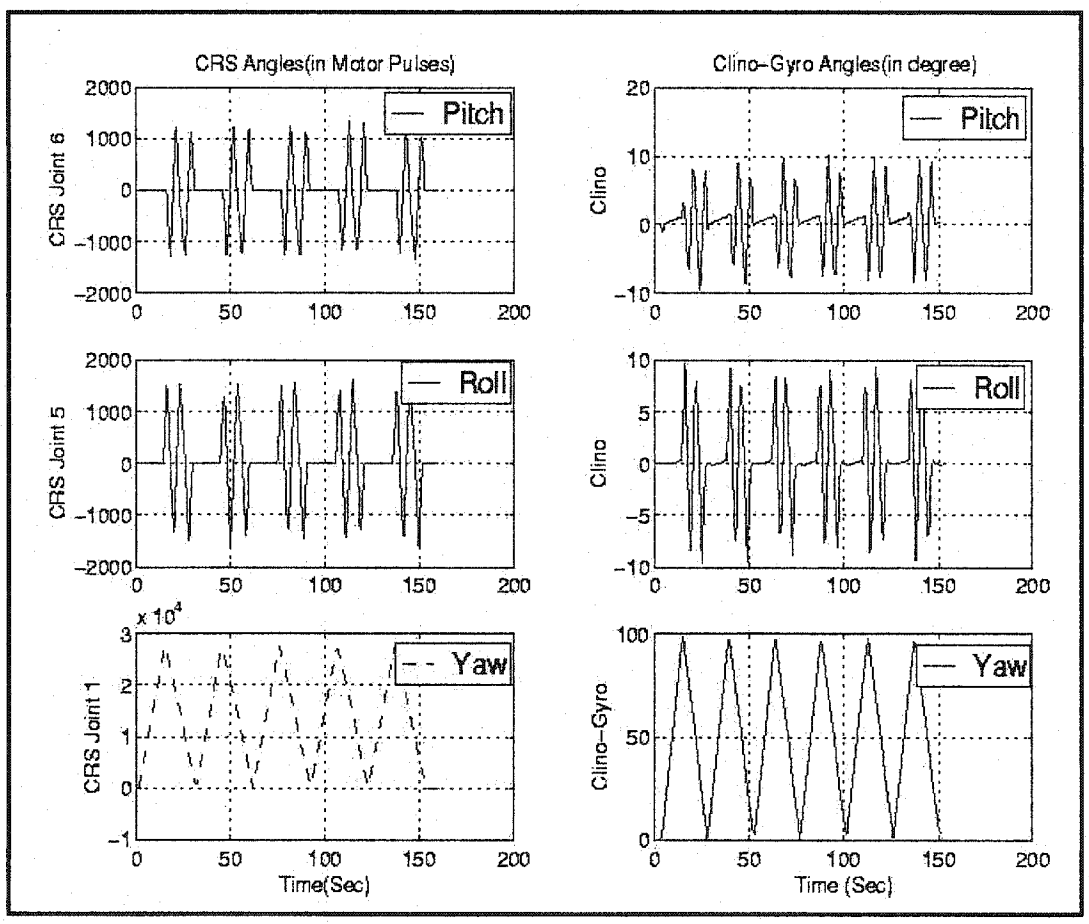


Figure 3.7 Manipulateur vs clino-gyro

Il ressort de la figure 3.7 que l'intégration clino-gyro proposée estime les mouvements du manipulateur avec une grande précision. En comparant les données brutes du gyroscope

[1] Les figures 3.6 et 3.7 sont tirées de NSASI et al. (2000) d'où les noms en anglais.

(nommées "Thêta ") avec les données du clino-gyro (nommées "Yaw ") dans la figure 3.8, on observe que l'erreur du gyroscope (nommée "Error "), principalement due au biais et aux perturbations tangage/roulis, augmente sans limite. D'où l'importance de l'intégration du gyroscope avec l'inclinomètre proposée dans cette thèse

En observant la courbe d'erreur dans la figure 3.7, on peut facilement remarquer qu'elle est constituée des portions constantes et croissantes. Cela correspond respectivement aux mouvements de rotation linéaire (c'est a dire sans perturbation tangage/roulis) et de rotation ondulatoire réalisés par le bras manipulateur. Les perturbations tangage/roulis sont responsables de cette croissance d'erreur.

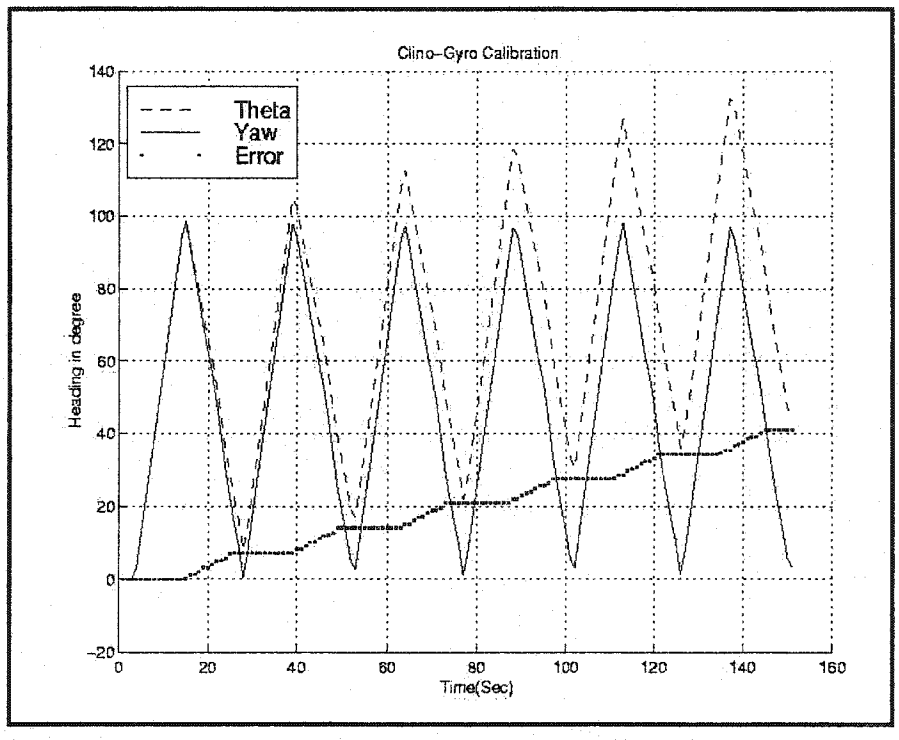


Figure 3.8 Compensation de l'effet tangage/roulis

3.3 Localisation référencée multi-capteurs

La détermination de la pose d'un robot mobile est un problème très important en navigation autonome. Dans un environnement à deux dimensions, la pose d'un robot mobile est représentée par un triplet (X, Y, θ) où X, Y et θ sont respectivement la position et l'orientation du robot.

L'approche de localisation référencée multi-capteurs proposée dans cette thèse pour estimer la pose du véhicule consiste à intégrer l'orientation fournie par la plate-forme clino-gyro (cf. formule (3.2.8) avec les déplacements élémentaires extraits du système odométrique (cf. formule (3.3.6)).

3.3.1 Pourquoi la localisation est-elle importante?

Dans différentes applications considérées en robotique mobile, la capacité du véhicule autonome à se localiser, c'est-à-dire à connaître à tout instant sa position et son orientation par rapport à l'environnement est essentielle pour plusieurs raisons :

La plupart des tâches qu'un véhicule autonome doit exécuter sont définies en termes de lieux géographiques tel que "va à tel endroit ", "explore telle région ", etc. L'exécution de telles tâches exige la connaissance de la position courante du véhicule et aussi les positions par lesquelles le véhicule est passé afin d'assurer et de contrôler l'exécution globale de missions.

Plusieurs applications en navigation autonome (par exemple, la planification de chemin, la reconnaissance de lieux déjà explorés, etc.) exigent un modèle (carte) de l'environnement. Ce modèle est généralement construit par le véhicule à partir des données sensorielles recueillies lors de ses déplacements. Afin de maintenir la cohérence entre les différentes parties du modèle, il est nécessaire que les positions du véhicule soient connues lors de l'acquisition des données.

Les planificateurs des missions et les fonctions décisionnelles qui contrôlent le déroulement global des missions d'un véhicule autonome se basent généralement sur la pose de celui-ci dans un modèle global de l'environnement. Ainsi, la connaissance de la pose du véhicule et la cohérence du modèle global de l'environnement sont importants pour l'exécution correcte des missions.

Comme nous pouvons le remarquer, le problème de localisation est présent à différents niveaux de navigation autonome. Sa résolution est primordiale pour s'assurer aussi bien d'une bonne exécution d'un déplacement élémentaire que d'une exécution correcte des missions globales de navigation.

La principale difficulté de la localisation d'un véhicule réside dans l'incertitude sur les mesures fournies par les capteurs, pouvant engendrer une accumulation d'erreurs importante sur de grandes distances, tant sur la position des objets dans l'environnement que sur la position du véhicule lui-même.

3.3.2 Localisation basée sur l'odométrie

3.3.2.1 Principe de positionnement par odométrie

L'estimation de la position par odométrie est très répandue en robotique mobile, en particulier pour les véhicules à roues. Cette estimation s'obtient par cumul de déplacements élémentaires, calculés périodiquement à l'intervalle de temps Δt. Pour une fréquence de calcul suffisamment élevée, les déplacements élémentaires peuvent être approximés par des arcs de cercles le long desquels le véhicule parcourt une distance élémentaire ΔD_c pour une variation d'angle $\Delta\theta$ comme illustré par la figure 3.9.

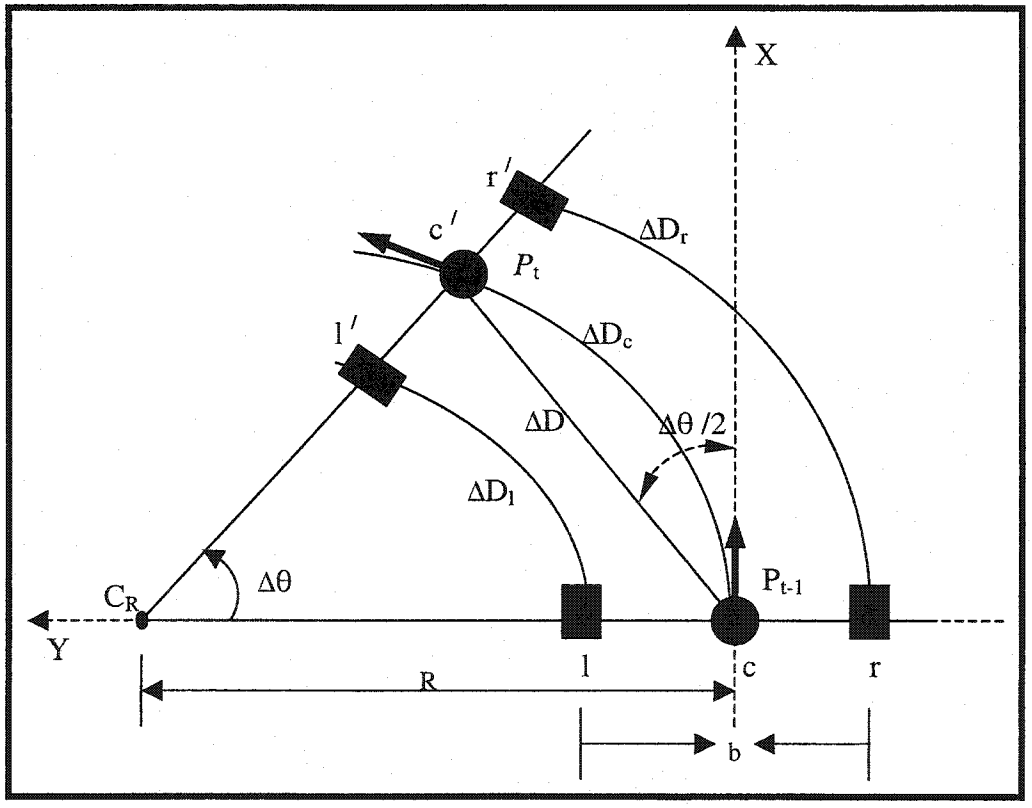


Figure 3.9 Principe d'odométrie (déplacement élémentaire).

Sur cette figure, les positions des roues de gauche, du centre de masse (point de référence) du véhicule et des roues de droite sont respectivement notées par *l*, *c et r* à l'instant *t-1* et par *l'*, *c' et r'* à l'instant *t*; ΔD_l, ΔD_c et ΔD_r sont les distances parcourues de l'instant *t-1* à l'instant *t* par les roues de gauche, le point de référence du véhicule et les roues de droite. Les mesures ΔD, C_R, *R et b* sont respectivement la longueur de la corde de l'arc de cercle ΔD_c, le centre instantané de rotation, le rayon instantané de courbure (rayon de giration). On a les relations suivantes :

$$\Delta D_l = (R - b/2)\Delta\theta_i \tag{3-3-1}$$

$$\Delta D_r = (R + b/2)\Delta\theta_i \tag{3-3-2}$$

$$\Delta D_c = (\Delta D_l + \Delta D_r)/2 \tag{3-3-2}$$

$$\Delta\theta = (\Delta D_r - \Delta D_l)/b \tag{3-3-3}$$

En supposant le mouvement sur un plan (position 2D) horizontal, les déplacements élémentaires ΔX et ΔY exprimés en fonction de ΔD et $\Delta\theta$ dans un repère lié à la position du véhicule, P_t, à l'instant t sont donnés par :

$$\Delta X = \Delta D\cos(\Delta\theta/2) \tag{3-3-4}$$

$$\Delta Y = \Delta D\sin(\Delta\theta/2) \tag{3-3-5}$$

Remarquons cependant que l'odométrie fournit plutôt la mesure de la longueur ΔD_c de l'arc de cercle parcouru. Il est donc nécessaire d'exprimer la translation ΔD en fonction de ΔD_c :

$$\frac{\Delta D}{\Delta D_c} = \frac{2R\sin(\Delta\theta/2)}{R(\Delta\theta)} = \frac{\sin(\Delta\theta/2)}{(\Delta\theta/2)}$$

Ainsi : $$\Delta D = \frac{\sin(\Delta\theta/2)}{(\Delta\theta/2)}\Delta D_c \qquad (3\text{-}3\text{-}6)$$

Alors si $\Delta\theta$ (ou Δt) tend vers zéro, on a $\Delta D = \Delta D_c$. Supposons maintenant que la pose du véhicule à l'instant *t-1* est $P_{t-1}=(X_{t-1}, Y_{t-1}, \theta_{t-1})$, alors la pose du véhicule à l'instant *t*, $P_t=(X_t, Y_t, \theta_t)$, exprimée dans le repère global, s'obtient par cumul du déplacement élémentaire avec la pose du véhicule à l'instant *t-1* (voir WANG, MING C., 1988 et MALLET, A., 2001 pour plus de détail) :

$$X_t = X_{t-1} + \Delta D_t \cos(\theta_{t-1} + \Delta\theta_t/2) \qquad (3\text{-}3\text{-}7)$$

$$Y_t = Y_{t-1} + \Delta D_t \sin(\theta_{t-1} + \Delta\theta_t/2) \qquad (3\text{-}3\text{-}8)$$

$$\theta_t = \theta_{t-1} + \Delta\theta_t/2 \qquad (3\text{-}3\text{-}9)$$

3.3.2.2 Synthèse du positionnement par odométrie

Le système odométrique permet d'estimer à chaque instant la pose du véhicule et est moins coûteux comme capteur de positionnement (EVERETT, 1995), ce qui fait de lui le capteur le plus utilisé en robotique mobile, dès que la structure de locomotion est à roues. Cependant, un système odométrique pur, c'est-à-dire sans hybridation avec un autre capteur de localisation, est peu utile en navigation autonome dans un environnement naturel, d'une part, parce que le véhicule évolue dans les trois dimensions de l'espace, ce qui nécessite au moins un inclinomètre pour mesurer les angles de tangage et roulis du véhicule et, d'autre part, parce que les principaux problèmes liés à l'odométrie sont bien plus fréquents et importants en environnement naturel.

3.3.3 Intégration Inclinométrie-Gyroscopie-Odométrie

3.3.3.1 Formulation du problème

Le positionnement par odométrie est caractérisé par les équations (3-3-7) à (3-3-9), qui sont obtenues sous l'hypothèse que le véhicule navigue sur un plan et que ses roues roulent sans glisser. Ceci n'est pas nécessairement vrai en environnement naturel (cf. §3.3.2.2) et encore moins pour la plate-forme ***ATRV-2*** utilisée dans ce travail, qui est un véhicule différentiel, c'est à dire un véhicule qui glisse pour tourner. D'où la nécessité de considérer un capteur capable de mesurer l'orientation du véhicule indépendamment des glissements de roues ainsi qu'un capteur qui mesure les angles de tangage et roulis du véhicule.

3.3.3.2 Solution proposée

Pour pallier aux problèmes formulés ci-dessus, nous proposons l'intégration de l'odométrie avec la plate-forme clino-gyro (cf. §3.2.4), qui est un "capteur " d'orientation indépendant des glissements des roues. Cette intégration, appelée ***clino-gyro-odométrie***, consiste à substituer l'élément infinitésimal $\Delta\theta_t$ provenant de l'odométrie par Ω_{cg} du clino-gyro ou par une fusion obtenue par filtrage de Kalman $k\,\Omega_{cg}+(1-k)\Delta\theta_i$ dans les équations (3-3-7) à (3-3-9), où k est un gain à déterminer expérimentalement. Vu la détérioration rapide de l'estimation de $\Delta\theta_t$ pour le véhicule ***ATRV-2***, nous avons opté pour la première option, c'est-à-dire une substitution de $\Delta\theta_t$ par Ω_{cg} dans (3-3-7), (3-3-8) et (3-3-9).

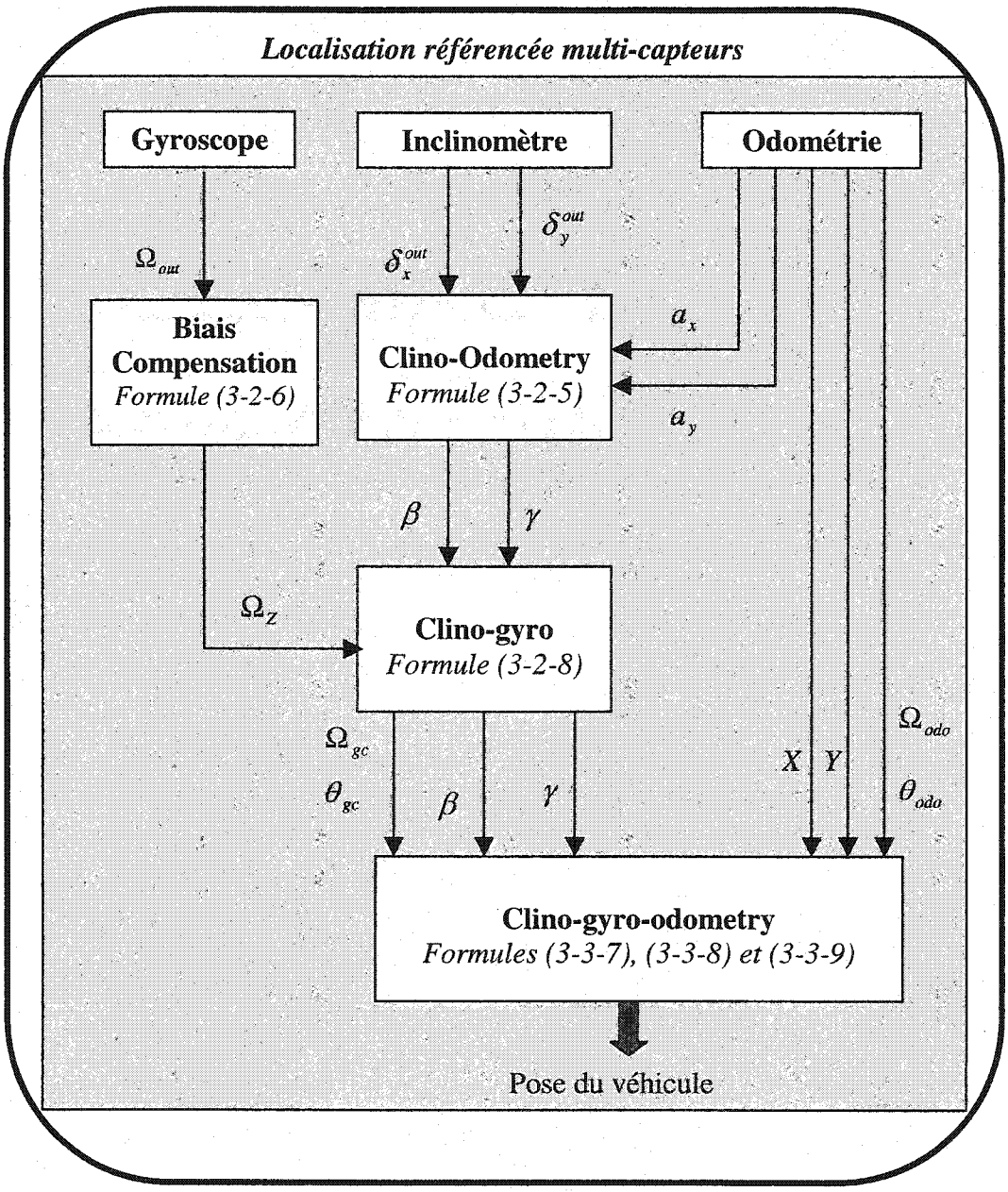


Figure 3.10 Diagramme de blocs de la localisation référencée multi-capteurs

Les performances de cette intégration ont été évaluées au laboratoire (NSASI et al, 1999 et POLOTSKI et al, 2000) et dans une mine souterraine. La figure 3.10 schématise la

technique proposée pour la localisation référencée multi-capteurs. La figure 3.11 illustre l'estimation du chemin aller-retour parcouru par le véhicule dans la mine en utilisant l'odométrie pure et l'intégration clino-gyro-odométrie. Et la figure 3.12 illustre l'influence de la localisation du véhicule sur la reconstruction des cartes de l'environnement.

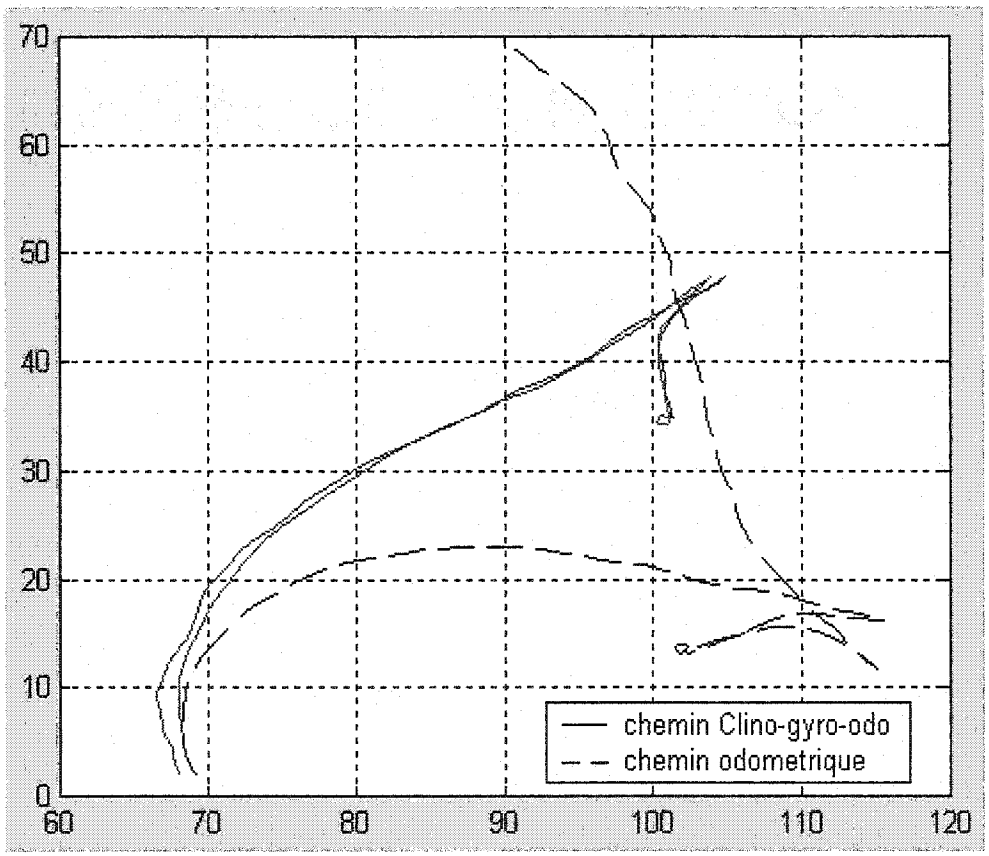


Figure 3.11 Chemin : odométrie *vs.* clino-gyro-odométrie

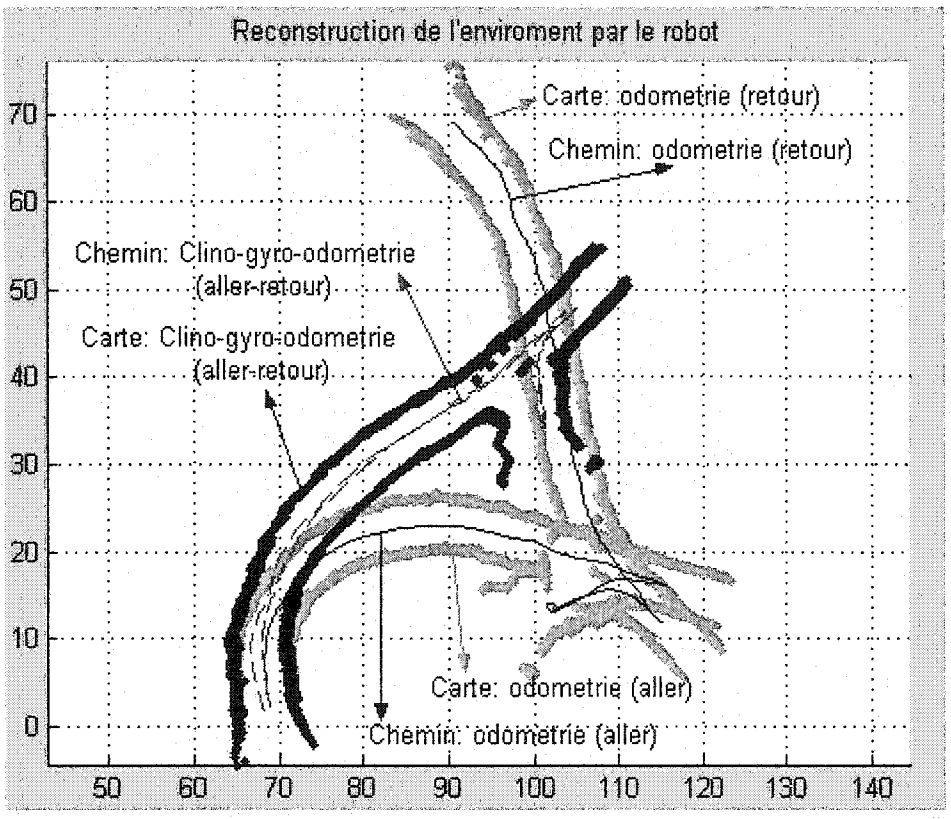


Figure 3.12 Carte : odométrie *vs.* clino-gyro-odométrie

3.3.4 Synthèse de la technique de la localisation proposée

La localisation référencée multi-capteurs proposée permet d'estimer la position et l'orientation du véhicule avec une précision suffisante pour la navigation autonome. Cependant pour des grandes distances de navigation, les corrections de la pose par des techniques absolues sont requises car la technique proposée, quoique performante, reste une localisation relative[2], c'est-à-dire que l'estimation de la pose s'effectue par l'intégration de mesures dans le temps. Cette estimation de la pose dérive d'autant plus

que le véhicule est lent. Parmi les techniques absolues utilisées pour corriger la localisation relative, on distingue celles qui utilisent: le système de positionnement global (SUKKARIEH et al, (1999) ; TOSHIHIRO et al, (1999)), des repères artificiels (LAPIERRE, (1998) ; Q-NAVIGATOR), des repères naturels (BERANGER, 1996; BULATA, (1996) ; BETGE-BREZETZ, (1997)), et des modèles numériques ou cartes de l'environnement (COX, (1991) ; GONZALEZ, (1992) ; LUCILO, (1998)).

Dans cette thèse (au chap. 5), nous développerons les deux dernières techniques, les repères naturels (cf. 3.5) et la carte de l'environnement construite par le véhicule au préalable (cf. chap. 5), pour corriger la dérive des estimées de la position et de l'orientation du véhicule. La correction proposée dans cette thèse consiste à détecter les repères naturels (les baies et les intersections) afin de localiser le véhicule de façon topologique sur la carte de référence et, ensuite, à mettre en correspondance la carte de référence avec un modèle local construit à partir des données courantes provenant des capteurs. Cependant, entre deux corrections consécutives, il est indispensable de concevoir des algorithmes robustes pouvant supporter les erreurs sur la position et l'orientation du véhicule, comme par exemple le guidage à l'aide de capteurs externes, le suivi de paroi (*cf.* Chap. 4) plutôt que le suivi de chemin, la navigation globale basée sur la distance et les repères naturels (*cf.* Chap. 6) plutôt que la navigation globale basée sur la position, etc.

---

[2] C'est une localisation qui intègre dans le temps les données (des vitesses ou des déplacements élémentaires) à haute fréquence, sans les mémoriser.

3.4 Détection d'obstacles

Un véhicule autonome exécute généralement ses tâches dans des environnements complexes. Dans ces environnements, la présence d'humains, d'autres véhicules ou d'objets fixes est inévitable. Par conséquent, il est indispensable qu'un tel véhicule soit doté de capacités de détecter des obstacles. Ceci augmentera la sécurité du véhicule autonome évoluant dans un environnement humain (industries manufacturières, building, etc.) ou aussi dans un environnement hostile (mine, grotte, centrale nucléaire, etc.).

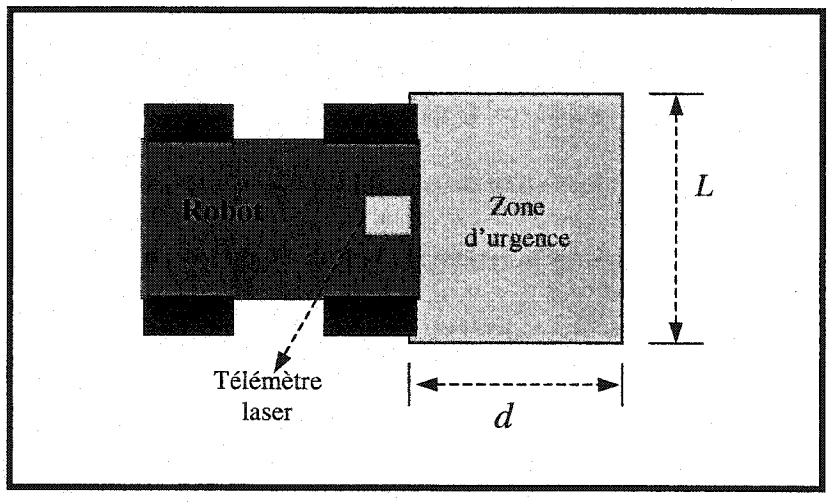


Figure 3.13 Configuration de la détection d'obstacles

3.4.1 Objectif de la détection d'obstacle

Un module de détection d'obstacles doit permettre au véhicule autonome, à l'aide des capteurs, de déterminer s'il y a lieu présence d'objets fixes ou mobiles pouvant entraîner la collision du véhicule dans une zone spécifique (zone d'urgence dans notre cas) contenant la trajectoire du véhicule.

Ainsi, ce module doit pouvoir détecter les obstacles à temps et identifier ceux qui sont à l'intérieur de sa zone d'urgence. La figure 3.13 illustre le véhicule et la zone d'urgence qui doit être libre d'objets à tout instant.

3.4.2 Algorithme de détection d'obstacle

Notre algorithme de détection d'obstacles est illustré par la figure 3.14. Il est basé sur le traitement et l'analyse des données fournies par un télémètre laser et consiste à :

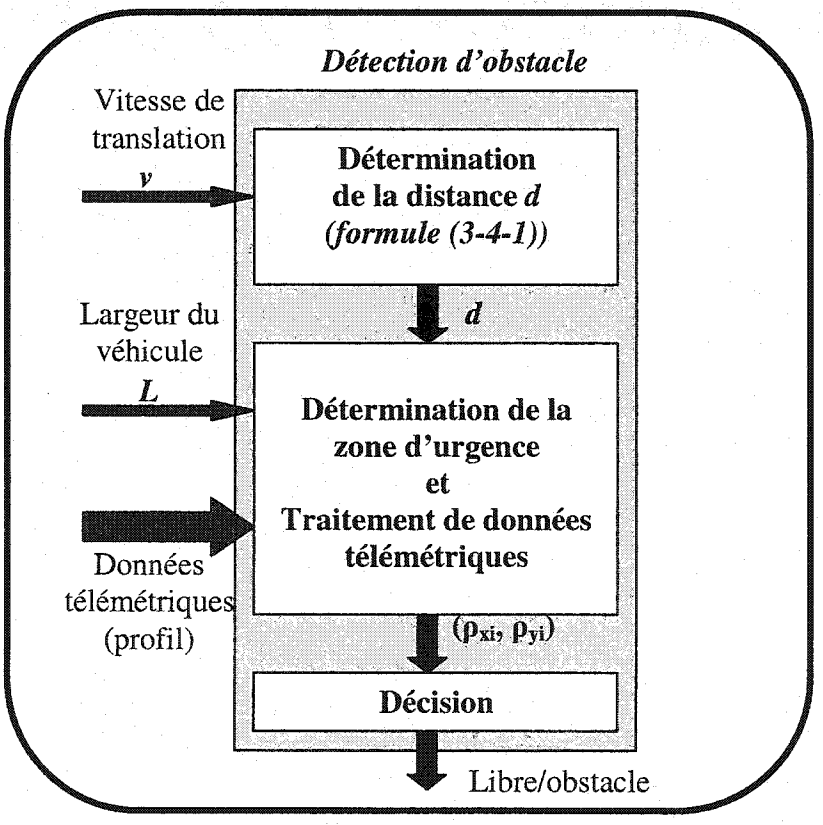


Figure 3.14 Organisation du module de détection d'obstacle

- Déterminer la distance minimale, ***d***, nécessaire pour faire un arrêt complet et sécuritaire du véhicule

$$d = k_1 + k_2 v \tag{3-4-1}$$

où k_1 et k_2 sont des constantes satisfaisant la cinématique du véhicule et déterminées expérimentalement ($k_1 = 0.5$ mètres et $k_2 = 0.2$ seconde).

- Déterminer la *zone d'urgence* (figure 3.13) à partir de la distance ***d*** et la largeur majorée, ***L***, du véhicule. La zone d'urgence est définie dans le repère local du télémètre laser et est donc fixe par rapport au véhicule et au télémètre laser.

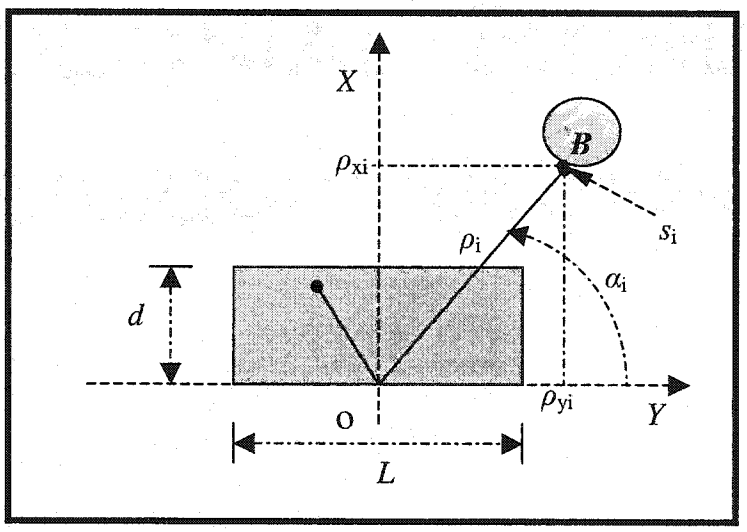


Figure 3.15 Zone d'urgence

- Traiter les données télémétriques. Soient ***B*** un objet dans l'environnement du véhicule et le couple $s_i = (\rho_i, \alpha_i)$ un profil du télémètre laser, où ρ_i est la distance entre ***B*** et **O** (centre de repère du télémètre laser) mesurée par le télémètre laser et α_i est la direction correspondante (*cf.* Figure 3.15). Le traitement consiste, pour tout s_i (i allant de 0 à 180 dans notre cas), à calculer $\rho_{xi} = \rho_i \sin\alpha_i$ et $\rho_{yi} = \rho_i \cos\alpha_i$.

- Déterminer si la zone d'urgence est libre d'obstacles. Si de façon répétitive, pour tout s_i, il existe au moins un couple (ρ_{xi}, ρ_{yi}) tel que $\rho_{xi} \le d$ et $|\rho_{yi}| \le L/2$ alors la zone d'urgence contient au moins un obstacle.

3.4.3 Expériences et discussion

Dans ce travail, nous n'étudions pas la possibilité d'éviter les obstacles détectés. Nous supposons en effet que les galeries sont généralement étroites ce qui ne permet pas au véhicule de contourner les obstacles. En cas d'obstacle dans la zone d'urgence, le véhicule s'arrête immédiatement et continuera sa mission dès que la zone d'urgence sera libérée. Les figures 3.16~20 illustrent deux véhicules qui se partagent une intersection (GRPR, 2000). Dans ces figures, d'une part le véhicule ***LHD*** est programmé pour exécuter un chemin qui va de la position **C** à la position **D** et revenir à la position **C**, d'autre part le véhicule ***ATRV-2*** se déplace de la position **A** à la position **B** via la position **D**. La figure 3.16, illustre ***LHD*** et ***ATRV-2*** dans leur position initiale **C** et **A** respectivement.

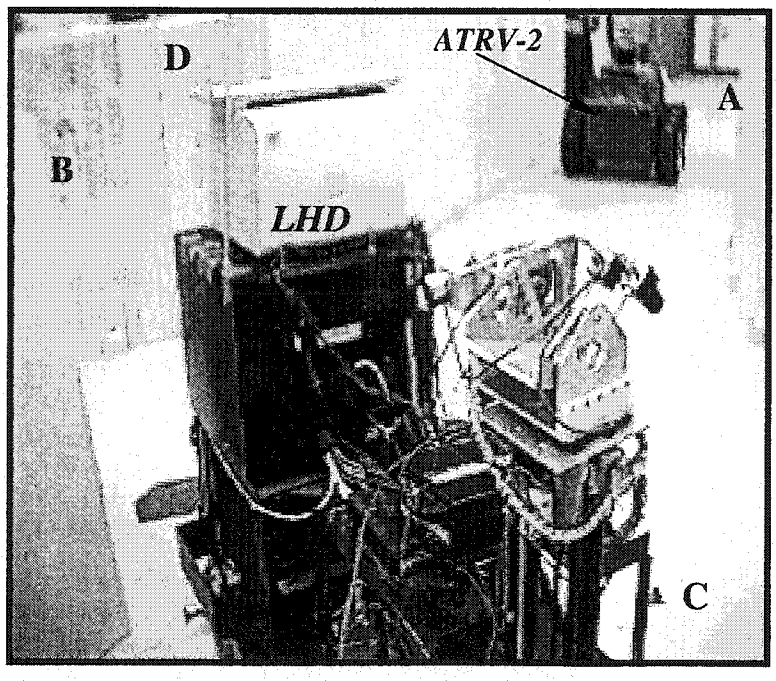


Figure 3.16 LHD en C et ATRV-2 en A

Dans la figure 3.17, ***LHD*** et ***ATRV-2*** quittent leur position initiale **C** et **A** en direction de la position **D** (**D** étant le point commun de leur trajectoire respective).

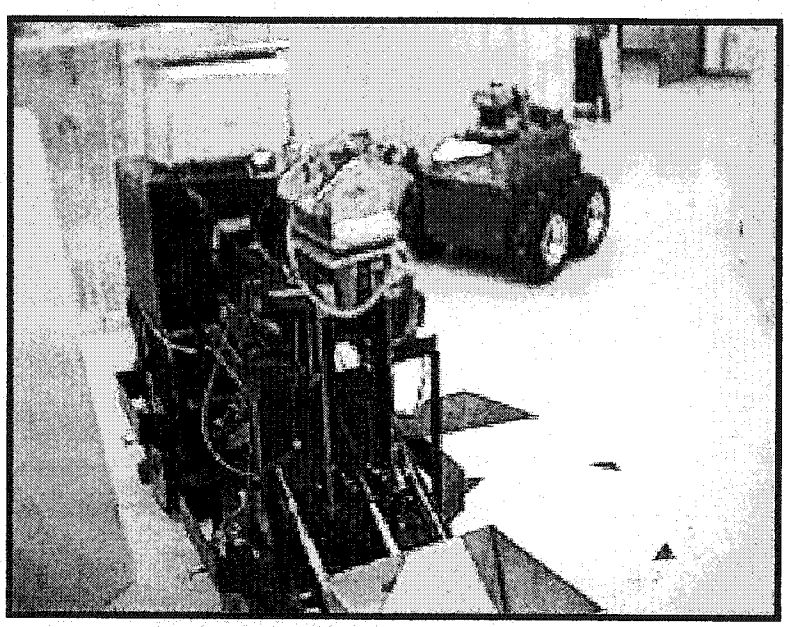


Figure 3.17 LHD et ATRV-2 quittent C et A respectivement

Dans la figure 3.18, ***ATRV-2*** détecte l'obstacle (***LHD***) à **D** et s'arrête immédiatement sans collision.

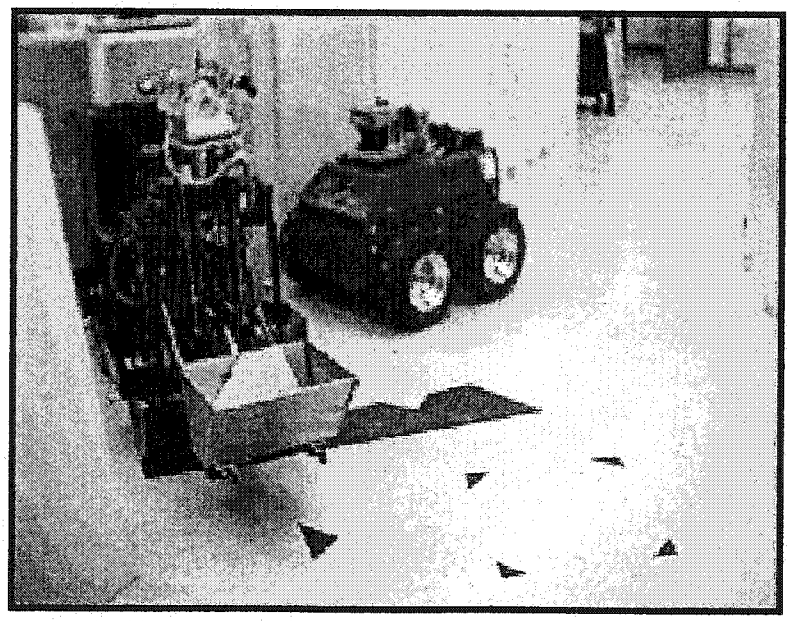


Figure 3.18 ***ATRV-2*** détection l'obstacle (LHD)

Dans la figure 3.19 ***LDH*** quitte **D** pour retourner à **C** et la zone d'urgence de ***ATRV-2*** étant libérée, celui poursuit son chemin jusqu'à **B**.

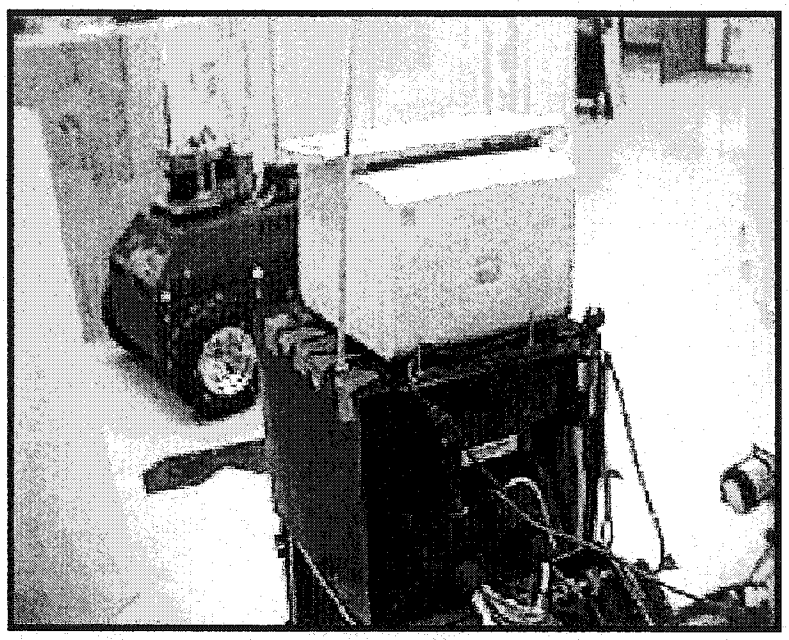


Figure 3.19 ***ATRV-2*** poursuit sa mission après la disparition de l'obstacle

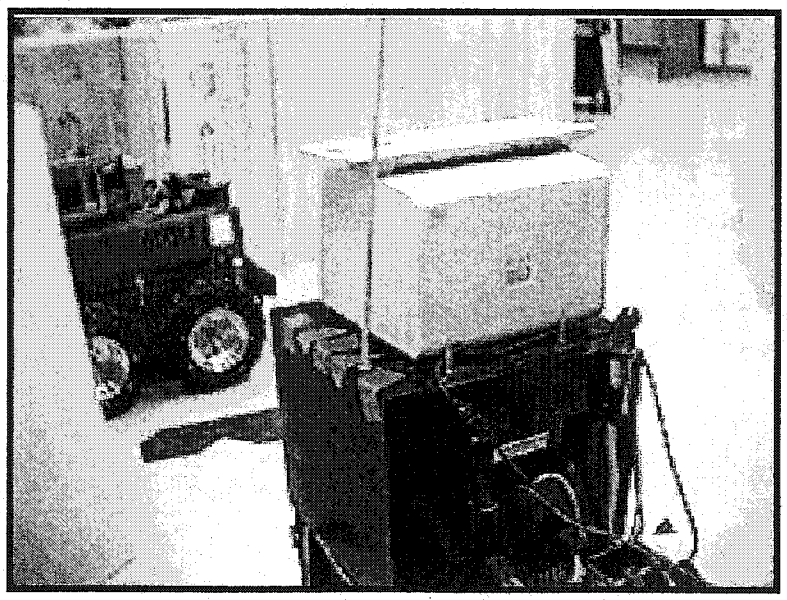


Figure 3.20 ***ATRV-2*** atteint sa position finale **B**

3.5 Détection de repères naturels

3.5.1 Introduction

Un véhicule autonome doit être capable trouver dans son environnement des points particuliers de référence pour se localiser. Ces points sont désignés sous le terme de *repères* dans cette thèse. Un repère est un objet ou une caractéristique de l'environnement facilement reconnaissable par le véhicule à l'aide de données sensorielles. En général, un repère doit avoir une position fixe et connue a priori, par rapport à laquelle le véhicule peut se localiser et doit posséder les propriétés[1] suivantes (BETGE-BREZETZ, 1996) :

- *Distinction* : un repère doit être facile à distinguer de ce qui est autour de lui dans l'environnement.
- *Précision* : on doit pouvoir extraire d'un repère des attributs précis pour réduire l'incertitude sur la position du véhicule.

Dans la littérature on distingue deux types de repères : *naturels* et *artificiels*. Les repères naturels sont des objets ou des caractéristiques qui existent déjà dans l'environnement et ont une fonction autre que la navigation du véhicule (par exemple les portes et les coins des murs dans un bâtiment), alors que les repères artificiels sont des objets spécialement conçus et placés dans l'environnement pour des fins de navigation du véhicule (marques de peinture au sol, bandes réflectives, bandes magnétiques, etc.).

[1] Remarquons qu'il s'agit des propriétés locales.

Les repères artificiels sont facilement détectables par le véhicule, puisqu'ils ont été conçus à cette fin, cependant leur installation et leur maintenance sont généralement coûteuses et limitent l'autonomie du véhicule à l'environnement où ils sont installés, ce qui les rend inutilisables dans un environnent dynamique et inconnu. En ce qui concerne les repères naturels, les problèmes majeurs sont leur détection ou extraction à partir de données sensorielles et leur corrélation pour la localisation et la reconnaissance de lieux déjà visités. Ainsi, la sélection d'un repère naturel est d'une importance capitale. Elle détermine la complexité de la description, de la détection et de la corrélation des caractéristiques du repère. Par contre, les repères naturels offrent une grande flexibilité de déplacement au véhicule et ne nécessitent aucune modification de l'environnement pour la navigation autonome. Enfin, les repères tant naturels qu'artificiels supposent que la position courante du véhicule est connue approximativement. Cela permet au véhicule de chercher des repères dans une zone limitée.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés aux repères naturels. En segmentant un réseau de galeries en éléments[2] topologiques, nous pouvons distinguer trois catégories : les galeries, les baies et les intersections de galeries. Nous avons choisi les intersections des galeries et les baies comme repères naturels. Ce choix est motivé par le fait qu'ils sont les éléments topologiques les plus significatifs et les plus facilement reconnaissables dans un réseau. Notre problème revient donc à :

[2] Nous appelons élément topologique une région du réseau de galeries qui est uniforme du point de vue de la tâche de navigation pour le véhicule.

- détecter les intersections et les baies (les repères naturels) à partir des mesures télémétriques.
- construire des représentations locales des environnements contenant les intersections et les baies.
- reconnaître éventuellement par mise en correspondance des représentations locales, les intersections et les baies par lesquelles le véhicule est déjà passé (peut-être en utilisant un autre chemin).

Dans ce chapitre, nous allons présenter une approche de détection des baies et des intersections à partir de mesures télémétriques dans un environnement non-structuré. Nous montrons en particulier comment un véhicule pourra savoir s'il débouche dans une intersection ou dans une baie ou encore s'il s'engage dans une galerie. Les problèmes liés à la reconnaissance de repères naturels (intersection et baie) sont traités au chapitre 5.

3.5.2 Définition d'éléments topologiques

Rappelons qu'un réseau de galeries (une mine souterraine, par exemple) est un environnement constitué d'une interconnexion de plusieurs galeries (voir figure 3.21). C'est un environnement décomposable topologiquement en galeries, baies et intersections de galeries. La segmentation d'un réseau de galeries en des éléments topologiques permet de construire un graphe de sa topologie (ou de sa connectivité). Dans ce graphe, les galeries correspondent aux arcs du graphe et les intersections et les baies correspondent aux nœuds du graphe. Ci-dessous, nous proposons une définition, dans le contexte de

notre travail, pour chacun de ces éléments topologiques. Le détecteur de repères naturels proposé dans cette thèse doit être capable d'analyser en continu la structure locale captée par les télémètres laser (les profils oscillateur et normal à la trajectoire) du véhicule, afin de reconnaître lorsque le véhicule débouche dans une intersection ou dans une baie ou lorsqu'il s'engage dans une nouvelle galerie.

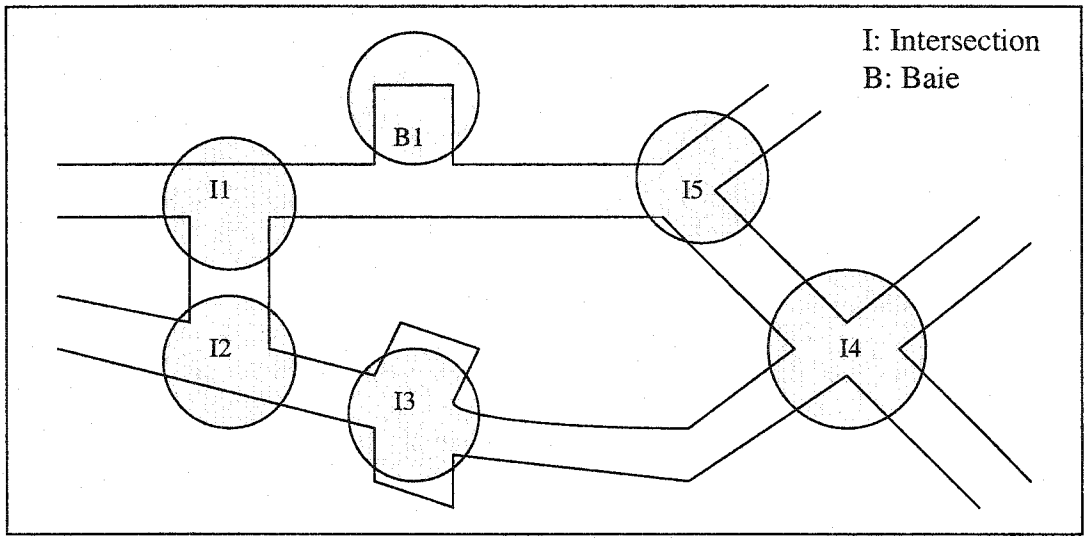


Figure 3.21 Exemple d'un réseau de galeries

3.5.2.1 Définition d'une galerie

Une galerie est définie comme un cylindre généralisé d'axe droit ou courbe comme illustré à la figure 3.22. Dans les environnements considérés, les parois des galeries ne sont pas planes. La section réelle des galeries varie le long de l'axe.

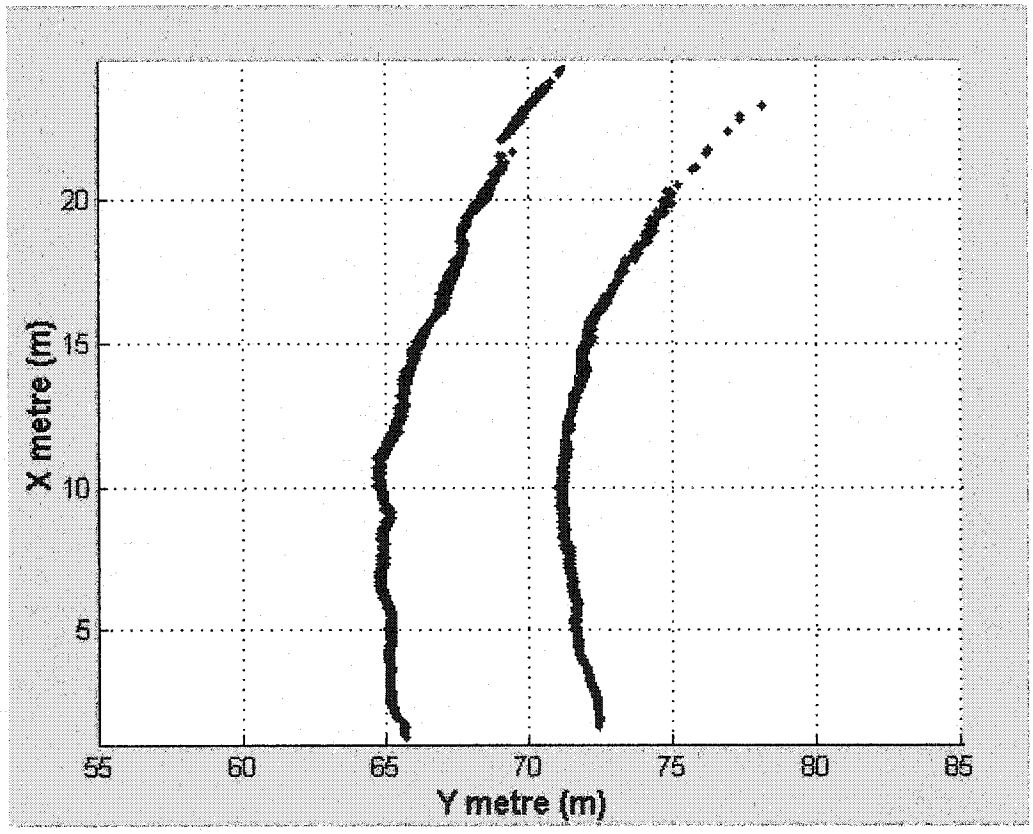


Figure 3.22 Forme 2D d'une galerie

3.5.2.2 Définition d'une baie

Les baies sont des cavités dans les parois de galeries comme illustré dans la figure 3.21 (sous la marque B1) et les figures 3.23 et 3.24.b

En observant les données télémétriques (voir figure 3.24.a), une baie présente une discontinuité (variation brusque) en terme de distances acquises par le télémètre laser sur plan osculateur de sa trajectoire. Mais si on considère les distances entre les points des profils télémétriques, alors trouvera à deux discontinuités. Par exemple la figure 3.24.a illustre les mesures télémétriques d'une baie à droite et la figure 3.24.b illustre la baie correspondante.

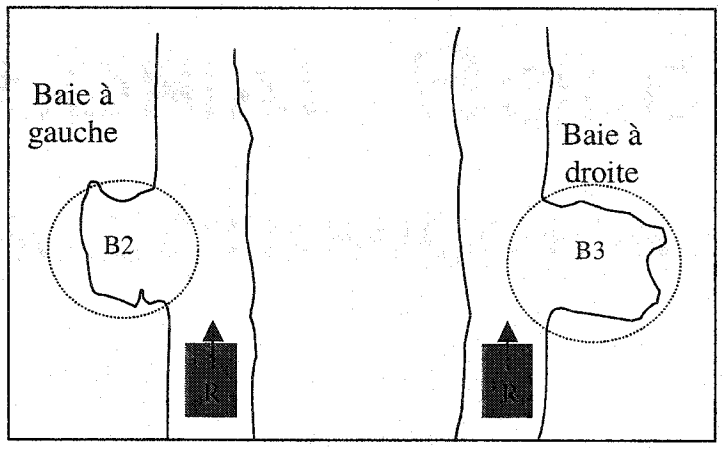


Figure 3.23 Forme générale d'une baie en 2D

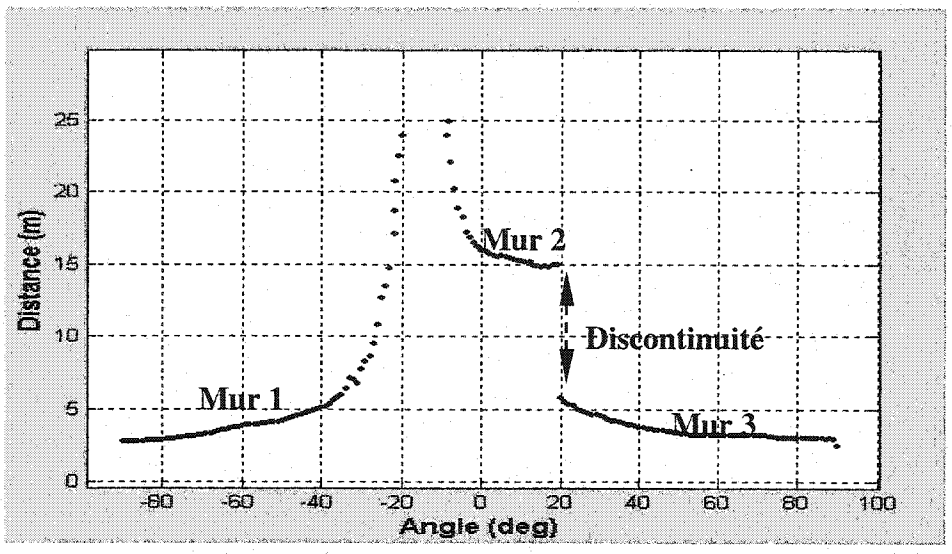


Figure 3.24.a Profil télémétrique d'une baie

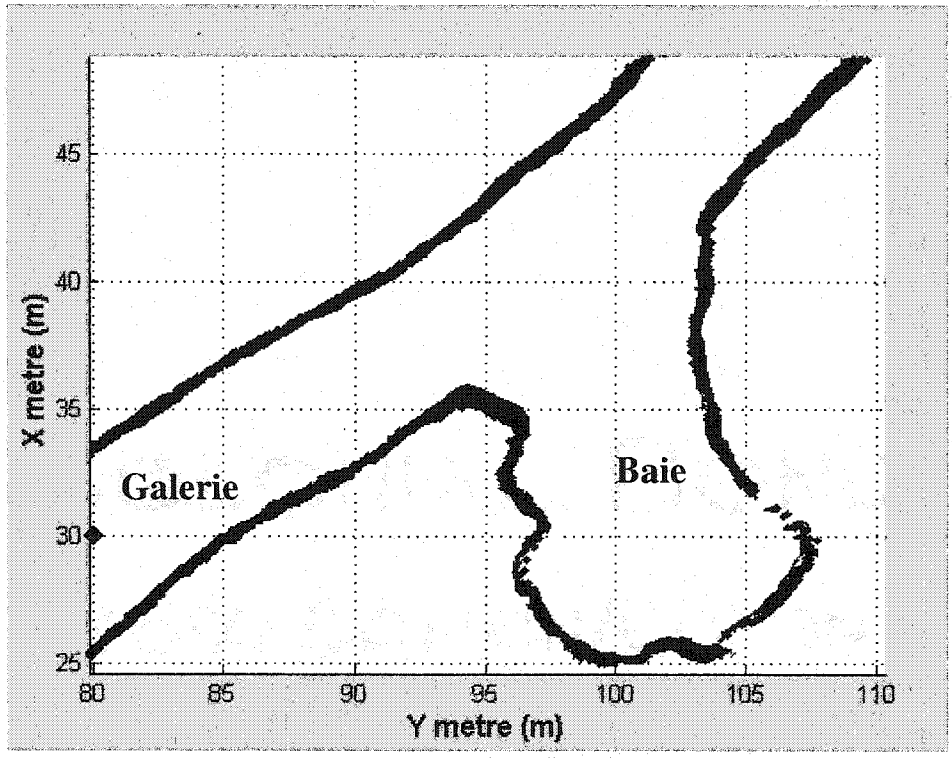


Figure 3.24.b Reconstruction d'une Baie

3.5.2.3 Définition d'une intersection

Une intersection est le lieu de rencontre de trois galeries ou plus et par conséquent, possède au moins trois parois. Nous appellerons *degré* d'une intersection le nombre de galeries qui se rencontrent à cette intersection.

La figure 3.25 illustre des profils télémétriques d'intersections. De cette figure on peut affirmer qu'une intersection possède au moins deux discontinuités en terme de distances acquises par le télémètre laser sur plan osculateur de la trajectoire du véhicule. La figure 3.26 illustre la reconstruction d'intersections correspondantes aux données télémétriques à la figure 3.25.

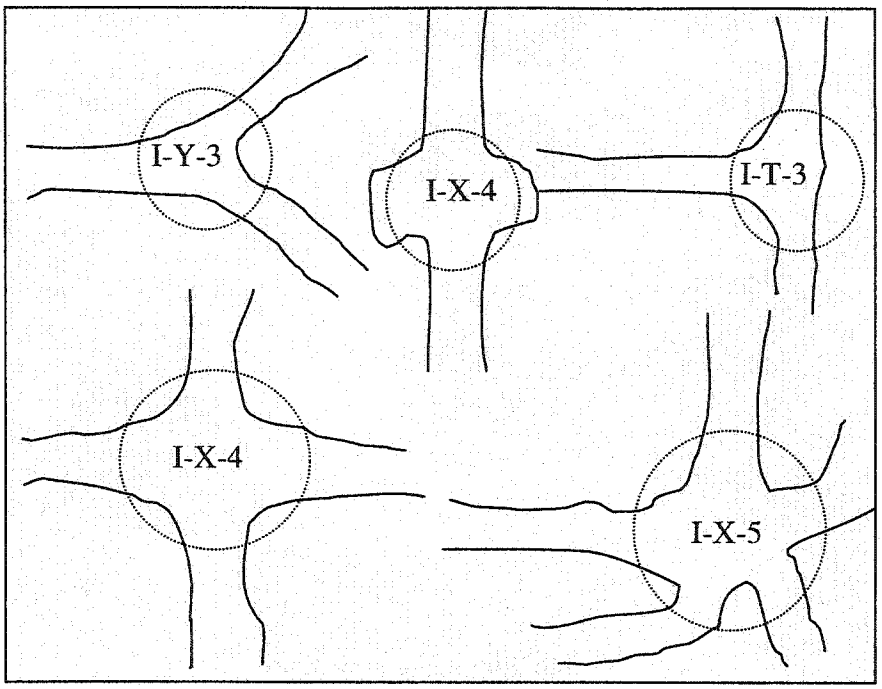


Figure 3.25 Forme d'une intersection en 2D

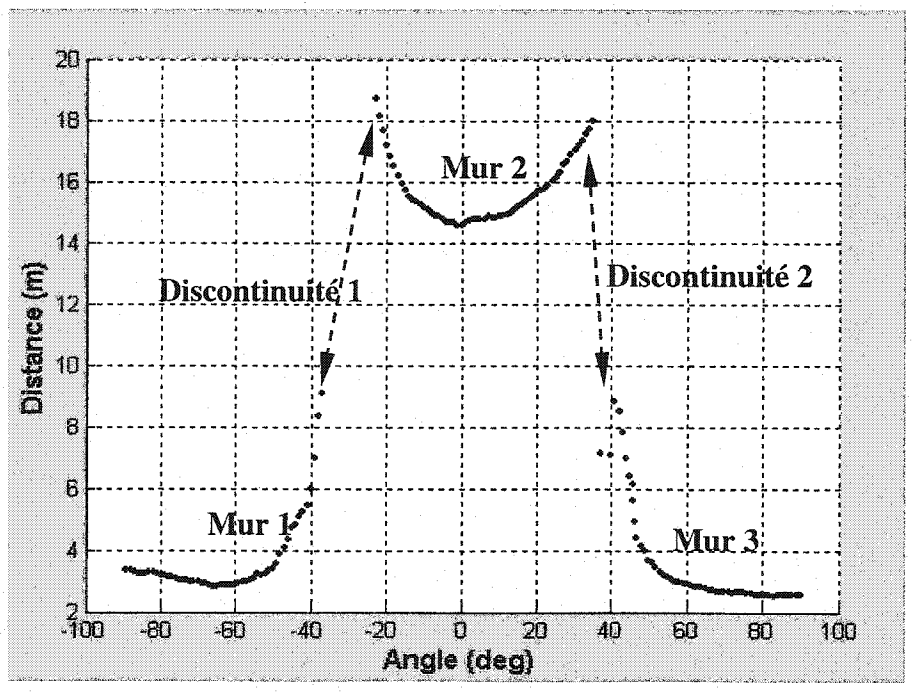


Figure 3.25.a Intersection en terme de distance (" T " degré 3)

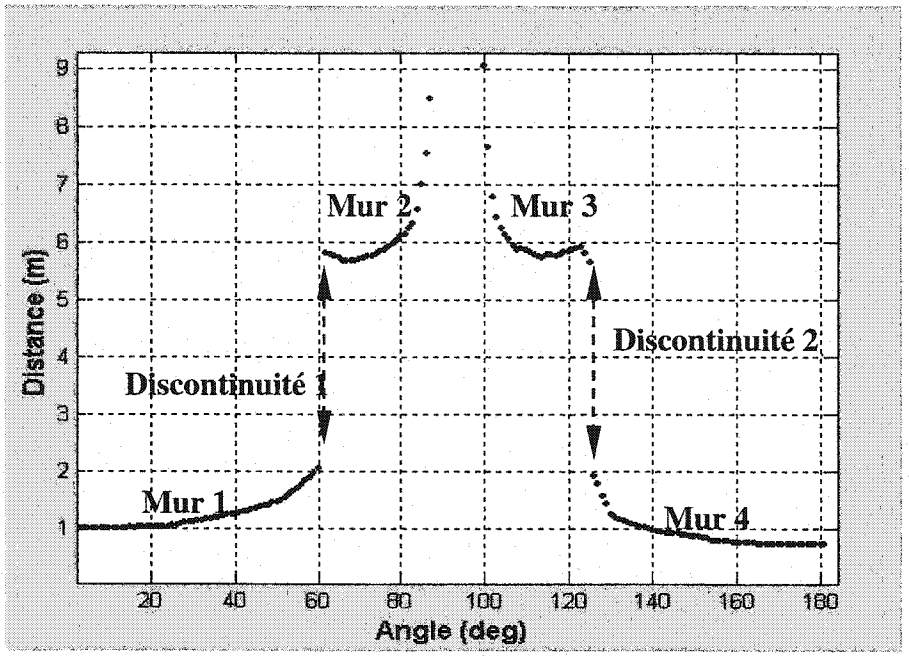


Figure 3.25.b Intersection en terme de distance (" X " degré 4)

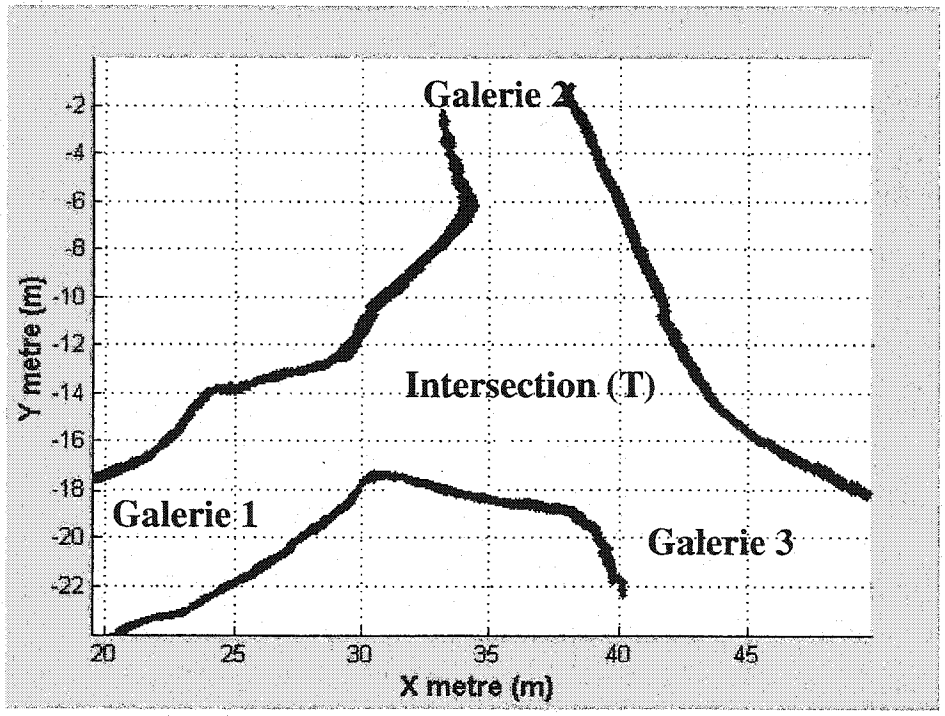


Figure 3.26.a Intersection en forme de " T "

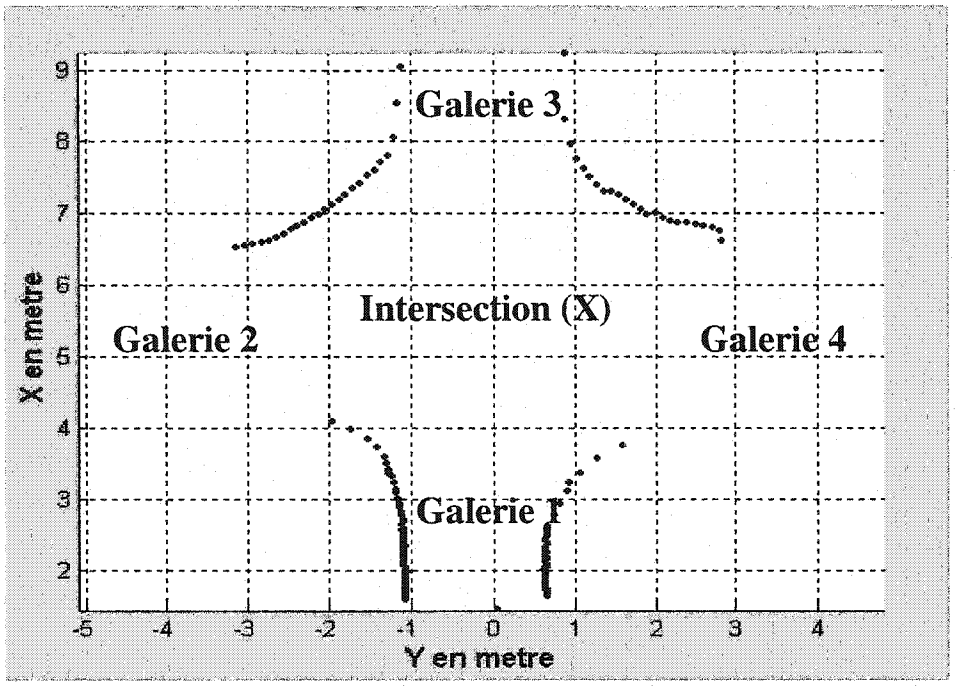


Figure 3.26.b Intersection en forme de " X "

Remarques :

- Pour une intersection de degré trois (en T et en Y), il y toujours une paroi commune à deux galeries consécutives. Ainsi, le véhicule peut suivre le mur commun pour passer d'une galerie à une autre. Ceci n'est pas possible pour une intersection de degré supérieur ou égal à quatre, (ayant au moins quatre parois comme intersection en X par exemple). La question suivant se pose alors : comment le véhicule passera t-il d'une galerie à une autre galerie non consécutive? La réponse à cette question est fournie au chapitre suivant.
- En se fiant à ces définitions, une baie peut être considérée comme une intersection de degré trois et vice versa (selon le champ de vue du télémètre laser).

3.5.3 Algorithmes de détection de repères naturels

Nous avons vu à la section 3.3 (*localisation référencée multi-capteurs)* comment un véhicule autonome est capable de se localiser en utilisant des capteurs internes, notamment le gyroscope, l'inclinomètre et l'odométrie. Nous verrons au chapitre 5 que l'erreur accumulée par cette approche de localisation peut être corrigée en effectuant une comparaison entre des primitives télémétriques perçues et un modèle de l'environnement connu a priori (carte de référence). Cependant, quand le véhicule a pour mission l'exploration et la construction de la carte d'un environnement étendu[3], les erreurs de localisation deviennent plus critiques. Le véhicule doit alors faire face au maintien d'une description interne cohérente de son environnement, faute de quoi la connaissance de sa position basée sur les coordonnées métriques et même sur la topologie de l'environnement ne sera pas correcte.

Une question que l'on doit se poser (BULATA, 1996) est alors: n'est-il pas plus prudent de connaître avec une bonne certitude la position du véhicule par rapport à un repère local utile pour sa tache courante, plutôt que par rapport à un repère global lointain? En faisant l'analogie avec le comportement humain, on se rend compte que les êtres humains ne se basent pas toujours sur un repère global pour bien accomplir leurs différentes tâches (le déplacement par exemple). À la place, ils se réfèrent par rapport à des repères locaux qui semblent intéressants suivant la nature et la durée de la mission exécutée.

---

[3] Un *environnement étendu* signifie que l'espace ne pourra pas être perçu en quelques acquisitions par les capteurs du véhicule quelle que soit la position initiale de celui-ci. Le véhicule devra pour cela parcourir de longues trajectoires.

Dans cette thèse, le véhicule se réfère à des repères locaux pour accomplir ses missions globales de navigation. Ces repères locaux sont appelés *repères naturels* puisque ce sont des structures inhérentes de l'environnement. Ci-dessous nous présentons notre algorithme de détection de ces repères naturels.

3.5.3.1 Détection des baies

Notre approche de détection des baies est illustrée à la figure 3.27. Elle est constituée de trois étapes qui s'appuient uniquement sur le traitement et l'analyse des mesures télémétriques sur l'environnement local (immédiat) du véhicule.

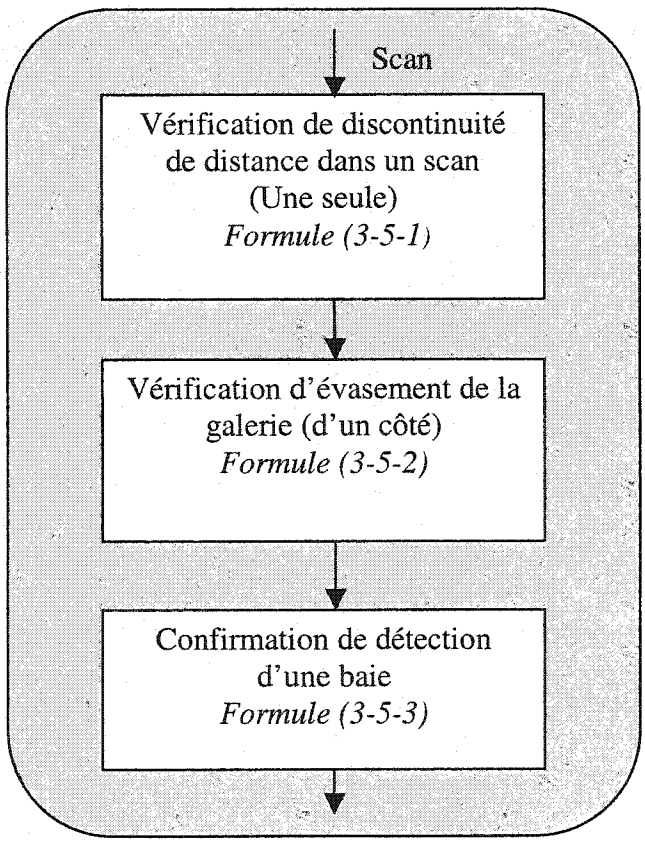


Figure 3.27 Diagramme de blocs de détection de baies

Nous cherchons à détecter (de façon continue) les évènements suivants dans les mesures télémétriques (scan) local lorsque le véhicule s'approche d'une baie (ceci sous-entend que le véhicule est dans une galerie):

- La discontinuité (à gauche ou à droite) en terme de distance captée par le télémètre dans l'environnement local du véhicule (cf. figure 3.28.a).

$$\exists!\ i \ \ tel\ que \quad \left|\rho_{i+1} - \rho_i\right| \geq \Delta\rho \tag{3-5-1}$$

où $\Delta\rho$ est la différence des distances admissible entre deux mesures télémétriques consécutives.

- L'évasement continu de la galerie (à gauche ou à droite) tel qu'illustré dans la figure 3.28.b); le robot surveille la variation des mesures W_a et W_b dans les données télémétriques jusqu'à ce que

$$W_b - W_a > \Delta W \tag{3-5-2}$$

où W_a , W_b et ΔW sont respectivement la largeur de la galerie à la position courante du véhicule, la largeur de la galerie devant le véhicule mesurée à la position courante et la différence de largeur admise le long d'une galerie.

- La confirmation d'une baie. Dans cette étape, le véhicule vérifie que la différence entre la profondeur de la discontinuité (W_c) et la largeur de la galerie à la position courante du véhicule est suffisamment grande par rapport à la différence de largeur

admise le long d'une galerie pour confirmer qu'il débouche dans une baie (à gauche ou à droite selon que la discontinuité est à gauche ou à droite du véhicule).

$$W_c - W_a >> \Delta W \tag{3-5-3}$$

Les figures 3.28.a~c illustrent les trois étapes de la détection d'une baie (à droite), alors que la figure 3.28.d illustre la fin de la baie.

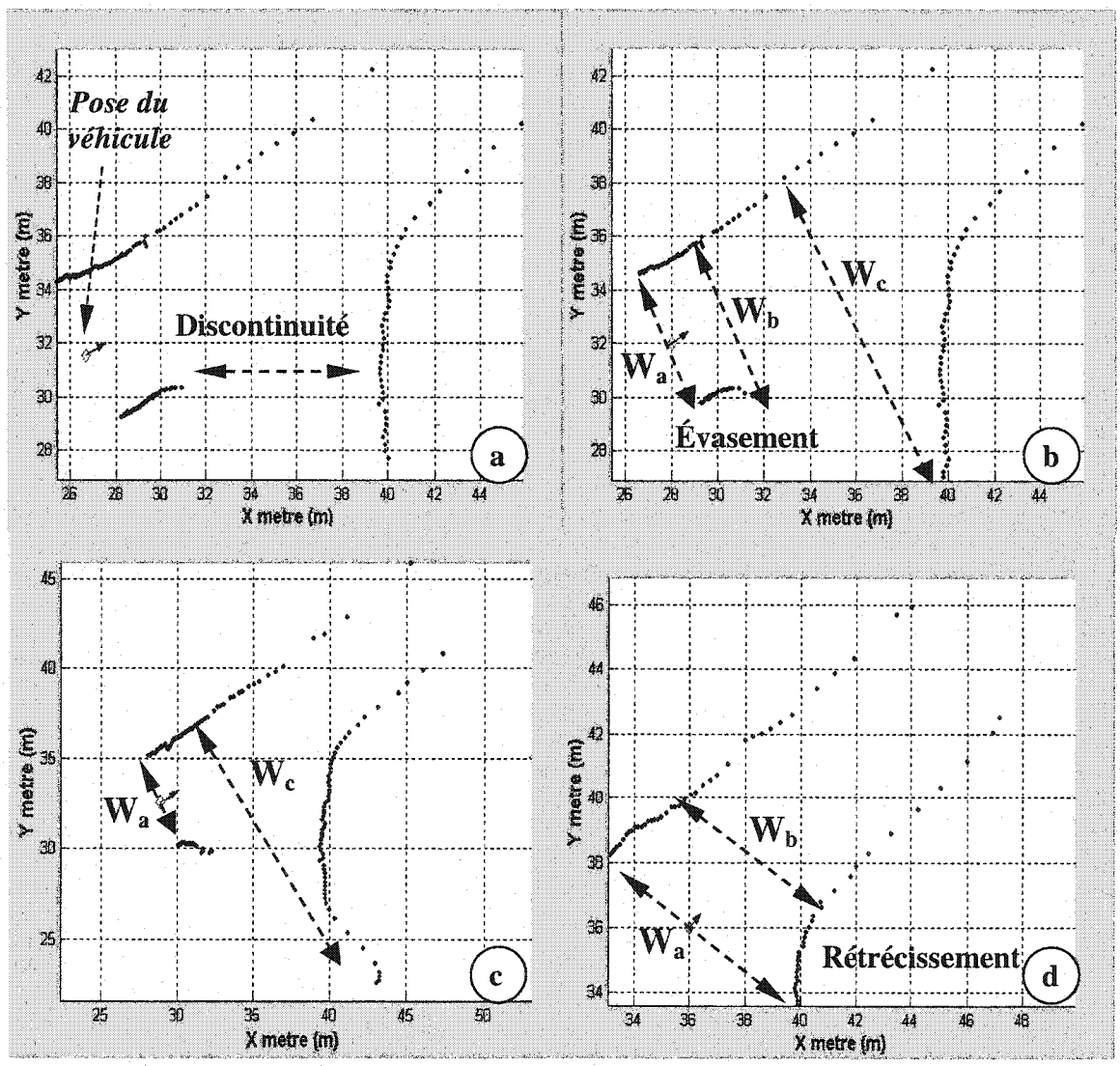


Figure 3.28 Détection de baie :(a) détection de discontinuité, (b) évasement de galerie, (c) confirmation de baie à droite et (d) détection de la sortie de baie

3.5.3.2 Détection d'intersection

Tout comme pour la détection des baies (§ 3.5.3.1), notre approche de détection des intersections s'appuie uniquement sur le traitement et l'analyse des mesures télémétriques sur l'environnement local du véhicule et se fait en trois étapes. La figure ci-dessous illustre cette approche. Elle consiste à détecter les observations suivantes dans les mesures télémétriques sur l'environnement local du véhicule :

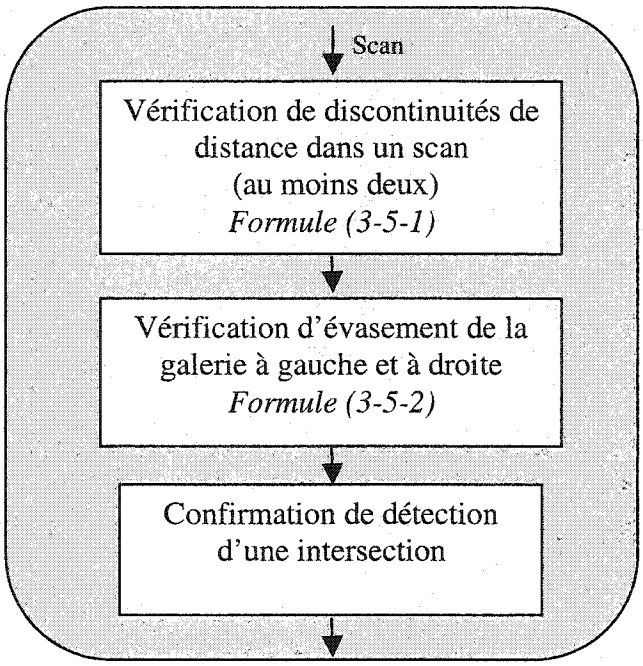


Figure 3.29 Diagramme de blocs de détection d'intersections

- Au moins deux discontinuités dans les distances mesurées par le télémètre dans l'environnement local du véhicule (voir formule (3-5-1), figures 3.30.a et 3.30.c).

  - L'évasement continu de la galerie (à gauche et/ou à droite) tel qu'illustré aux figures 3.30.b et 3.30.d. Le véhicule surveille l'évolution temporelle des mesures W_a et W_b dans les données télémétriques jusqu'à ce que la formule (3-5-2) soit satisfaite.

- La confirmation d'une intersection. Si les deux premières étapes sont satisfaites simultanément, le véhicule confirme la détection d'une intersection de degré égal au nombre de galeries constituant l'intersection.

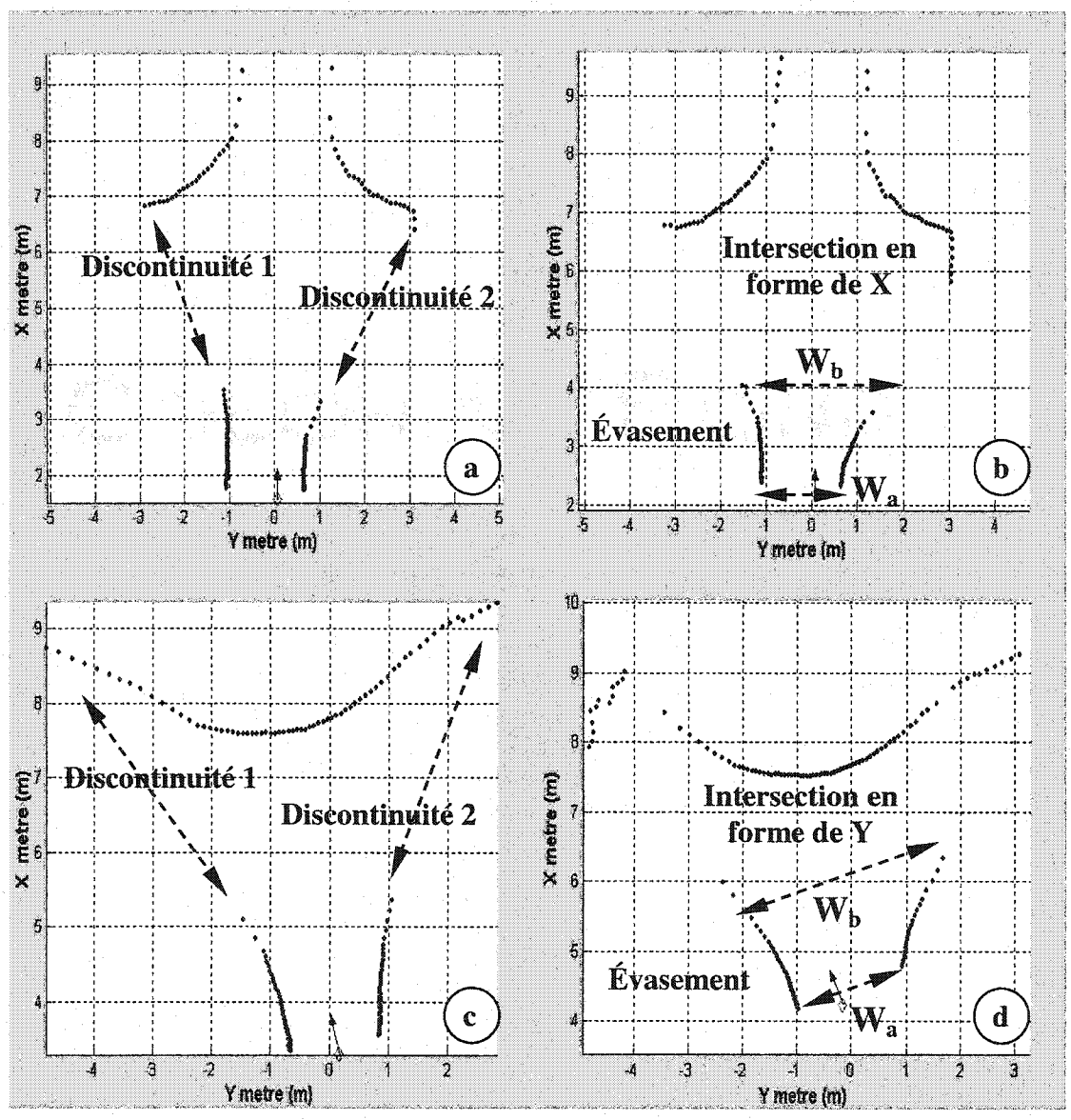


Figure 3.30 Détection d'intersection :(a) détection de discontinuités, (b) évasement de galerie et confirmation d'intersection en X, (c) détection de discontinuités et (d) évasement de galerie et confirmation d'intersection en Y.

3.5.3 Expérimentation et discussion

La détection de baies et d'intersections a été testée en laboratoire et dans une mine souterraine (Brunswick à Bathurst). Les expériences ont montré que le véhicule est capable de détecter de façon répétitive les baies et les intersections et de se localiser topologiquement dans son environnement seulement à l'aide des repères naturels (baies et intersections).

Les problèmes suivants ont toutefois été observés :

- la présence d'objets ou d'humains dans l'intersection (voir figure 3.31) peut entraîner une erreur sur le *degré d'intersection* (celui-ci étant déterminé sur la base des discontinuités des distances entre les points d'un profil télémétrique) ou même un échec à la détection d'intersection.
- la non-considération d'informations 3D de l'environnement dans l'algorithme de détection de repères naturels peut entraîner un échec dans certaines situations. Par exemple, lorsque le véhicule descend une pente, le sol (ou le terrain) devant lui peut être perçu comme une paroi frontale, ou encore, lorsque la baie ou une galerie de l'intersection commence par une pente (voir figure 3.32.a), la pente peut être perçue comme une paroi latérale. Dans chacun de deux cas, la mauvaise interprétation de la pente entraîne une erreur dans la détection des discontinuités et par conséquent un échec à la détection de baie ou d'intersection. Remarquons que ce problème concerne plus les véhicules de petite taille et est relative à l'emplacement du télémètre sur le véhicule et de son champ de vue.

Dans la figure 3-31, à cause de la présence d'objets, l'intersection de degré quatre est vue comme une intersection de degré six. Dans la figure 3.32.a, la pente (la partie encerclée) à l'entrée de la galerie de l'*intersection X* (voir figure 6.26) est perçue comme une paroi latérale, par conséquent l'*intersection X* n'est pas détectée. Alors que dans la figure 3.32.b, le sol devant le véhicule est perçu comme un mur frontal, ce qui peut causer une erreur dans la détection des discontinuités.

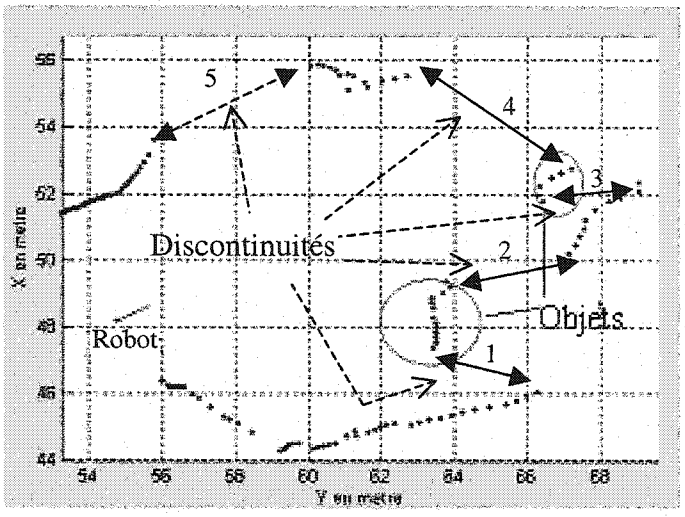


Figure 3.31 : Présence d'objets dans l'intersection

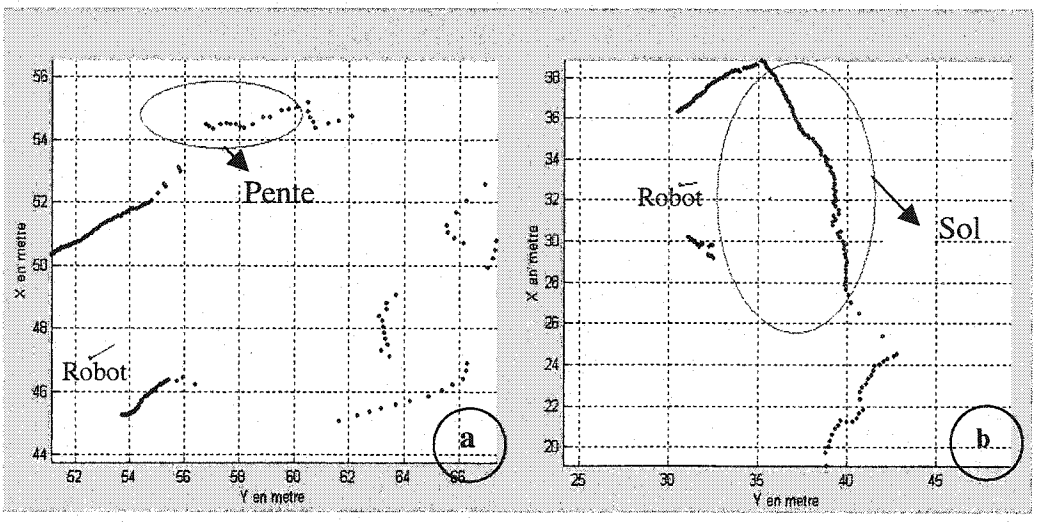


Figure 3.32. La pente perçue comme une paroi: a) frontale et b) latérale

Chapitre 4 : Contrôleur de mouvements

4.1 Introduction

Pour pouvoir naviguer dans un réseau de galeries, une plate-forme autonome doit pouvoir se localiser par rapport à son environnement, détecter et contourner les obstacles, planifier son chemin et se guider à l'aide de repères. Nous avons développé au chapitre précédent les stratégies et algorithmes d'intégration multi-capteurs, de localisation référencée multi-capteurs, de détection d'obstacles et de détection de repères naturels. Dans ce chapitre, nous abordons le problème du *contrôle de mouvements d'un véhicule autonome* dans le contexte de suivi de parois, de suivi de chemin et de guidage pour traverser des intersections.

4.2 Description du problème

En automatique (BOISSIER, (1993), ZOPPIS, (1997)), le problème du contrôle correspond à la définition de la commande à appliquer à un processus (système) pour obtenir un état qui satisfasse ou optimise des objectifs relatifs à son fonctionnement. Cette commande est une quantité numérique définie à partir d'un modèle du processus et de l'observation sur son état. Le problème de contrôle est résolu par formulation d'une *loi de commande f*. Celle-ci est définie comme une fonction de l'ensemble des observations

W, de l'ensemble des objectifs O et de l'ensemble des commandes admissibles[1] U. La loi de commande engendre une commande u appliquée au processus. Elle traduit les objectifs du système en un ensemble de commandes.

$$u = f(W, O, U) \tag{4-2-1}$$

Ainsi, le problème du contrôle peut être décomposé en quatre sous problèmes, à savoir : décision, adaptation, commande et observation.

4.2.1 Décision

Le problème de décision concerne les capacités d'un système à choisir dynamiquement ses objectifs en fonction de l'état de l'environnement, parmi l'ensemble des objectifs possibles du système (par exemple : suivre le paroi gauche/droit, l'axe central du corridor, suivre un chemin prédéfini, s'arrêter, tourner d'un certain angle, etc.). Sa résolution passe par la définition de la fonction d.

$$O(t+1) = d(W(t), O(t)) \tag{4-2-2}$$

4.2.2 Adaptation

Le problème d'adaptation vise à déterminer des critères de sélection ou la loi de commande f à utiliser en fonction des modifications intervenant dans l'environnement (local du véhicule) et de l'objectif choisi.

$$f(t+1) = a(W(t), f(t), O(t)) \tag{4-2-3}$$

[1] Correspond à un ensemble des commandes satisfaisant certaines contraintes physiques imposées au contrôleur telles que tension ou vitesse maximales.

Ce problème concerne la planification en cours d'exécution et la réactivité du système aux événements extérieurs. Sa résolution passe par la définition de la fonction *a*.

En pratique, le problème de décision et celui d'adaptation sont étroitement liés l'un à l'autre, la fréquence de changement de ces deux problèmes est généralement plus petite que celles des deux problèmes suivants.

4.2.3 Commande

Le problème de commande vise à déterminer la commande numérique *u(t)* à envoyer au véhicule par l'application de la loi de commande *f (t)* à un ensemble d'observation *W(t)* en vue de satisfaire à l'objectif *O(t)*.

$$u(t+1) = c(W(t), u(t), f(t), O(t)) \qquad (4\text{-}2\text{-}4)$$

La résolution de ce problème passe par la définition de la fonction *c*. D'après cette définition, la loi de commande peut fonctionner en boucle fermée ou ouverte, être simple ou complexe. Un contrôleur (module qui contrôle) fonctionne *en boucle fermée ou en boucle ouverte*, suivant qu'il tient compte ou non des informations sur l'état courant du système ou sur son environnement, telles que fournies par des capteurs.

4.2.4 Observation

Le problème d'observation concerne la sélection des éléments de l'environnement à prendre en compte pour la résolution de trois problèmes précédents. Sa résolution passe par la définition de la fonction *g*.

$$W(t+1) = g(W(t)) \tag{4-2-5}$$

Dans cette thèse nous utilisons comme observation les parois du réseau de galerie. Celles-ci sont modélisées en segments de droite, à partir des données télémétriques, pour extraire les erreurs de navigation (voir §4.5).

La figure 4.1 illustre le problème de contrôle dans le cas d'un véhicule autonome.

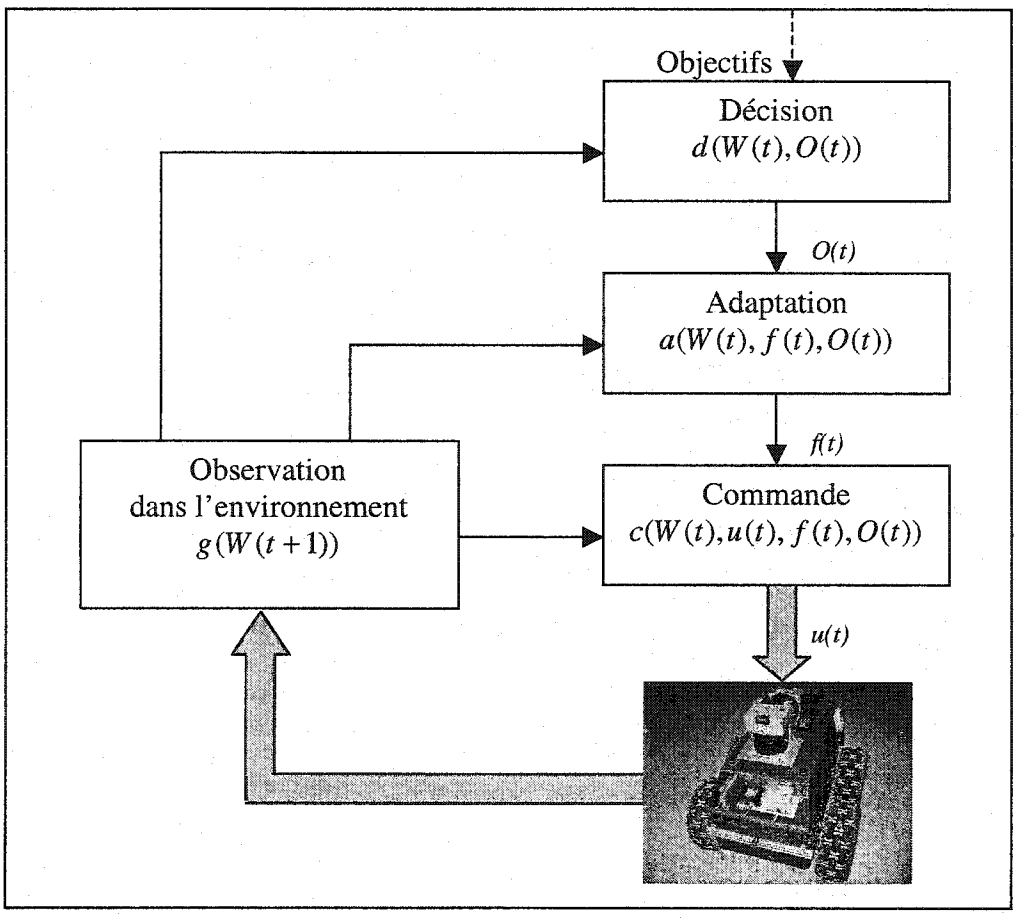


Figure 4.1 Problème de contrôle d'un véhicule autonome

4.3 Contrôleur réactif référencé capteur

Au début de nos travaux, nous nous sommes intéressés au simple suivi d'un chemin de référence issu d'un planificateur, sans tenir compte des données provenant des capteurs extéroceptifs (le télémètre laser, le sonar, le radar...). Ce type de contrôleur constitue en quelque sorte le degré minimum d'autonomie de mouvement du véhicule et on parle généralement de *commande par retour d'état* pour le classifier. Ensuite, afin de pouvoir *réagir* à la présence d'obstacles, aux changements locaux dans l'environnement et aux erreurs des capteurs internes (odomètre, capteurs inertiels) nous nous sommes intéressés aux contrôleurs de mouvements dont les consignes sont générées sur base de perceptions locales de l'environnement du véhicule. On parle généralement de commande référencée capteurs pour designer ce type de contrôleur (voir figure 4.2). Le formalisme de la commande référencée capteurs présente des propriétés de robustesse et

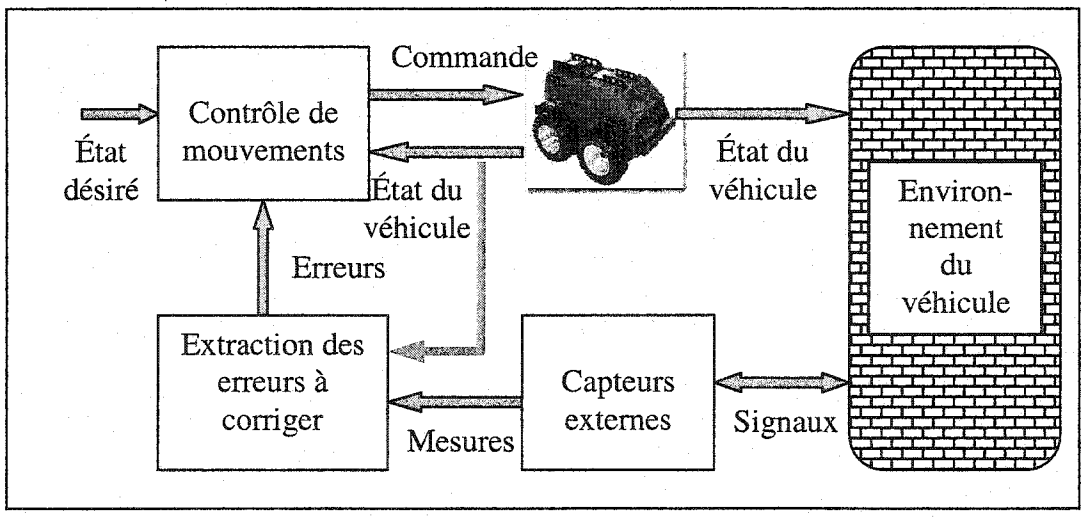


Figure 4.2 Commande référencée capteurs

de stabilité très intéressantes. Cela est dû principalement au fait que la tâche à exécuter est modélisée et contrôlée directement dans l'espace du capteur sans nécessiter une étape

d'estimation de la pose du véhicule dans un repère global. Le contrôleur de mouvements développé dans cette thèse est un contrôleur réactif référencé capteur. Il exploite les mesures télémétriques sur l'environnement local pour le suivi de parois, le suivi de chemin et le guidage du véhicule dans les intersections. Le passage du suivi de parois d'un mode à l'autre (gauche/droite/axe central) ou au suivi de chemin se fait de façon réactive selon les structures naturelles de guidage disponibles dans l'environnement. Les lois de commande proposées sont obtenues par l'application de la technique classique de linéarisation autour du point de fonctionnement nominal, la technique de placement des pôles et la commande optimale (celle-ci est une commande qui minimise un critère quadratique). Avant de décrire ces lois de commande, nous commencerons par énumérer les tâches que doit réaliser le contrôleur de mouvements dans le système proposé et décrire le modèle cinématique utilisé pour le contrôle du véhicule.

4.3.1 Tâches du contrôleur de mouvement

Nous voulons effectuer le guidage des véhicules autonomes dans des environnements de type réseau de galeries à partir de données de type télémétrique. Le contrôleur doit permettre au véhicule de :

- réaliser des mouvements sans collision, lisses et réguliers avec un minimum d'oscillations (ceci est crucial pour des véhicules de grande taille et se déplaçant à des vitesses importantes).
- suivre de façon réactive, selon les structures naturelles disponibles, la paroi gauche/droite ou l'axe central de la galerie ou un chemin prédéfini.

- traverser les intersections et les ouvertures où aucune structure naturelle de guidage n'est disponible.

4.3.2 Modèle du véhicule

Étant donnée la faible vitesse de locomotion du véhicule tout terrain considéré (ATRV-2) dans cette thèse, nous négligerons, dans la modélisation du véhicule, les mouvements de tangage et de roulis ainsi que le glissement et les déformations de roues pour simplifier le modèle du véhicule. ATRV-2 est un véhicule à quatre roues motrices indépendantes, différentielles et non directionnelles. Par véhicule à roues différentielles on entend que les roues du véhicule peuvent être commandées à des vitesses différentes d'une roue à l'autre simultanément. Cependant, le véhicule étant un corps rigide, les deux roues de chaque côté (gauche et droite) doivent avoir la même vitesse. Ainsi, ATRV-2 peut être modélisé comme un véhicule à deux roues motrices tel qu'illustré dans la figure 4.3.

A partir de la figure 4.3, on peut écrire les équations décrivant la cinématique du véhicule (voir §3.3) :

$$\begin{cases} \dot{X} = v\cos\theta \\ \dot{Y} = v\sin\theta \\ \dot{\theta} = \Omega \end{cases} \tag{4-3-1}$$

où X, Y indiquent la position du véhicule selon les axes x et y, θ est l'orientation du véhicule et Ω et v sont respectivement la vitesse angulaire et la vitesse linéaire.

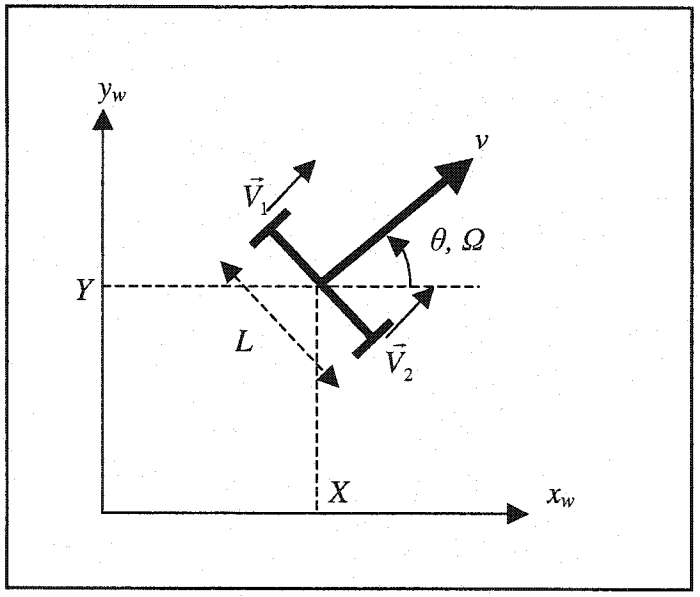


Figure 4.3 Modèle simplifié du véhicule

Les vitesses $\vec{V}_1$ et $\vec{V}_2$ (dans la figure 4.3) sont des vitesses des deux roues de gauche et des deux roues de droite respectivement. La relation suivante lie ces deux vitesses aux vitesses linéaire et angulaire du véhicule.

$$\begin{cases} \vec{V}_1 = p_1 v - p_2 \Omega \\ \vec{V}_2 = p_1 v + p_2 \Omega \end{cases} \tag{4-3-2}$$

où p_1 et p_2 sont des constantes. L'ajustement expérimental de leurs valeurs permet de calibrer le système odométrique du véhicule. Un différentiel de vitesses sur les roues de gauche et de droite provoque un mouvement de rotation. En fait, seul les glissements latéraux permettent à l'ensemble du châssis de tourner.

4.3.3 Erreurs de navigation et objectif du contrôleur

La figure 4.4 schématise la position du véhicule par rapport au chemin et les erreurs latérale et d'orientation. Ces deux erreurs, latérale et d'orientation, sont appelées *erreurs de navigation*. Dans cette figure, le chemin est défini par l'axe central de la galerie. On y définit deux référentiels : le référentiel du chemin dont l'indice est « c » et le référentiel du véhicule dont l'indice est « r ». L'origine du référentiel du chemin, $O_c(X_c, Y_c)$, est choisie de telle sorte à représenter le point le plus proche du point de repère ($O_r(X, Y)$) du véhicule. Son axe des x est tangent au chemin et est dirigé dans la direction du mouvement désiré (voir figure 4.4.)

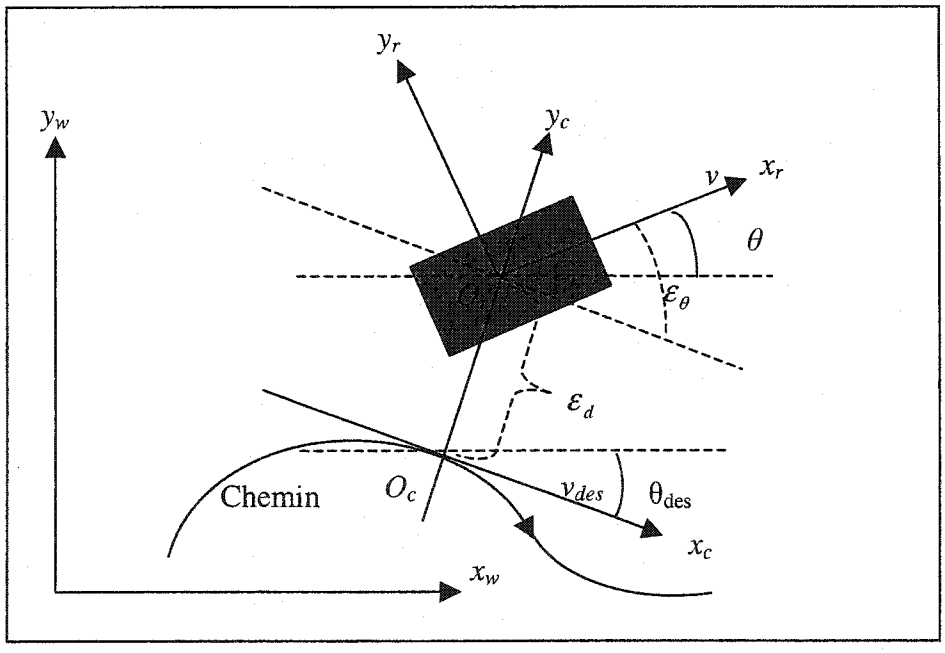


Figure 4.4 Erreurs de navigation en suivi de chemin

A partir de la figure 4.4, nous pouvons déduire les deux erreurs de navigation : l'erreur latérale notée ε_d et l'erreur d'orientation notée ε_θ.

$$\varepsilon_d = -(X - X_c)\sin(\theta_{des}) + (Y - Y_c)\cos(\theta_{des})$$
$$\varepsilon_\theta = \theta - \theta_{des} \qquad (4\text{-}3\text{-}3)$$

Ainsi l'objectif du contrôleur est de générer (par une loi de commande) des commandes u permettant de faire tendre les erreurs de navigation vers zéro (ou de maintenir leurs valeurs très faibles) afin de maintenir le véhicule sur le chemin et de le garder tangent à celui-ci.

4.3.4 Loi de commande

L'aspect perceptuel du suivi de paroi ou de chemin s'exprime comme l'estimation des erreurs de navigation instantanées. La loi de commande permet de générer de nouvelles vitesses de translation et de rotation pour corriger ces erreurs.

4.3.4.1 Dynamique des erreurs de navigation

Comme il a été souligné à la section 4.3.3, il y a deux types d'erreurs de navigation : l'erreur latérale et l'erreur d'orientation.

- La variation de l'erreur latérale.

  La projection de la vitesse du véhicule sur l'axe des y du référentiel du chemin (voir figure 4-3) donne la dérivée de l'erreur latérale :

  $$\dot{\varepsilon}_d = v\sin(\varepsilon_\theta) \qquad (4\text{-}3\text{-}4)$$

- La variation de l'erreur d'orientation

  Soit la vitesse de rotation du véhicule décomposée en deux termes :

$$\Omega = \frac{|v|}{R} + \Delta\Omega \tag{4-3-5}$$

où le premier terme correspond à la vitesse de rotation (avec R le rayon de giration du véhicule au point O_r) et $\Delta\Omega$, appelé *terme correctif* de la vitesse de rotation, est la commande à déterminer pour assurer le suivi de chemin/paroi. Des formules (4-3-1), (4-3-3) et (4-3-5) et de la figure 4.4 (avec $R - \varepsilon_d$ comme rayon de giration au point O_c) on a :

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \dot{\theta} - \dot{\theta}_{des}$$
$$\dot{\theta} = \Omega = \frac{|v|}{R} + \Delta\Omega$$
$$\dot{\theta}_{des} = \frac{|v|}{R - \varepsilon_d}$$

et finalement

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \Delta\Omega + \frac{|v|}{R} - \frac{|v|}{R - \varepsilon_d} = \Delta\Omega - \frac{|v|}{R^2 - R\varepsilon_d}\varepsilon_d \tag{4-3-6}$$

Les formules (4-3-3) et (4-3-6) forment un système d'équations décrivant le modèle dynamique des erreurs de navigation avec $(\varepsilon_d, \varepsilon_\theta)^t$ comme vecteur d'état.

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_d = |v| \sin(\varepsilon_\theta) \\ \dot{\varepsilon}_\theta = \Delta\Omega - \dfrac{|v|}{R^2 - R\varepsilon_d}\varepsilon_d \end{cases} \tag{4-3-7}$$

Après linéarisation par approximation du premier ordre autour de zéro (valable pour les petites erreurs de navigation), le système (4-3-7) se réduit au système linéaire et invariant suivant :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_d = |v|\varepsilon_\theta \\ \dot{\varepsilon}_\theta = \Delta\Omega - \dfrac{|v|}{R^2}\varepsilon_d \end{cases} \tag{4-3-8}$$

dont la forme matricielle est :

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_d \\ \dot{\varepsilon}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & |v| \\ -\dfrac{|v|}{R^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta\Omega \tag{4-3-8}$$

et son schéma bloc est illustré à la figure 4.5.

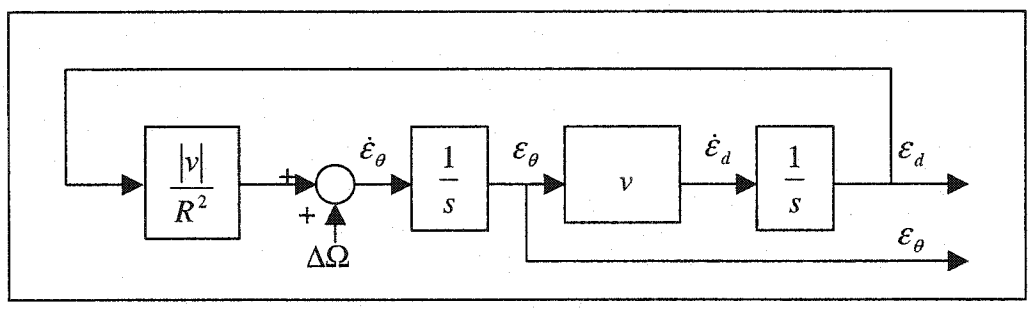


Figure 4.5 Schéma bloc du modèle dynamique des erreurs de navigation

On peut montrer que ce modèle dynamique des erreurs de navigation est commandable pour toute vitesse v différente de zéro. En effet, un système dynamique linéaire invariant d'ordre n :

$$\dot{X}(t) = AX(t) + Bu(t) \tag{4-3-9}$$

est commandable (FRANKLIN, F., (1986)) si

$$rang\left(\left[B \middle| AB \middle| A^2B \middle| \ldots \middle| A^{n-1}B \right] \right) = n \tag{4-3-10}$$

Dans notre cas, $n=2$, $B=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$, $A=\begin{bmatrix}0 & |v|\\ -\frac{|v|}{R^2} & 0\end{bmatrix}$, et $rang\left([B|AB]\right)=rang\begin{bmatrix}0 & |v|\\ 1 & 0\end{bmatrix}$. Ce dernier est égal 2 ($n=2$) si v est différente de zéro car le déterminant de $\begin{bmatrix}0 & |v|\\ 1 & 0\end{bmatrix}=-|v|$.

4.3.4.2 Loi de commande par placement des pôles.

La loi de commande suivante est appliquée pour assurer la convergence des erreurs de navigation vers zéro en fonction de temps.

$$\begin{cases} v = v_{des} \\ \Omega = \dfrac{|v|}{R} + \Delta\Omega \end{cases} \tag{4-3-11}$$

Cependant, corriger les erreurs de navigation en fonction du temps de parcours n'est pas conforme aux pratiques utilisées par un conducteur de véhicules. En effet, l'objectif d'un conducteur est maintenir son véhicule le plus près possible du milieu de la route et ceci indépendamment du temps de parcours. Il corrige les erreurs selon la localisation du véhicule par rapport au chemin à suivre. Aussi, nous adopterons une stratégie de commande basée sur la notion de suivi géométrique de chemin qui garantit la convergence des erreurs en fonction de la distance parcourue. Pour ce faire, nous réécrivons (4-3-8) en terme de distance parcourue.

Soit

$$dS = |v|dt \tag{4-3-12}$$

un déplacement élémentaire le long du chemin, alors :

$$\dot{\varepsilon}_d = \frac{d\varepsilon_d}{dS}\frac{dS}{dt} = \frac{d\varepsilon_d}{dS}|v| \tag{4-3-13}$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta = \frac{d\varepsilon_\theta}{dS}\frac{dS}{dt} = \frac{d\varepsilon_\theta}{dS}|v| \tag{4-3-14}$$

En introduisant les formules (4-3-13) et (4-3-14) dans (4-3-8), on a un nouveau modèle dynamique des erreurs de navigation :

$$\begin{cases} \dfrac{d\varepsilon_d}{dS} = \varepsilon_\theta \\ \dfrac{d\varepsilon_\theta}{dS} = \dfrac{\Delta\Omega}{|v|} - \dfrac{1}{R^2}\varepsilon_d \end{cases} \tag{4-3-15}$$

Posons que la commande

$$u = \frac{\Delta\Omega}{|v|} \tag{4-3-16}$$

et supposons que cette commande est une combinaison linéaire des variables d'état du système (4-3-15).

$$u = -KX = -\begin{bmatrix} k_1 & k_2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \end{bmatrix} \tag{4-3-17}$$

où K est un vecteur constant des gains rétroaction, à déterminer. En utilisant la formule (4-3-10), on peut vérifier que (4-3-15) est commandable. En d'autres termes, la dynamique du système (4-3-15) en boucle fermée ($\dot{X} = (A - BK)X$), décrite par l'équation (4-3-18), peut être dictée par un choix de pôles arbitraires.

$$\frac{d}{dS}\begin{pmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -k_1 - \dfrac{1}{R^2} & -k_2 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} \tag{4-3-18}$$

Soient p_1 et p_2 les pôles désirés (ces pôles ont leur partie réelle négative), alors l'équation caractéristique résultante est :

$$EC_{des} = (s - p_1)(s - p_2) = \quad s^2 + a_1 s + a_0 = 0 \tag{4-3-18}$$

Or, l'équation caractéristique du système en boucle fermée (4-3-18) est :

$$EC_{cl} = \det[sI - (A - BK)] = s^2 + k_2 s + k_1 + \frac{1}{R^2} = 0 \quad (4\text{-}3\text{-}19)$$

Le système en boucle fermée (4-3-18) est localement exponentiellement stable si et seulement si les valeurs propres de la matrice décrivant ce système sont à partie réelle négative. Ces valeurs propres ($s_{1,2}$) sont les racines de l'équation caractéristique EC_{cl} (voir formule (4-3-19)) du système en boucle fermée :

$$s_{1,2} = (-k_2 \pm \sqrt{(k_2^2 - 4k_1 - 4/R^2)})/2 \quad (4\text{-}3\text{-}20)$$

Ainsi, il suffit que k_1 et k_2 soient supérieurs à zéro ($k_1>0$ et $k_2>0$) pour que $s_{1,2}$ soient des racines à partie réelle négative et que le système (4-3-18) soit stable.

En comparant terme à terme les équations caractéristiques (4-3-18) et (4-3-19), nous pouvons déterminer les gains de rétroaction du contrôleur.

$$\begin{cases} k_1 = p_1 p_2 - \dfrac{1}{R^2} \\ k_2 = -(p_1 + p_2) \end{cases} \quad (4\text{-}3\text{-}21)$$

Nous avons choisi en particulier $p_1 = p_2 = \mu = -2$ pour un amortissement de e^{-1} sur une distance de 0.5 mètre. Donc, $k_1=4$ (pour un chemin localement rectiligne, c'est dire R >>1) et $K_2=4$.

La commande $u = -k_1\varepsilon_d - k_2\varepsilon_\theta$ étant définie, nous pouvons calculer le terme correctif $\Delta\Omega = |v|u$ deduite de (4-3-16).

4.3.4.3 Loi de commande optimale (par minimisation d'un critère quadratique)

Considérons cette fois ci la figure 4.6 pour déduire les équations de la dynamique des erreurs de navigation en suivi de parois. Le suivi de paroi consiste à faire effectuer au véhicule un chemin qui le maintient parallèle à la paroi tout en restant à une distance constante désirée ρ_{des} de celle-ci avec une vitesse de translation arbitraire.

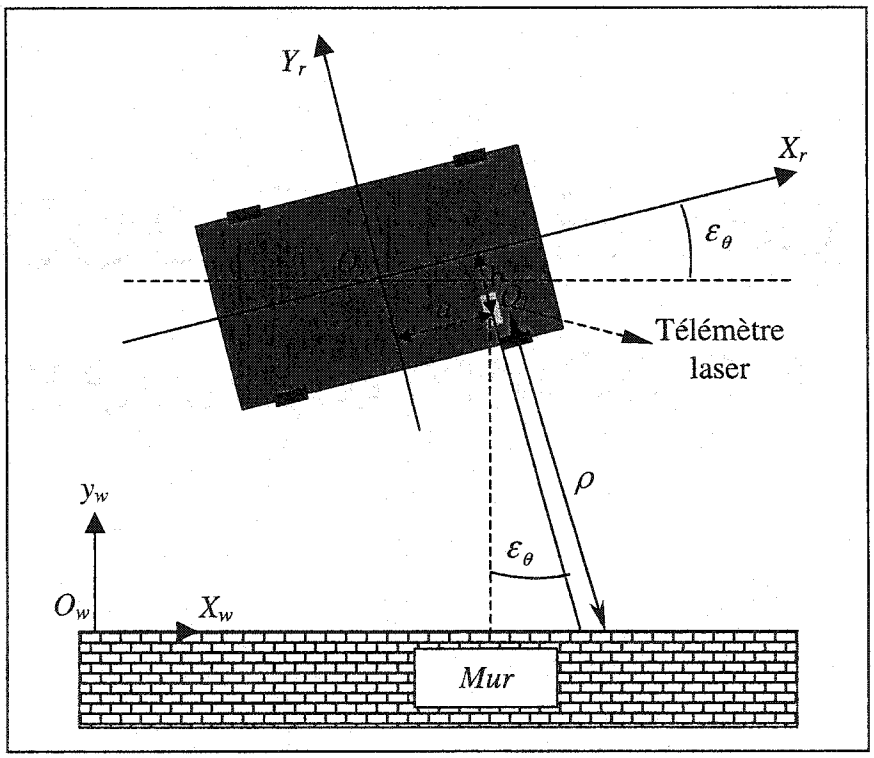


Figure 4.6 Erreurs de navigation en suivi de paroi

Soient :

- ε_θ, la différence d'orientation entre la paroi et la direction du véhicule (erreur d'orientation), et $\hat{\varepsilon}_\theta$, l'estimation courante de cet angle obtenue à partir des données télémétriques, à l'aide d'un estimateur;

- ρ, la distance du véhicule à la paroi, et $\hat{\rho}$, l'estimation courante de cette distance obtenue à partir des données télémétriques à l'aide d'un estimateur;
- $\varepsilon_d = \rho - \rho_{des}$, l'erreur latérale, et $\hat{\varepsilon}_\theta = \hat{\rho} - \rho_{des}$ son estimé;
- a et b sont les coordonnées du capteur extéroceptif (télémètre laser dans notre cas) par rapport au repère du véhicule selon l'axe x ou y respectivement;
- $O_r = (X, Y)$ et $O_l = (x_l, y_l)$ respectivement les coordonnées du centre de repère du véhicule et du télémètre laser par rapport au repère global dont le centre est O_w.

La tâche à réaliser revient à maintenir les erreurs de navigation ε_θ et ε_d proches de zéro. Il s'agit, en fait, de déterminer une commande (optimale)

$$u(t) = \dot{\varepsilon}_\theta \tag{4-3-21}$$

capable de réaliser cet objectif de régulation. Pour ce faire, nous avons besoin d'un modèle décrivant la dynamique des erreurs de navigation pour le suivi de paroi.

A partir de la figure 4.6, on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{bmatrix} = T(X, Y, \varepsilon_\theta) \begin{bmatrix} a \\ -b \\ 1 \end{bmatrix} \tag{4-3-22}$$

où

$$T(X, Y, \varepsilon_\theta) = \begin{pmatrix} \cos(\varepsilon_\theta) & -\sin(\varepsilon_\theta) & X \\ \sin(\varepsilon_\theta) & \cos(\varepsilon_\theta) & Y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{4-3-23}$$

est la matrice de transfert du repère du véhicule au repère global et *(a, b)* sont les coordonnées du télémètre laser par rapport au repère du véhicule.

D'après (4-3-22) et (4-3-23), on a :

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X + a\cos(\varepsilon_\theta) + b\sin(\varepsilon_\theta) \\ Y + a\sin(\varepsilon_\theta) - b\cos(\varepsilon_\theta) \end{bmatrix} \tag{4-3-24}$$

Or

$$\rho = \frac{y_l}{\cos(\varepsilon_\theta)} \tag{4-3-25}$$

En remplaçant la valeur de y_l (voir (4-3-24)) dans (4-3-25), on a :

$$\rho = \frac{Y + a\sin(\varepsilon_\theta) - b\cos(\varepsilon_\theta)}{\cos(\varepsilon_\theta)} \tag{4-3-26}$$

En dérivant (4-3-26) et en remplaçant $\dot{Y} = v\sin(\varepsilon_\theta)$ (voir (4-3-1)), on obtient :

$$\dot{\rho} = v\tan(\varepsilon_\theta) + a\dot{\varepsilon}_\theta + \dot{\varepsilon}_\theta(\rho + b)\tan(\varepsilon_\theta) \tag{4-3-27}$$

Sachant que par définition l'erreur latérale ε_d est égale à $\rho - \rho_{des}$, sa dérivée est :

$$\dot{\varepsilon}_d = \dot{\rho} - \dot{\rho}_{des} = \dot{\rho} \tag{4-3-28}$$

Finalement, en prenant $(\varepsilon_d, \varepsilon_\theta)^t$ comme vecteur d'état, $u = \dot{\varepsilon}_\theta$ comme commande et en linéarisant (4-3-28) au tour de zéro, on obtient le modèle de la dynamique des erreurs de navigation.

$$\begin{pmatrix} \dot{\varepsilon}_d \\ \dot{\varepsilon}_\theta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & v \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a \\ 1 \end{pmatrix} u \tag{4-3-29}$$

On peut facilement montrer que (voir la formule (4-3-10)) le système linéaire invariant (4-3-29) est commandable si et seulement si la vitesse de translation v est différente de zéro.

Au lieu de la méthode de placement des pôles pour calculer la commande, nous avons choisi cette fois d'appliquer les notions de la commande optimale. En effet, pour un système dynamique linéaire invariant d'ordre n (voir la formule (4-3-9)) et un critère quadratique

$$J = \frac{1}{2}\int_0^\infty \left[X^t(t)QX(t) + u^t(t)Ru(t)\right]dt \qquad (4\text{-}3\text{-}30)$$

donnés, où les matrices de poids Q et R sont constantes et définies positives, si le système est commandable, alors la commande optimale

$$u(t) = -R^{-1}B^t\hat{K}X(t) \qquad (4\text{-}3\text{-}31)$$

qui minimise le critère quadratique (4-3-30) existe et est unique. $\hat{K}$ est une matrice d'ordre n, constante et positive, et est la solution de l'équation de Riccati :

$$-\hat{K}A - A^t\hat{K} + \hat{K}BR^{-1}B^t\hat{K} - Q = 0 \qquad (4\text{-}3\text{-}32)$$

Ainsi, le système en boucle fermée est donné par :

$$\dot{X}(t) = (A - BR^{-1}B^t\hat{K})X(t) \qquad (4\text{-}3\text{-}33)$$

En considérant le système linéaire invariant (4-3-29) où

$$A = \begin{bmatrix} 0 & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ et } B = \begin{bmatrix} a \\ 1 \end{bmatrix}$$

et en prenant

$$Q=\begin{bmatrix} v^2 & 0 \\ 0 & v^2q^2 \end{bmatrix},\ R=s^2 \text{ et } \hat{K}=\begin{bmatrix} \hat{k}_1 & \hat{k}_2 \\ \hat{k}_3 & \hat{k}_4 \end{bmatrix}$$

le critère quadratique à minimiser est

$$J=\frac{1}{2}\int_0^\infty \left[v^2(\varepsilon_d,\varepsilon_\theta)\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q^2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \varepsilon_d \\ \varepsilon_\theta \end{bmatrix} + s^2u^2 \right] dt \qquad (4\text{-}3\text{-}34)$$

avec $q \geq 0$, $s > 0$.

Connaissant les matrices A et B du système (4-3-29) et les matrices définies positives Q et R, il est facile de déduire l'équation de Riccati (selon (4-3-32)) associée au système (4-3-29), qui permet de calculer la matrice $\hat{K}$. Après la résolution de l'équation de Riccati associée au système (4-3-29), on obtient en appliquant la relation (4-3-31) la commande optimale (KARIM, 1993)

$$u=-\frac{v}{s}\varepsilon_d-\frac{|v|\sqrt{(q^2+a^2+2s)}-va}{s}\varepsilon_\theta \qquad (4\text{-}3\text{-}35)$$

Il est évident que pour utiliser les deux lois de commande développées dans cette section, il faut avoir accès directement aux variables ε_d et ε_θ du vecteur d'état, ou avoir une estimation de leurs valeurs. Dans notre cas, elles sont fournies par un estimateur (observateur) des erreurs de navigation à partir des mesures du télémètre laser.

4.4 Observateur des erreurs de navigation pour le suivi de parois

L'observateur des erreurs de navigation a pour mission l'estimation (par la technique des moidres carrés) de la position et de l'orientation du véhicule par rapport à la paroi à partir des mesures télémétriques. Le télémètre étant physiquement attaché au véhicule, nous allons plutôt estimer l'orientation θ de la paroi par rapport au véhicule et la distance λ de la paroi au véhicule, c'est-à-dire les paramètres caractéristiques θ et λ de la droite modélisant la paroi (voir figure 4.7). Le paramètre α est l'angle de balayage utilisé pour délimiter la zone de la paroi à modéliser par une droite. Ce changement d'objectif (estimation de θ et λ au lieu de la pose du véhicule) permet de résoudre le problème dans le repère local du véhicule. Ceci présente les avantages suivants :

- l'estimation de paramètres θ et λ est indépendante de la pose courante du véhicule, qui est nulle dans le repère du véhicule. Remarquons que la pose du véhicule est généralement entachée d'erreur due aux capteurs internes (odométrie, inertiel), En tenir compte constituerait donc une source d'erreur dans l'estimation de θ et λ;
- l'estimation de paramètres θ et λ dépend uniquement des mesures télémétriques et de la capacité du véhicule à modéliser ces mesures (en une droite);
- les paramètres θ et λ représentent respectivement l'orientation du véhicule par rapport à la paroi et la distance ρ du véhicule à la paroi. Puisque l'objectif de

suivi de paroi est de maintenir le véhicule parallèle à la paroi, alors l'orientation du véhicule par rapport à la paroi correspond à l'erreur d'orientation ε_θ.

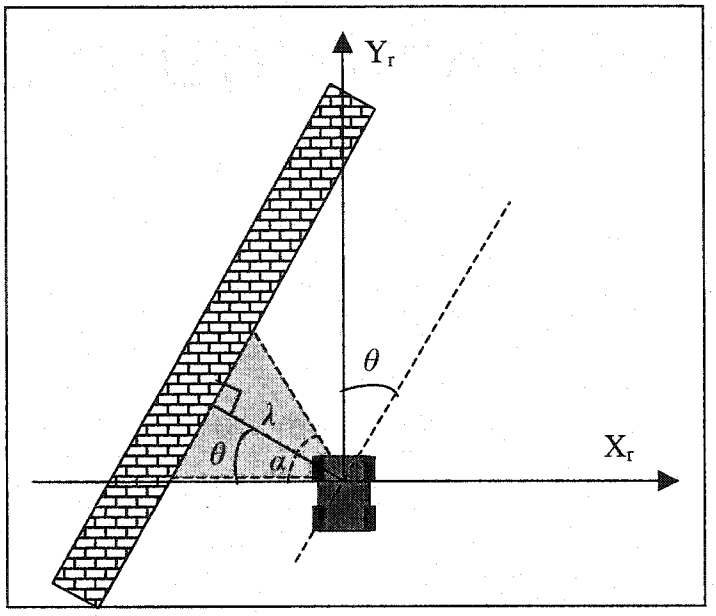


Figure 4.7 Estimation des erreurs de navigation

De ce qui précède, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \varepsilon_d &= \rho - \rho_{des} = \lambda - \rho_{des} \\ \varepsilon_\theta &= \theta \end{aligned} \tag{4-4-1}$$

Les détails sur l'estimation de paramètres caractéristiques θ et λ de la droite à partir des mesures télémétriques sont fournis au chapitre 5 (voir §5.3.1).

Soient (θ_g, λ_g) et (θ_d, λ_d) les paramètres caractéristiques décrivant respectivement la paroi à gauche (comme sur la figure 4.7) et la paroi à droite du véhicule dans une galerie. Sachant que la distance entre un point (x_c, y_c) et une droite décrite par (θ, λ), tous définis dans le même repère, est donnée par $dist_{lp} = \left| x_c \cos\theta + y_c \sin\theta - \lambda \right|$, nous pouvons

déduire les paramètres caractéristiques (θ_c, λ_c) de la droite modélisant tous les points équidistants de deux droites à gauche et à droite du véhicule, c'est-à-dire l'axe central de la galerie.

$$x_c \cos\theta_g + y_c \sin\theta_g - \lambda_g = \pm\left(x_c \cos\theta_d + y_c \sin\theta_d - \lambda_d\right) \qquad (4\text{-}4\text{-}2)$$

- En considérant le signe négatif nous obtenons (PLOUZNIKOFF, 2002):

$$x_c \cos(\frac{\theta_g + \theta_d}{2}) + y_c \sin(\frac{\theta_g + \theta_d}{2}) - \frac{\lambda_g + \lambda_d}{2\cos(\frac{\theta_g - \theta_d}{2})} = 0 \qquad (4\text{-}4\text{-}3)$$

et finalement, par identification, les paramètres (θ_c, λ_c) recherchés sont :

$$\theta_c = \frac{\theta_g + \theta_d}{2} \quad \text{et} \quad \lambda_c = \frac{\lambda_g + \lambda_d}{2\cos(\frac{\theta_g - \theta_d}{2})} \qquad (4\text{-}4\text{-}4)$$

Ces paramètres décrivent la bissectrice du plus petit angle formé par les deux droites à gauche et à droite du véhicule dans une galerie.

- En considérant le signe positif nous obtenons :

$$x_c \cos(\frac{\theta_g + \theta_d}{2} - \frac{\pi}{2}) + y_c \sin(\frac{\theta_g + \theta_d}{2} - \frac{\pi}{2}) - \frac{\lambda_g + \lambda_d}{2\sin(\frac{\theta_g - \theta_d}{2})} = 0 \qquad (4\text{-}4\text{-}5)$$

et finalement, par identification, les paramètres (θ_c, λ_c) recherchés sont :

$$\theta_c = \frac{\theta_g + \theta_d}{2} - \frac{\pi}{2} \quad \text{et} \quad \lambda_c = \frac{\lambda_g + \lambda_d}{2\sin(\frac{\theta_g - \theta_d}{2})} \qquad (4\text{-}4\text{-}6)$$

Ces paramètres décrivent la bissectrice du plus grand angle formé par les deux droites à gauche et à droite du véhicule dans une galerie. Ceci n'est pas notre cas car le véhicule

est dans la galerie et par conséquent on ne peut considérer que le premier cas, c'est-à-dire celui du signe « - » avec le plus petit angle formé par les deux droites des parois.

4.5 Guidage du véhicule dans les intersections

Dans le chapitre trois, nous avons montré comment un véhicule autonome peut déterminer s'il débouche dans une intersection, détecter la discontinuité dans les mesures télémétriques et déterminer le degré de l'intersection détectée.

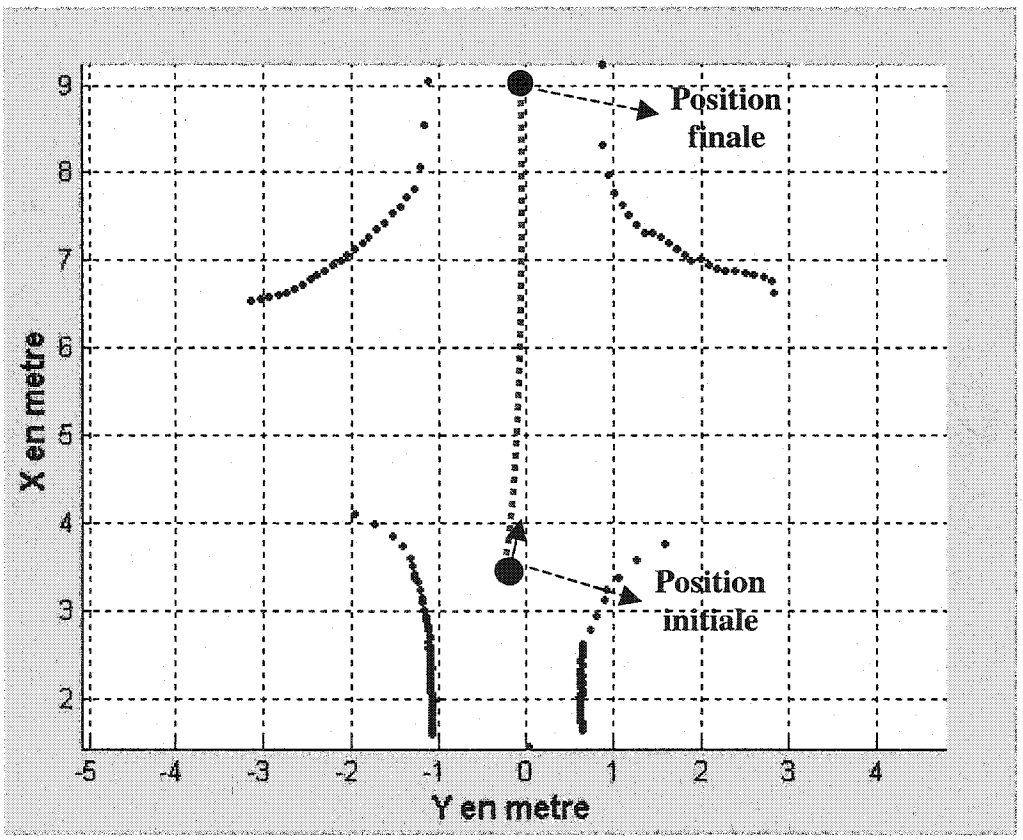


Figure 4.8 Problème de guidage dans une intersection

Dans cette section, nous abordons le problème du guidage pour traverser les intersections (voir figure 4.8) lorsque les parois ne sont pas disponibles pour un suivi de parois. Concrètement, il s'agit de générer les commandes pouvant conduire le véhicule de la position initiale à la position finale illustrée à la figure 4.8. Nous proposons deux solutions : guidage par suivi de chemin local dans l'intersection et guidage par suivi de cibles locales dans l'intersection

4.5.1 Guidage par suivi de chemin local dans l'intersection

La technique de guidage du véhicule dans une intersection, initialement proposée dans cette thèse, consiste à générer un chemin local reliant la position où le véhicule détecte l'intersection, appelée position initiale, et la position finale désirée (voir figure 4.8). Celle-ci étant le point milieu de la discontinuité correspondante à la galerie de branchement à la sortie de l'intersection. Ceci suppose que le véhicule est capable de détecter les discontinuités dues à une intersection (voir §3.5). L'exécution de ce chemin local à l'aide des lois de commande développées à la section 4.3 et du système odométrique du véhicule permet à celui-ci de traverser de façon sécuritaire l'intersection détectée.

Les expériences menées en laboratoire et dans une mine souterraine ont montrées que cette technique de traversée d'intersection est efficace. Cependant, pour de larges

intersections, il est nécessaire de considérer dans la boucle de contrôle les informations télémétriques sur l'environnement local du véhicule. Cette nécessité vient du fait que l'odométrie n'est bonne que pour de courte distance. Ci-dessous nous présentons une deuxième technique de guidage du véhicule aux intersections qui intègre dans sa boucle de contrôle les informations télémétriques sur l'environnement du véhicule.

4.5.2 Guidage par suivi de cibles locales dans l'intersection

Contrairement à la première technique qui détermine la position finale désirée afin de générer un chemin local, cette deuxième technique détermine deux régions cibles dont l'une attachée à la paroi gauche et l'autre à la paroi droite de la galerie de branchement à la sortie de l'intersection tel qu'illustré à la figure 4.9. Le véhicule fait la poursuite continuelle des deux cibles, à l'aide du télémètre laser, pour en extraire les erreurs de navigation pour le contrôleur. L'objectif poursuivi est de conduire le véhicule entre les deux cibles.

Pour estimer les erreurs de navigation, les mesures télémétriques à l'intérieur de ces deux cibles sont modélisées en deux droites dont les paramètres caractéristiques sont $(\theta_{cg}, \lambda_{cg})$ et $(\theta_{cd}, \lambda_{cd})$ respectivement pour la cible gauche et la cible droite. D'après (4-3-38), les paramètres caractéristiques de l'axe central des cibles sont

$$\theta_{cc} = \frac{\theta_{cg} + \theta_{cd}}{2} \quad \text{et} \quad \lambda_{cc} = \frac{\lambda_{cg} + \lambda_{cd}}{2\cos(\frac{\theta_{cg} - \theta_{cd}}{2})} \tag{4-5-1}$$

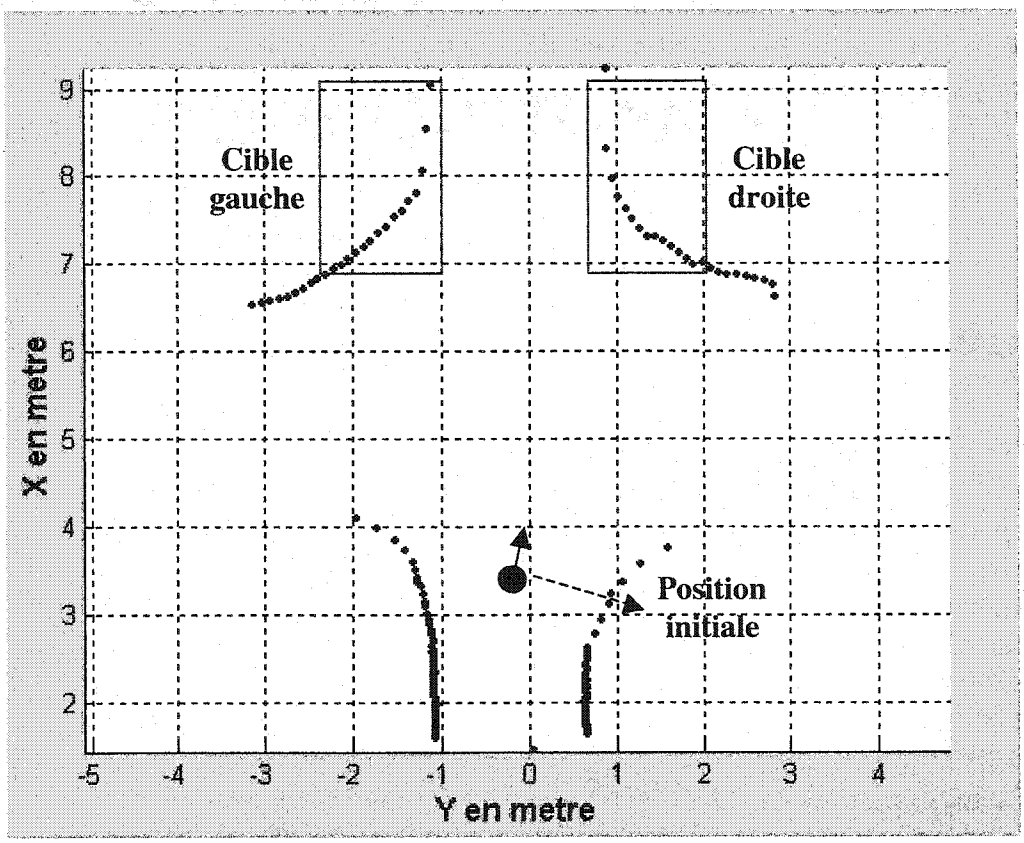


Figure 4.9 Régions cibles pour le guidage à l'intersection

4.5.2.1 Représentation polaire du modèle cinématique du véhicule

Considérons les équations (4-3-1) décrivant le modèle cinématique du véhicule dans le système de coordonnées cartésiennes. Soient α l'angle entre l'axe y_r et le vecteur reliant le centre de repère du véhicule $\boldsymbol{R}$ et la position finale désirée $\boldsymbol{C}$ (voir figure 4.10), ρ la

distance entre ***R*** et ***C***, ϕ l'angle entre l'axe x_r du repère du véhicule et l'axe x_c associé à la position finale désirée. Soit encore $\alpha(0)$ la valeur initiale de l'angle α, alors :

- Si $\alpha(0) \in (-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$, en considérant la transformation des coordonnées suivantes :

$$\begin{aligned} \rho &= \sqrt{(X^2 + Y^2)} \\ \alpha &= -\theta + \arctan\left(\frac{-Y}{-X}\right) \\ \phi &= \frac{\pi}{2} - \theta, \end{aligned} \tag{4-5-2}$$

le modèle cinématique (4-3-1) du véhicule peut s'écrire sous la forme suivante en coordonnées polaires avec $(\rho, \alpha, \phi)^t$ comme vecteur d'état :

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -v\cos\alpha \\ \dot{\alpha} &= v\frac{\sin\alpha}{\rho} - \Omega \\ \dot{\phi} &= -\Omega \end{aligned} \tag{4-5-3}$$

où Ω est la vitesse de rotation et v est la translation du véhicule. Remarquons que la transformation (4-5-2) n'est pas définie pour *X=Y=0*.

- Si $\alpha(0) \in (-\pi, -\frac{\pi}{2}] \cup (\frac{\pi}{2}, \pi]$, il suffit d'assigner un signe négatif à la vitesse *(v=-v)* dans le modèle (4-5-3) pour obtenir le modèle correspondant.

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= v\cos\alpha \\ \dot{\alpha} &= -v\frac{\sin\alpha}{\rho} - \Omega \\ \dot{\phi} &= -\Omega \end{aligned} \tag{4-5-4}$$

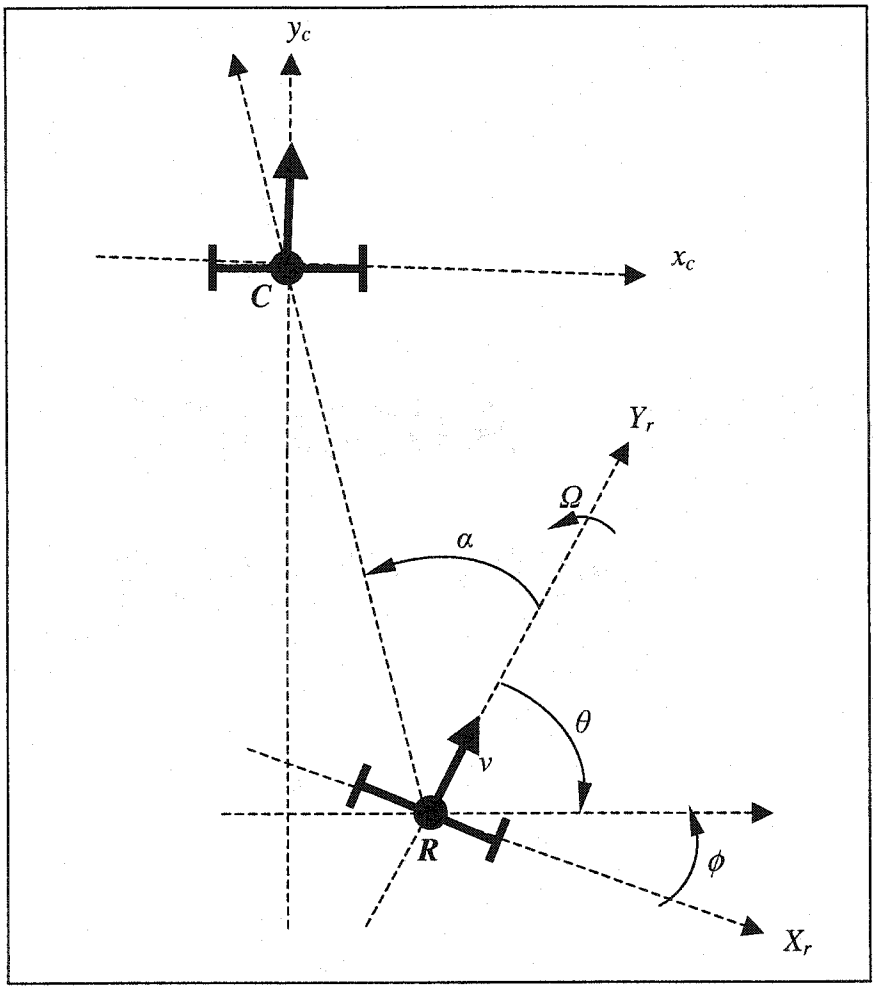


Figure 4.10 Représentation polaire du modèle cinématique

4.5.2.2 Loi de commande pour le suivi des cibles

La loi de commande développée dans cette thèse pour la traversée des intersections s'inspire des travaux de ASTOLFI (1995).

$$\begin{aligned} v &= k_\rho \rho \\ \Omega &= k_\alpha \alpha + k_\phi \phi \end{aligned} \tag{4-5-5}$$

Ainsi, le système (4-5-3) en boucle fermée est :

$$\begin{aligned} \dot{\rho} &= -k_\rho \rho \cos\alpha \\ \dot{\alpha} &= -k_\rho \sin\alpha - k_\alpha \alpha - k_\phi \phi \\ \dot{\phi} &= -k_\alpha \alpha - k_\phi \phi \end{aligned} \tag{4-5-6}$$

Le système (4-5-6) admet un point d'équilibre unique $(\rho,\alpha,\phi) = (0,0,0)$. La linéarisation du système (4-5-6) autours de ce point d'équilibre est :

$$\begin{pmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\phi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -k_\rho & 0 & 0 \\ 0 & -k_\alpha + k_\rho & -k_\phi \\ 0 & -k_\alpha & -k_\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \rho \\ \alpha \\ \phi \end{pmatrix} \tag{4-5-7}$$

Ce système (4-5-6) est localement exponentiellement stable si les valeurs propres de la matrice décrivant la linéarisation approximative du système (voir (4-5-7)) sont à partie réelle négative. Ces valeurs propres sont les racines de l'équation caractéristique :

$$EC_{cl} = (s + k_\rho)(s^2 + s(k_\alpha + k_\phi - k_\rho) - k_\rho k_\phi) \tag{4-5-8}$$

qui admet les racines négatives si et seulement si les conditions suivantes sont satisfaites

$$\begin{aligned} k_\rho &> 0 \\ k_\phi &< 0 \\ k_\alpha + k_\phi - k_\rho &< 0 \end{aligned} \tag{4-5-9}$$

Dans ASTOLFI, (1999), il est démontré que le système (4-5-6) est globalement exponentiellement stable et que la loi de commande (4-5-5) permet de faire réaliser au véhicule des mouvements lisses de n'importe quelle position initiale à la position finale désirée.

4.5.2.3 Observateur du vecteur d'état $(\rho,\alpha,\phi)^t$ pour la traversée des intersections

Pour des mêmes raisons que dans la section 4.4, nous allons estimer la position et orientation finales désirées dans le repère du véhicule.

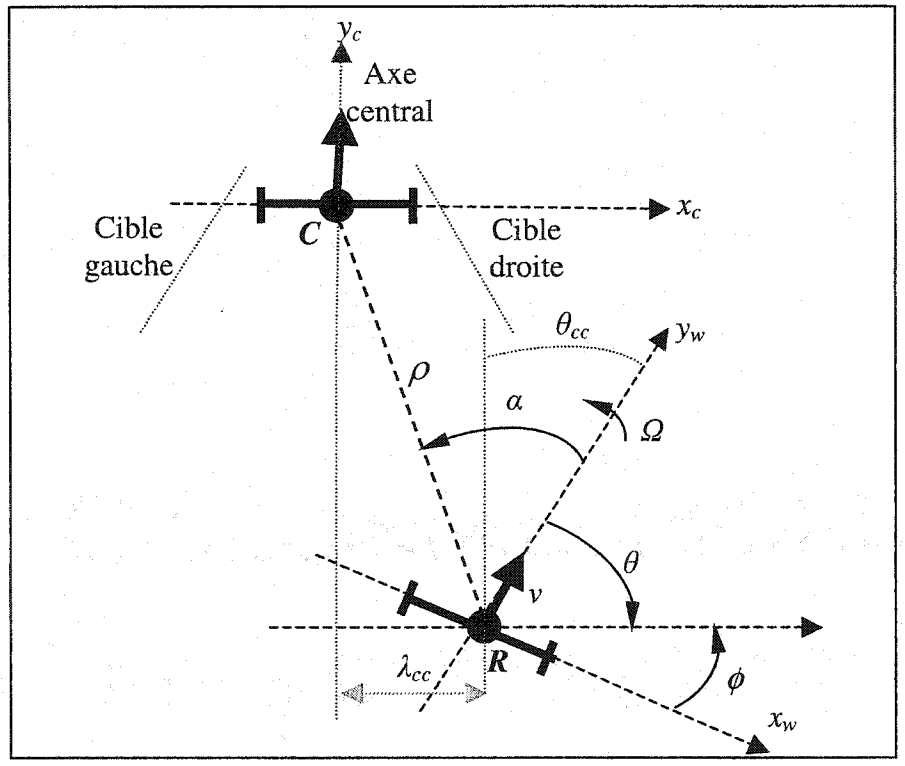


Figure 4.11 Observateur du vecteur d'état pour le guidage aux intersections

Ainsi, la position finale désirée est choisie sur l'axe central des deux cibles et l'orientation finale désirée est celle de l'axe central de deux cibles.

D'après la figure 4.11, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \hat{\phi} &= \theta_{cc} \\ \hat{\theta} &= \frac{\pi}{2} - \theta_{cc} \\ \hat{\rho} &= \sqrt{\left(X_c^2 + Y_c^2\right)} \end{aligned} \tag{4-5-10}$$

4.6 Expérimentation du contrôleur des mouvements

Les expériences menées en laboratoire et à la mine souterraine de Noranda ont permis d'évaluer le contrôleur de mouvements développé dans cette thèse sur divers types de terrains (sol du laboratoire, terrain granulé, terrain couvert de neige, de boue, et terrain d'eau stagnante). Les résultats obtenus ont montré que la commande optimale (voir 4.3.2) est stable et indépendante de la vitesse de translation, alors que la commande par placement de pôles est moins stable pour des grandes vitesses de translation. Nous donnons ci-dessous quelques résultats à titre illustratif.

4.6.1 Commande par placement de pôles

Dans un premier test, voir figure 4.12.a, le véhicule est initialement placé à une distance de 87 cm de la paroi, alors que la distance latérale désirée est 75 cm. Soit une erreur latérale de 12 cm par rapport à la distance latérale désirée à la paroi. La vitesse du véhicule étant de 0.5 m/s, on peut voir la figure 4.12.a qu'au bout d'un mètre (2 secondes), l'erreur est réduite à zéro et reste dans une zone de stabilité de ± 2 cm. La figure 4.12.b illustre la convergence de l'erreur latérale en fonction de la distance parcourue le long de la paroi.

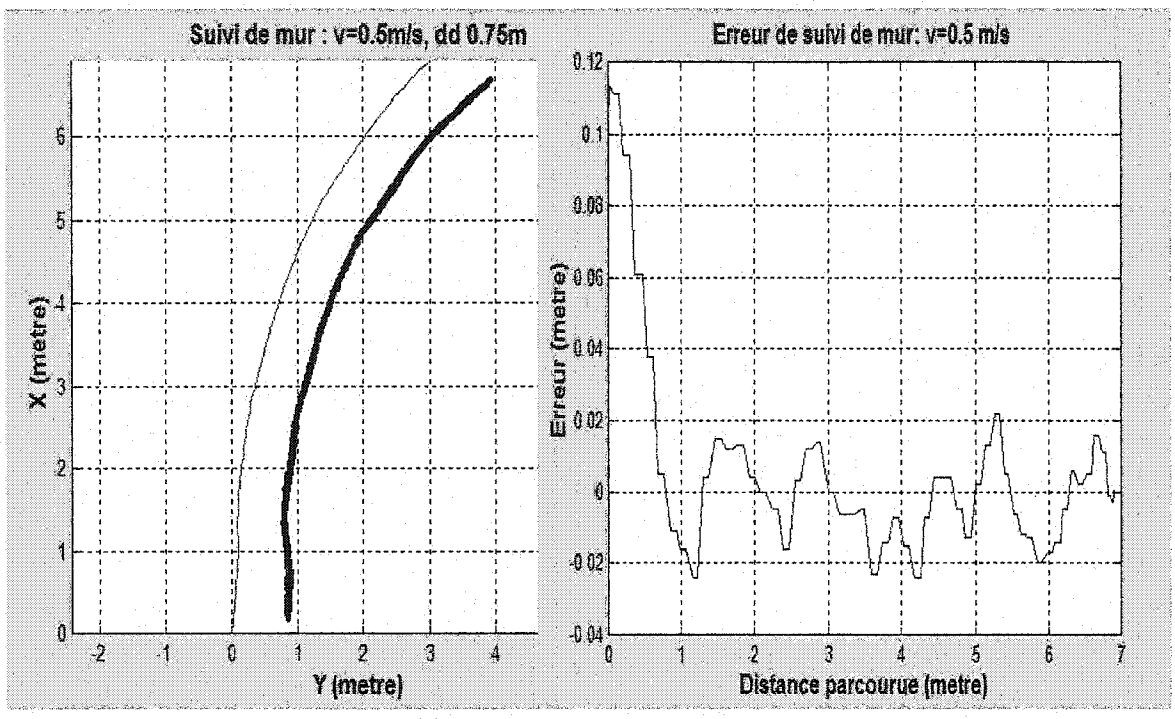


Figure 4.12.a Suivi de paroi à 0.5 m/s

Figurer 4.12.b Erreur latérale à 0.5 m/s

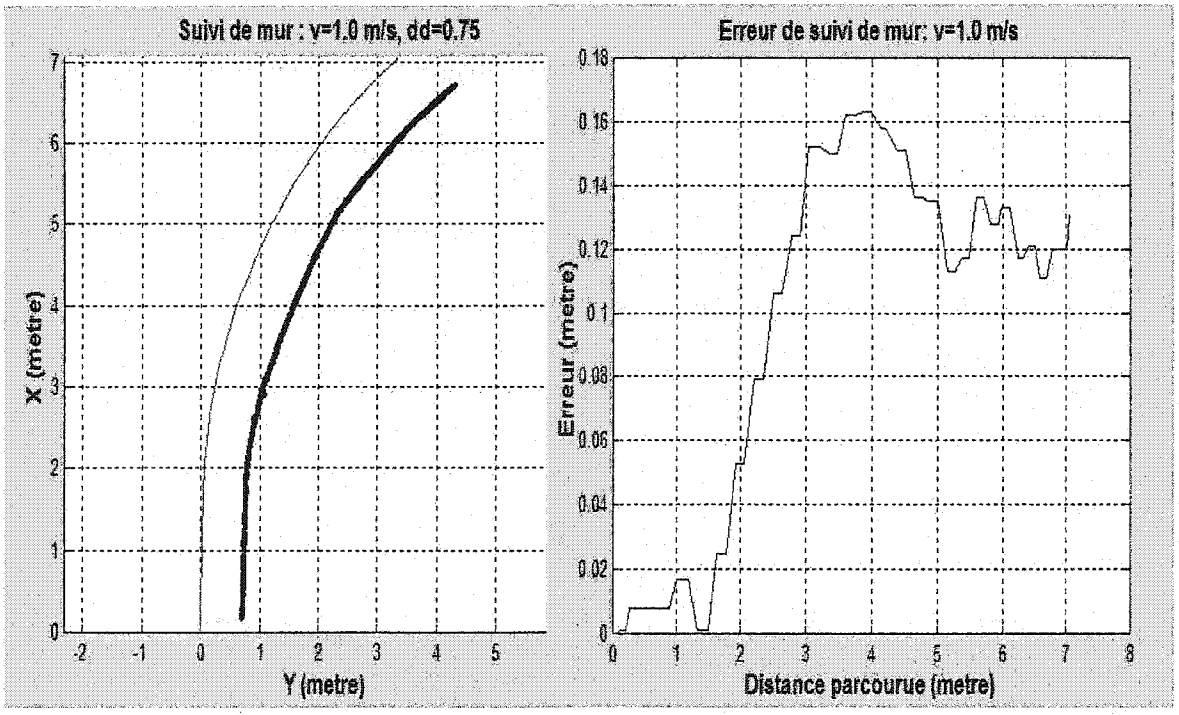


Figure 4.13.a Suivi de paroi à 1.0 m/s

Figurer 4.13.b Erreur latérale à 1.0 m/s

Dans le second test, voir figure 4.13, le véhicule est placé cette fois ci à une erreur latérale négligeable (3.6 cm) avec une vitesse un peu plus grande de 1.0 m/s. On peu voir à travers les figures 4.13.a et 4.13.b que l'erreur latérale augmente lentement sans toutefois diverger.

4.6.2 Commande optimale

La commande optimale a été testée ici dans le même environnement que les tests présentés ci haut. Premièrement, voir figure 4.14.a, le véhicule est placé cette fois ci à une distance initialement approximative de la distance latérale désirée, soit 75 cm de la paroi. La vitesse du véhicule étant de 0.5 m/s, on peut voir à travers les figures 4.14.a et 4.14.b que l'erreur latérale est stable au tours de ± 4 cm, ce qui est une erreur négligeable par rapport à la taille du véhicule.

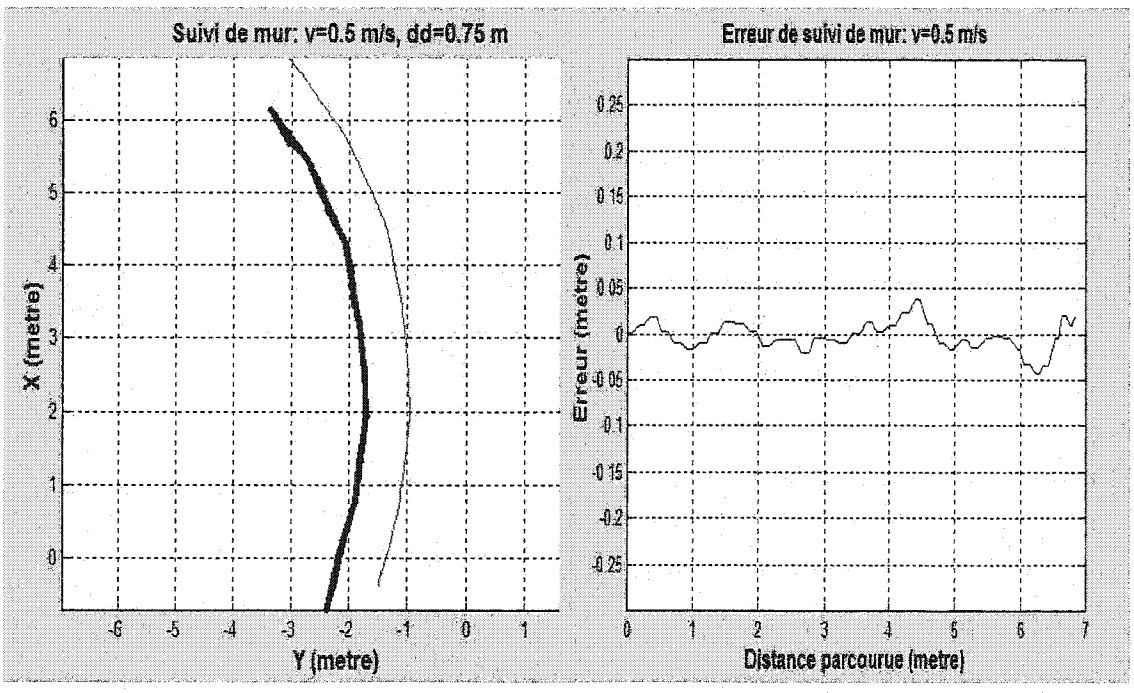


Figure 4.14.a Suivi de paroi à 0.5 m/s

Figurer 4.14.b Erreur latérale à 0.5 m/s

Dans le second test de la commande optimale, voir figure 4.15.a, le véhicule est initialement placé à une distance de 107 cm de la paroi, alors que la distance latérale désirée est 75 cm. Soit une erreur latérale de 32 cm par rapport à la distance latérale désirée du paroi. La vitesse du véhicule est de 1.0 m/s, on peut voir dans figure 4.15.a qu'au bout de deux mètres (2 secondes), l'erreur latérale est réduite à une petite valeur négligeable et reste stable dans une zone de ± 4 cm. La figure 4.15.b illustre la convergence de l'erreur latérale en fonction de la distance parcourue le long de la paroi.

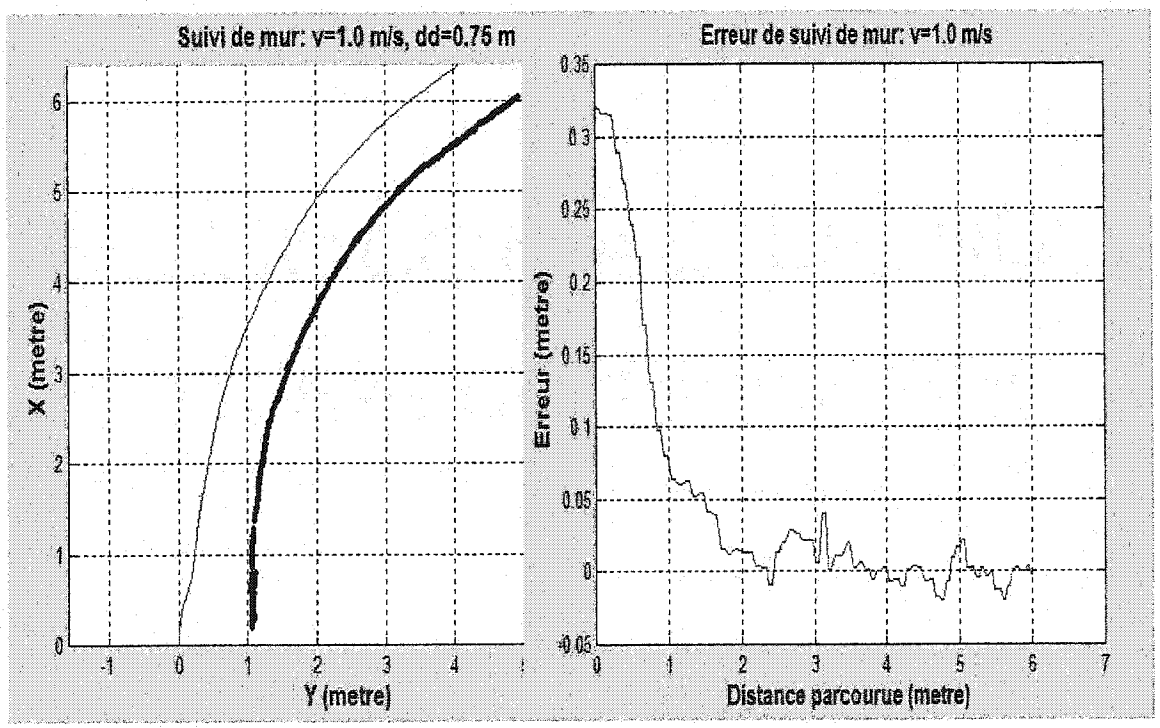


Figure 4.15.a Suivi de paroi à 1.0 m/s

Figurer 4.15.b Erreur latérale à 1.0 m/s

4.6.3 Synthèse de résultats d'expérimentation

Le contrôleur de mouvements présentés ci-dessus a été testé de façon répétitive et intensive en laboratoire et dans une mine souterraine de Noranda tant pour le suivi de chemins que pour le suivi de parois. Les résultats des nos multiples expériences nous ont permis de remarquer ce qui suit:

- La commande par placement de pôles développée dans cette thèse est stable et converge vite pour les vitesses inférieures ou égales à 0.5 m/s, acceptable pour des vitesses comprises entre 0.6 et 0.8 m/s et à peine acceptable pour des vitesses proches de 1.0m/s. Les figures 4.12 et 4.13 confirment ces hypothèses. Elle est cependant instable pour à de grande vitesse, c'est-à-dire pour des vitesses supérieures à 1.0 m/s (la vitesse maximale du véhicule étant de 1.5 m/s).

- La commande optimale basée sur la minimisation d'un coût quadratique est stable et converge vite pour toute valeur de vitesse. Ces affirmations découlent de nos expériences et sont appuyées par les figures 4.14 et 4.15. L'indépendance vis à vis de la vitesse de translation se justifie mathématiquement par la présence du facteur de pondération v^2 dans l'expression de la fonction de coût (4-3-34). Le corollaire mathématique (KARIM, 1993), associée à cette fonction, affirme que le temps de convergence est d'autant plus court que la vitesse de translation v est grande. Les paramètres q et s dans la loi de commande (4-3-38) correspondent respectivement à

l'amortissement de la trajectoire du robot ($q = 0$ représente l'amortissement critique) et au facteur influençant la distance à parcourir avant la convergence de l'erreur latérale à zéro. Cette distance est plus grande si s est petit. Les deux lois de commande considérées pour le suivi de parois et de chemins, possèdent la propriété d'être insensible aux conditions initiales et robuste vis à vis des perturbations agissant sur le système et les erreurs de modélisation. La deuxième loi de commande est utilisée par défaut pour la locomotion du véhicule dans le reste de cette thèse. Ce choix est guidé par les avantages qu'elle présente par rapport à la commande par placement de pôles.

- Le guidage du véhicule par le suivi de cibles local dans l'intersection proposé dans cette thèse permet d'apporter une solution au problème de guidage d'un véhicule autonome dans les intersections. Il a été démontré dans la section 4.5.2.1 et dans ASTOLFI (1995) que la loi de commande (4-5-5) permet de conduire le véhicule à toute pose désirée quelque soit l'angle α (voir figure 4.10). Les expériences en laboratoire ont montré que la solution proposée n'est pratique que pour les angles $|\alpha| \leq \pi/6$. Cette limitation est due à l'insuffisance d'informations télémétriques sur les cibles pour les grandes valeurs de $|\alpha|$.

Chapitre 5 : Localisation par la mise en correspondance

5.1 Introduction

Rappelons que, le système intégré proposé doit permettre à un véhicule d'exécuter des missions globales de navigation à l'aide d'une carte de l'environnement préalablement construite par le véhicule lui-même. Pour ce faire, il est nécessaire que le véhicule utilise des repères pour se localiser par rapport à sa carte. Ces repères peuvent être naturels ou artificiels. Dans notre cas, il s'agit de repères naturels qui sont les baies et les intersections de galeries rencontrées dans l'environnement du véhicule (*cf.* Chap. 3).

La capacité de localisation requiert des solutions aux problèmes suivants:

- la détection des repères (ceci permet la localisation topologique du véhicule),
- la mise en correspondance entre repères sur la carte et repères détectés en ligne (ceci permet la localisation métrique du véhicule dans un repère global).

Le premier problème, c'est à dire la détection de repères, a été traité au chapitre trois (§3.5). Dans cette section, nous développerons une approche de mise en correspondance

des repères connus *a priori* (ceux de la carte) avec les repères détectés en ligne (pendant l'exécution des missions) pour des fins de localisation métrique du véhicule. Spécifiquement, nous traitons le problème de la localisation en utilisant le profil local de l'environnement capté par un télémètre laser. Il s'agit d'un problème similaire à celui discuté dans COX (1991) et GONZALEZ (1992). Contrairement à COX et à GONZALEZ qui supposent que l'environnement est polygonal (structuré) et exigent que l'erreur de positionnement à corriger soit faible pour assurer la convergence, nous considérons des cas plus généraux : environnements (2D) arbitraires (non nécessairement polygonaux, structurés ou non et connus a priori ou non) et pouvant tolérer une grande erreur dans l'estimation de la position initiale du véhicule.

5.2 Problème et solutions alternatives

Appelons « *profil* » une séquence de points, obtenu à partir de la pose du véhicule et des mesures télémétriques représentant le contour 2D d'un environnement local du véhicule. Ainsi, on peut écrire :

$$\begin{cases} S = \{P, S_l\} \\ S_l = \{s_0, s_1, \ldots, s_i, \ldots, s_n\} \end{cases} \tag{5-1}$$

où

- S représente un profil,

- $P=(X,Y,\theta)$ est la pose du capteur télémétrique dans repère global (si capteur télémétrique est physiquement attaché au véhicule, alors P peut être déduite de la pose du véhicule).
- S_1 représente les mesures télémétriques dans le repère du capteur télémétrique.
- le couple $s_i=(\rho_i,\alpha_i)$ est une mesure télémétrique avec ρ_i est la distance mesurée par le télémètre laser entre P et un objet (obstacle) dans l'environnement et α_i est la direction correspondante,
- n (égal à 181 dans notre cas) est le nombre total de couples ordonnés s_i.

Supposons que le véhicule se déplace dans un environnement statique. À la pose P_{ref} (que nous considérons comme *pose de référence*), il prend un profil S_{ref} (que nous considérons comme *profil de référence*). Et il se déplace jusqu'à une nouvelle pose P_{reel} et prend un nouveau profil S_{reel} (que nous appellerons *image*). La pose P_{reel} est généralement fournie par l'odométrie du véhicule, mais est entachée d'erreurs à cause du glissement des roues du véhicule. Par conséquent, le profil S_{reel} est aussi entaché d'erreur. Notre tâche est de trouver la translation et la rotation relatives entre la pose P_{ref} et la pose P_{reel} en superposant les profils S_{ref} et S_{reel}.

Ainsi, le problème de la *mise en correspondance* peut être défini comme suit : En supposant que l'image S_{reel} soit prise à la pose P_{odo}, estimée de P_{reel} par odométrie,

déterminer la rotation θ et la translation $t_{x,y}$ à appliquer à S_{reel} pour qu'après la transformation S_{reel} coïncide avec S_{ref}.

On appelle *recalage* ou *registration* la détermination de la matrice de transformation $T(\theta,t_x,t_y)$ entre les deux systèmes de coordonnées définissant les deux profils S_{ref} et S_{reel}. Cette matrice $T(\theta,t_x,t_y)$ permet de déterminer la valeur exacte de la pose P_{reel}.

Il se dégage des travaux réalisés en robotique mobile pour la résolution de cette problématique deux approches principales qui se distinguent par le degré d'analyse appliquée aux mesures sensorielles 2D (qui dans les deux cas proviennent d'un télémètre balayant la scène dans un plan parallèle au sol) : l'*approche iconique* et l'*approche basée sur des primitives*.

5.2.1 Approche iconique

Cette approche, dite *iconique*, exploite directement les points formant le profil télémétrique (profil) capté, pour la localisation du véhicule. Dans la littérature, nous pouvons citer les travaux de COX (1991), de GONZALEZ (1992) et NSASI (2002) qui ont utilisé l'approche iconique pour la localisation du véhicule. Dans ces travaux, le véhicule possède une carte qui décrit les structures saillantes dans l'environnement sous forme de segment de droites. Le positionnement part d'une valeur approximative de la pose du véhicule fournie par l'odométrie.

L'algorithme de base de l'approche iconique peut se résumer comme suit :

- Classification des points de profil instantané pour les associer aux segments de la carte selon le critère de distance euclidienne e_i minimale entre point et segment (ou droite infinie);
- Calcul d'une correction $P_{corr}(\Delta x, \Delta y, \Delta\theta)$ de la pose initiale $P_{odo}(x, y, \theta)$ qui minimise globalement la somme, S, pondérée sur les distances e_i entre les segments et leurs points associés
- Application de $P_{corr}(\Delta x, \Delta y, \Delta\theta)$ et recalcul de la somme S; si S est toujours grand, retourner à la première étape.

5.2.2 Approche basée sur des primitives

Dans la seconde approche, on applique une analyse préalable aux points de profils télémétriques, pour en extraire des primitives (formes polygonales) de même type que la carte de l'environnement. Les primitives couramment utilisées sont des segments de droite, coins et les contours d'objets typiques d'un milieu structuré. L'extraction des primitives requiert un raisonnement et des outils de calcul en général plus sophistiqués que dans l'approche iconique. En revanche, le niveau supplémentaire d'analyse sensorielle apporte une réduction de l'espace de recherche dans la classification des observations et permet au processus de localisation d'exploiter davantage les connaissances sur l'environnement. Dans la littérature, nous pouvons citer les travaux de SHAFFER (1992), BORTHWICK (1994) et BULATA (1996).

L'algorithme de base de cette approche comprend les étapes suivantes :

- Prédiction des structures à observer dans l'environnement, à partir de la carte et du déplacement du véhicule mesuré par l'odométrie.
- Extraction de formes polygonales du profil capté à la nouvelle position du véhicule.
- Mise en correspondance des formes détectées (observations) avec celles de la carte (modèle), selon des critères de proximité et de cohérence géométrique.
- Correction de la pose du véhicule mesurée par l'odométrie.

5.3 Notre approche de localisation référencée carte

Nous avons opté pour l'approche iconique pour les raisons suivantes : l'effort de prétraitement d'image est minimal, la modélisation de l'image à chaque itération n'est pas requise et l'estimation de la pose est assez plus précise que dans l'approche basée sur les primitives (COX, (1991), SHAFER, (mai 1992); GUTMANN, (1996); DEBANNÉ, (2000)).

L'approche proposée permet de localiser le véhicule en trois étapes telle qu'illustré dans la figure 5.1 : le prétraitement de la correspondance, la mise en correspondante et le positionnement du véhicule par rapport à la carte.

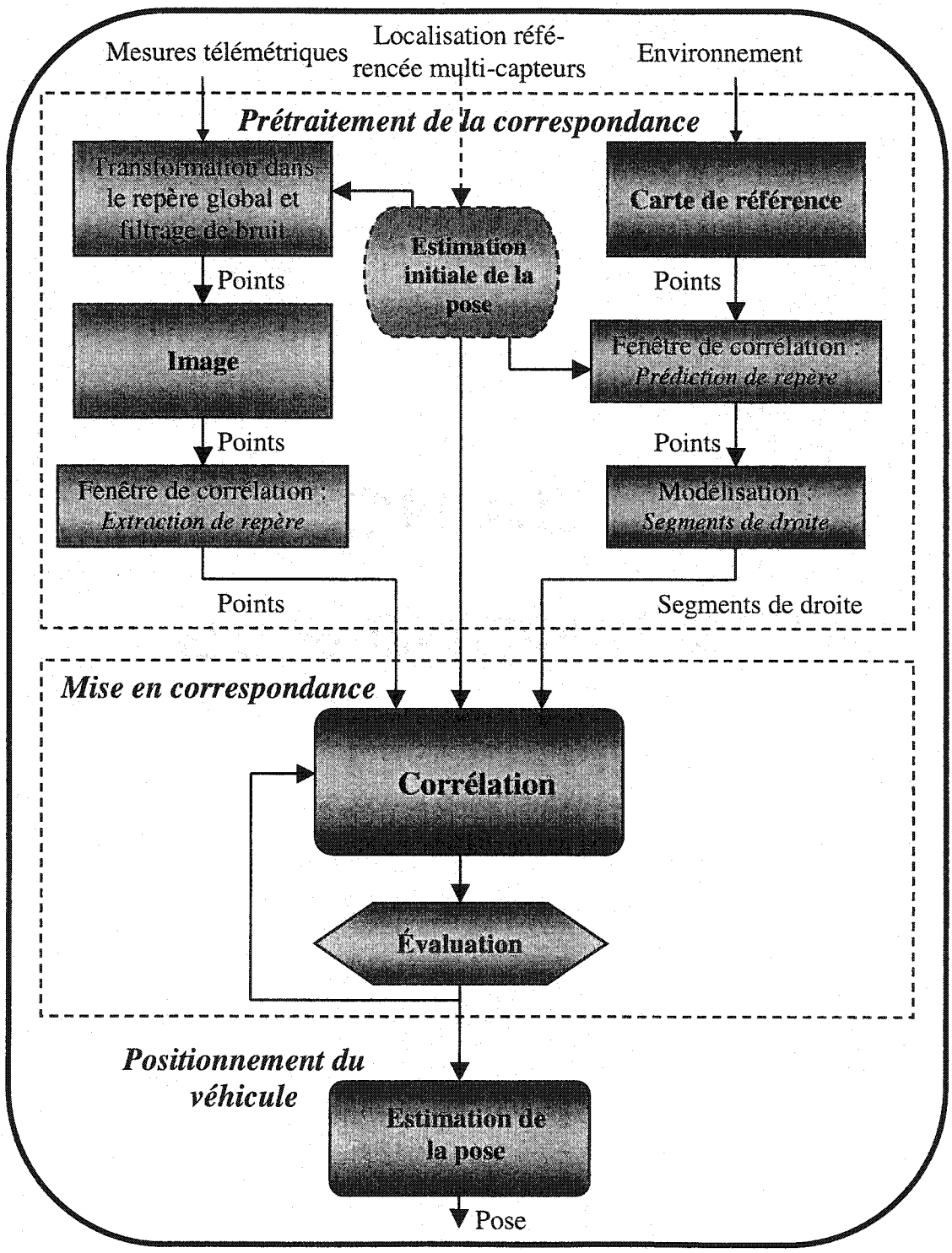


Figure 5.1 Localisation par mise en correspondance

5.3.1 Prétraitement de la correspondance

Le prétraitement de la correspondance est constitué des étapes suivantes :

- ***Détermination de la position initiale du véhicule.***

  La position initiale est fournie par la localisation référencée multi-capteurs proposée à la section 3.3 au lieu de l'odométrie pure. Ceci réduit l'erreur de positionnement à corriger par la mise en correspondance et permet : (1) de minimiser le temps et les efforts de la mise en correspondance; (2) de réaliser en temps réel la mise en correspondance. (3) de pouvoir effectuer fréquemment la correction de pose par mise en correspondance.

- ***Génération de l'image à partir des mesures télémétriques.***

  Soit un couple $s_i = (\rho_i, \alpha_i)$ représentant une mesure du télémètre laser sur l'environnement immédiat du véhicule, où $i \in [0,180]$ dans notre cas, ρ_i est la distance du télémètre à un objet de l'environnement et α_i est la direction correspondante (cf. Figure 5.2). La figure 5.2 précise les systèmes de coordonnées ainsi que l'indexation qui sont utilisés dans la suite. Comme le télémètre est monté sur un robot mobile, trois systèmes de coordonnées sont utilisés :

  (1) Un système de coordonnées global dont l'origine et l'orientation sont fixes pour un environnement; les coordonnées portent la lettre *w* en indice.

(2) Un système de coordonnées du robot dont l'origine est au centre cinématique du robot et dont l'axe des *x est* orienté dans le sens du déplacement; les coordonnées portent la lettre *r* en indice.

(3) Un système de coordonnée du laser dont l'origine est au centre du télémètre laser et l'axe des *x est* orienté dans le sens de ρ_0 ; les coordonnées portent la lettre *l* en indice.

En utilisant la terminologie ainsi définie, la matrice de transformation du repère du robot au repère global, étant donnée la pose du robot $R_w = [Rx_w, Ry_w, R\theta_w]$ par rapport au repère global, est :

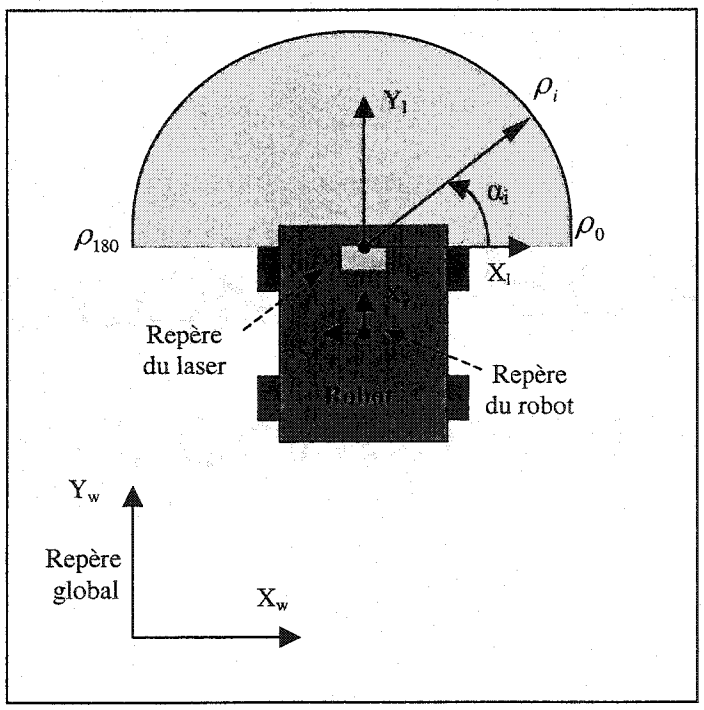


Figure 5.2 Systèmes de coordonnées

$$T_{rw} = \begin{bmatrix} \cos(R\theta_w) & -\sin(R\theta_w) & Rx_w \\ \sin(R\theta_w) & \cos(R\theta_w) & Ry_w \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}1a)$$

Étant donné la pose du télémètre laser $L_r = [Lx_r, Ly_r, L\theta_r]$ par rapport au repère du robot, la matrice de transformation du repère du laser au repère du robot est :

$$T_{lr} = \begin{bmatrix} \cos(L\theta_r) & -\sin(L\theta_r) & Lx_r \\ \sin(L\theta_r) & \cos(L\theta_r) & Ly_r \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}2)$$

Ainsi, soit un point $P_l = [x_l, y_l]^t$ exprimé dans le repère du télémètre laser, son correspondant en coordonnées globales sera :

$$P_w = \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} = T_{rw}.T_{lr}.\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5\text{-}3)$$

où $x_l = \rho_i.\cos(\alpha_i)$ et $y_l = \rho_i.\sin(\alpha_i)$.

Après filtrage et transformation au repère global d'un profil, on obtient ensuite l'image.

- ***Définition de la fenêtre de corrélation.***

La fenêtre de corrélation est un filtre qui délimite la zone d'intérêt de la carte et de l'image pour la corrélation. Plus formellement, cette zone est décrite par :

$$G_{corr}(X) = G(X), \quad pour \quad X = (x, y)', x_1 \le x \le x_2, y_1 \le y \le y_2 \quad (5\text{-}4)$$

où X est le vecteur des coordonnées de l'image (carte), les scalaires x_1, x_2, y_1 et y_2 sont des frontières de la fenêtre de corrélation. ($G_{corr}(X)$ est sous-image de G(X)).

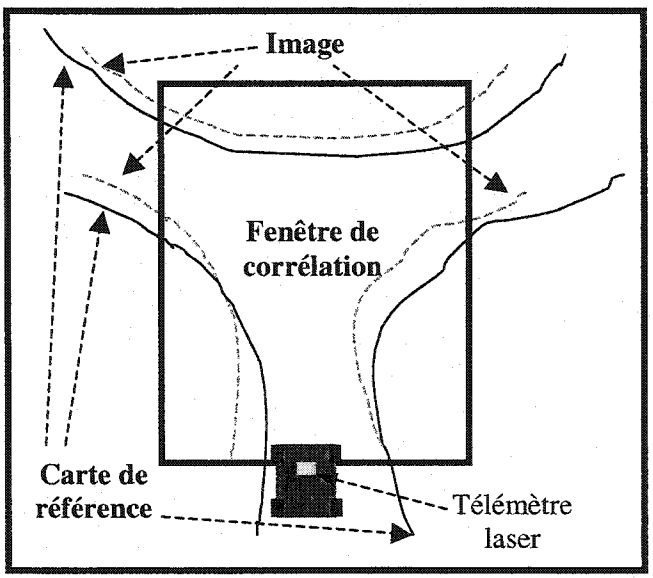


Figure 5.3 Fenêtre de corrélation

- ***Modélisation de la carte de référence en segment de droites.***

Rappelons que l'approche iconique a été initialement proposée dans COX (1991). Celui-ci exige que l'environnement du véhicule soit polygonal et que l'erreur du positionnement soit faible. Afin d'adapter cette approche à divers types d'environnement, nous avons ajouté au système la capacité de paramétriser (modéliser) la carte de référence, initialement constituée de points, en segments de droite. Pour ce faire, nous avons choisi d'utiliser la représentation de droite suivante :

$$x\cos\theta + y\sin\theta - \lambda = 0 \tag{5-5}$$

Cette représentation permet d'éviter les singularités produites par les droites verticales et horizontales que causent les représentations usuelles du type $y = mx + b$ (ou $x = ky + p$). Un autre avantage de cette représentation est la simplification de

calcul de la distance d'un point (x_p, y_p) à la droite. Cette distance est calculée comme suit :

$$dist_{lp} = \left| x_p \cos\theta + y_p \sin\theta - \lambda \right| \tag{5-6}$$

La figure 5.4 donne une représentation graphique des paramètres (λ, θ). Ainsi, une droite modélisant un ensemble de n points (x_i, y_i) alignés est définie par les paramètres λ (la distance normale de la droite à l'origine) et θ (la direction de la normale de la droite) qui minimise l'expression de l'erreur suivante :

$$E_{fit} = \sum_{i=1}^{n} (x_i \cos\theta + y_i \sin\theta - \lambda)^2 \tag{5-7}$$

En supposant que $n > 2$, nous obtenons alors un système d'équations sur-déterminé que nous pouvons résoudre par la technique de moindres carrés :

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \frac{-2S_{xy}}{S_{y^2} - S_{x^2}},$$

$$\lambda = \bar{x}\cos\theta + \bar{y}\sin\theta \quad \text{où}$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \ , \ \bar{y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i \ ,$$

$$S_{xy} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \ , \ S_{x^2} = \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2 \text{ et}$$

$$S_{y^2} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \bar{y})^2$$

Remarquons que les paramètres (λ, θ) décrivent une droite. Pour obtenir un segment de droite, le premier point et le dernier point doivent être projetés sur la droite pour avoir le point initial P_i et le point final P_f (voir figure 5.4).

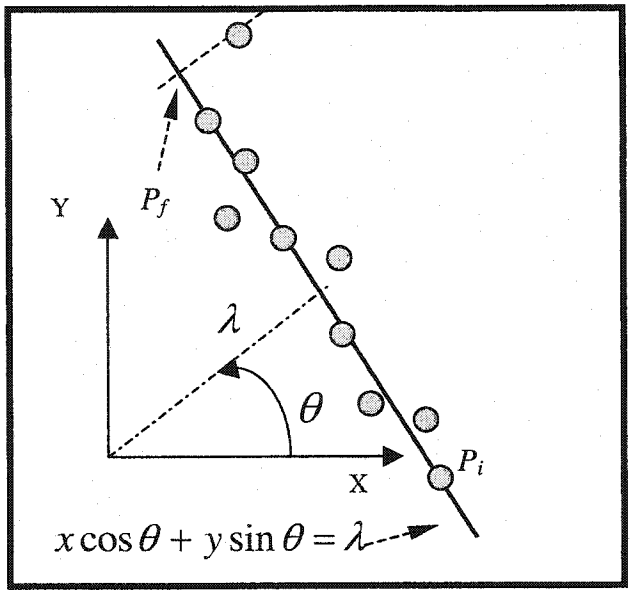


Figure 5.4 Modélisation d'un ensemble des points en un segment de droite.

Pour ajouter un nouveau point (x_i, y_i) sur une droite en construction, deux critères doivent être vérifiés : (1) la distance entre le nouveau point et le dernier ajouté à la droite doit être inférieure à un distance maximale permise entre deux points consécutifs dp_{crit} ;

$$\sqrt{((x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \leq dp_{crit} \tag{5-8}$$

et (2) la distance entre le nouveau point et la droite en construction doit être inférieure à une distance maximale permise dl_{crit}. D'après (5-6)

$$\left|x_i \cos\theta + y_i \sin\theta - \lambda\right| \leq dl_{crit} \tag{5-9}$$

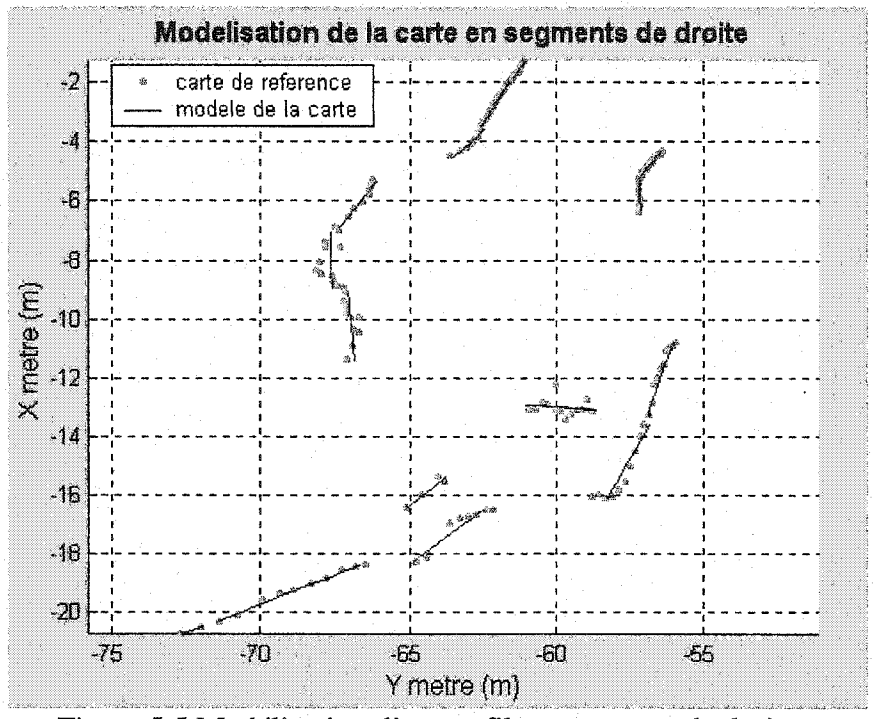


Figure 5.5 Modélisation d'un profil en segments de droites

La figure 5.5 illustre la modélisation d'un profil télémétrique en segments de droites.

- ***Projeter l'image de sorte que son centre de gravité coïncide avec celui de la carte de référence.***

Étant données la carte de référence et l'image, il est facile d'estimer leur centre de gravité respectif, ainsi que la matrice de transformation T projetant le centre de gravité de l'image au centre de gravité de la carte de référence.

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & xg_{ref} - x_{gimg} \\ 0 & 1 & yg_{ref} - yg_{img} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{5-9}$$

où $C=(xg_{ref}, yg_{ref})$ et $C_g=(xg_{img}, yg_{img})$ sont respectivement le centre de la carte de référence et de l'image. En appliquant cette transformation à l'image (voir figure 5.6.a), on obtient le résultat illustré à la figure 5.6.b. Remarquons que cette

transformation projette l'estimé de la pose initiale (P_{init}) du véhicule à la pose P_0 (voir formule (5-21)). La figure 5.6.c est le résultat après la mise en correspondance et l'image coïncide avec la carte de référence.

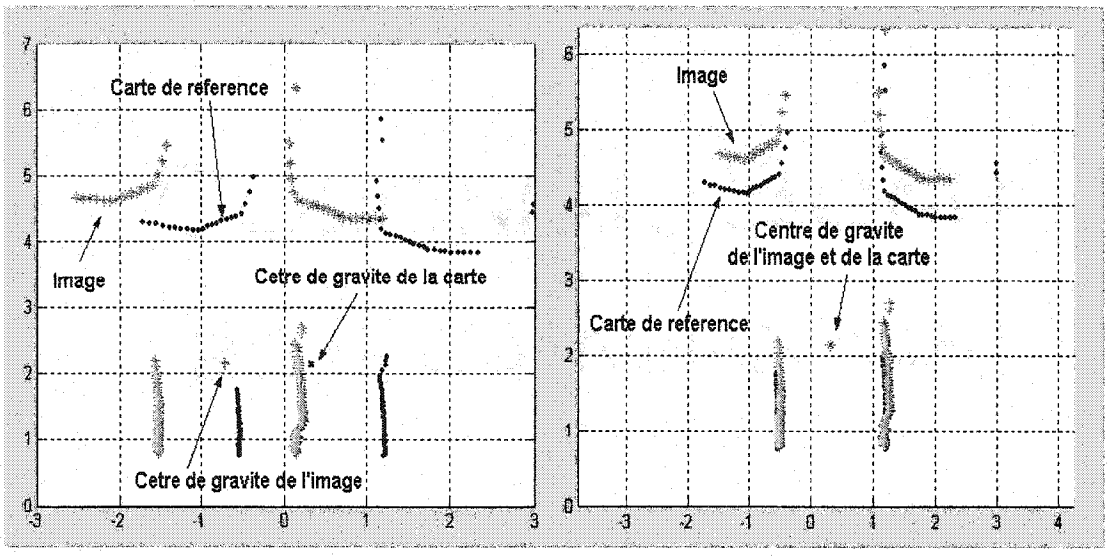


Figure 5.6.a Image initiale avant projection

Figure 5.6.b Projection de l'image

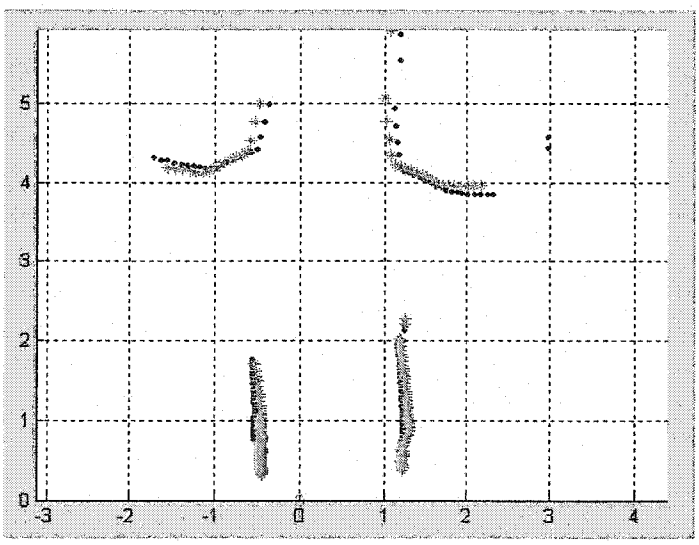


Figure 5.6.c Résultat après la mise en correspondance.

5.3.2 Mise en correspondance

Le processus de la mise en correspondance se fait en trois étapes :

- ***Assigner un « segment cible » pour chaque point de l'image.***

  Nous désignerons par « *segment cible* » d'un point de l'image le segment de droite du modèle de la carte de référence le plus proche du point. Ceci se fait en utilisant la formule (5-6).

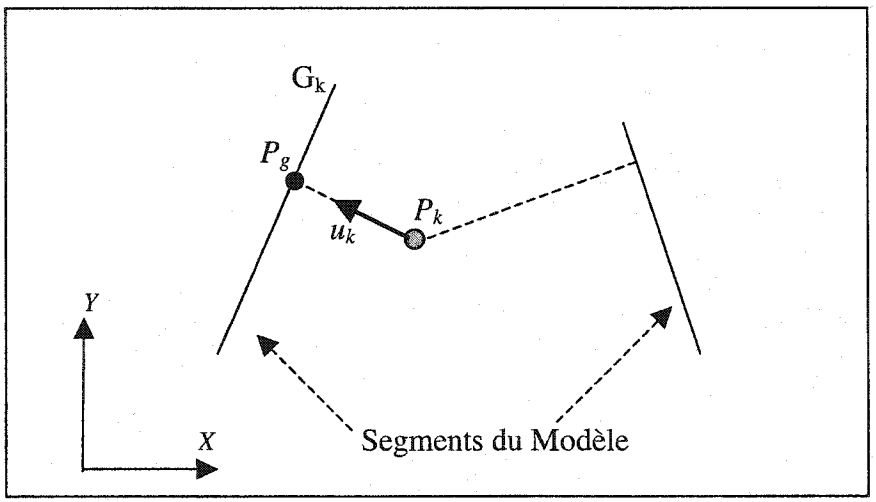


Figure 5.7 Détermination du segment cible

- ***Déterminer la rotation Φ et la translation $T=(t_x,t_y)^t$ optimales qui minimisent l'erreur entre la carte de référence et l'image.***

  Soit un triplet (t_x,t_y,Φ) décrivant la rotation d'un angle Φ, suivi de la translation T que doit subir l'image pour coïncider avec la carte de référence correspondante. Et soient encore $P_k=(x_{k1},y_{k2})^t$ le k^{ieme} point de l'image, G_k son *segment cible*, $u_k=(u_{k1},u_{k2})^t$ un vecteur unitaire passant par P_k, orthogonalement à G_k, la distance r_k le résultant du produit scalaire de P_g (le point d'intersection de G_k et u_k) avec u_k,

et C_g le centre de gravité de l'image (indice supérieur t signifie la transposée). Alors, la rotation du point P_k d'un angle Φ autour de C_g est donnée par :

$$R(\Phi)\left(P_k - C_g\right) + C_g \tag{5-10}$$

avec $$R(\Phi) = \begin{pmatrix} \cos\Phi & -\sin\Phi \\ \sin\Phi & \cos\Phi \end{pmatrix}$$

Après la linéarisation de premier ordre de $R(\Phi)$, la formule (5-10) peut être approximée comme suit :

$$\begin{bmatrix} 1 & -\Phi \\ \Phi & 1 \end{bmatrix}\left(P_k - C_g\right) + C_g \;=\; \Phi\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\left(P_k - C_g\right) + P_k \tag{5-11}$$

Et alors, la rotation du point P_k d'un angle Φ autour de C_g suivi de la translation T est obtenue par :

$$P_k' = R(\Phi)\left(P_k - C_g\right) + \left(T + C_g\right) \;=\; T + \Phi\begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}\left(P_k - C_g\right) + P_k \tag{5-12}$$

La distance (l'erreur) entre P_k' et son segment cible G_k est donnée par (COX, (1991)) :

$$b_k = \left[R(\Phi)\left(P_k - C_g\right) + \left(T + C_g\right)\right]^t u_k - r_k \tag{5-13}$$

Le triplet $\left(t_x, t_y, \Phi\right)$ optimal qui minimise la somme de carré des distances b_k entre les points d'image et leurs *segments cible* respectifs (n étant le nombre total de points dans l'image)

$$\min_{(T,\Phi)} S = \sum_{k=1}^{n} (b_k)^2 \tag{5-14}$$

peut être estimé par la technique des moindres carrés. Formulons les définitions suivantes (COX, (1991)):

$$\begin{cases} a_{k1} = u_{k1} \\ a_{k2} = u_{k2} \\ a_{k3} = u_k \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} (P_k - C_g) \\ X = (t_x, t_y, \Phi) \end{cases} \tag{5-15}$$

Ainsi, pour un point P_k, on a

$$(a_{k1} \quad a_{k2} \quad a_{k3})X \approx b_k \ ,$$

pour n points on aura :

$$AX \approx B \tag{5-16}$$

où $B = (b_1 \quad b_2 \quad \ldots \quad b_n)^t$ et A est une matrice d'ordre nx3 dont les lignes sont $(a_{k1} \quad a_{k2} \quad a_{k3})$. Enfin, le triplet optimal est :

$$\hat{X} = (\hat{t}_x, \hat{t}_y, \hat{\Phi}) = (A^t A)^{-1} A^t B \tag{5-17}$$

- ***Évaluation de la convergence et Transformation de l'image***

L'algorithme décrit ci-dessus est très robuste vis à vis des données incomplètes de l'image (WILLIAM, 1990), comme par exemple l'absence de certains points de la carte dans l'image. Cependant, il est très sensible au bruit. Pour le rendre robuste au bruit et en même temps minimiser le coût de calcul et accélérer la convergence, nous avons introduit *un filtre passe-bande* qui écarte, d'une part, les points P_k ayant une très faible contribution dans S (*cf.* formule (5-14) : somme des carrés des distances entre les points de l'image et leurs *segments cible* respectifs) pour accélérer la convergence et, d'autre part, les points P_k ayant de très grande contribution dans S

pour éliminer les bruits. Comme, on peut le remarquer, ce *filtre passe-bande* basé sur la moyenne permet de réduire le nombre n des points qui participent à la détermination de la translation T et de l'angle de rotation Φ optimaux qui font tendre S vers zéro ou vers une petite valeur acceptable.

L'algorithme converge si est seulement si, pour chaque itération t, la somme S diminue progressivement, c'est à dire :

$$\forall t > 0, \quad S(t) < S(t-1) \tag{5-18}$$

En cas de convergence, c'est-à-dire qu'après une itération t la variation de S est inférieure à la variation minimale spécifiée (E_{crit}):

$$\exists t, \quad \frac{S(t-1) - S(t)}{S(t-1)} < E_{crit}, \tag{5-19}$$

alors le processus de la mise en correspondance est terminé puis on intègre la position et l'orientation du véhicule tel que décrit à la section suivante (cf. §5.3.3). Sinon on transforme l'image en appliquant les résultats obtenus à l'étape précédante pour obtenir une nouvelle image constituée des points :

$$P'_k = R(\Phi)(P_k - C_g) + (T + C_g) \tag{5-20}$$

et on répète les trois étapes précédentes jusqu'à la convergence.

Remarque : en pratique, en plus de la condition (5-19), il est nécessaire de limiter le nombre d'itérations.

Les figures ci-dessous illustrent un exemple de carte de référence et d'image avant (figure 5.8.a), pendant (figure 5.8.b) et après (figure 5.9) la mise en correspondance.

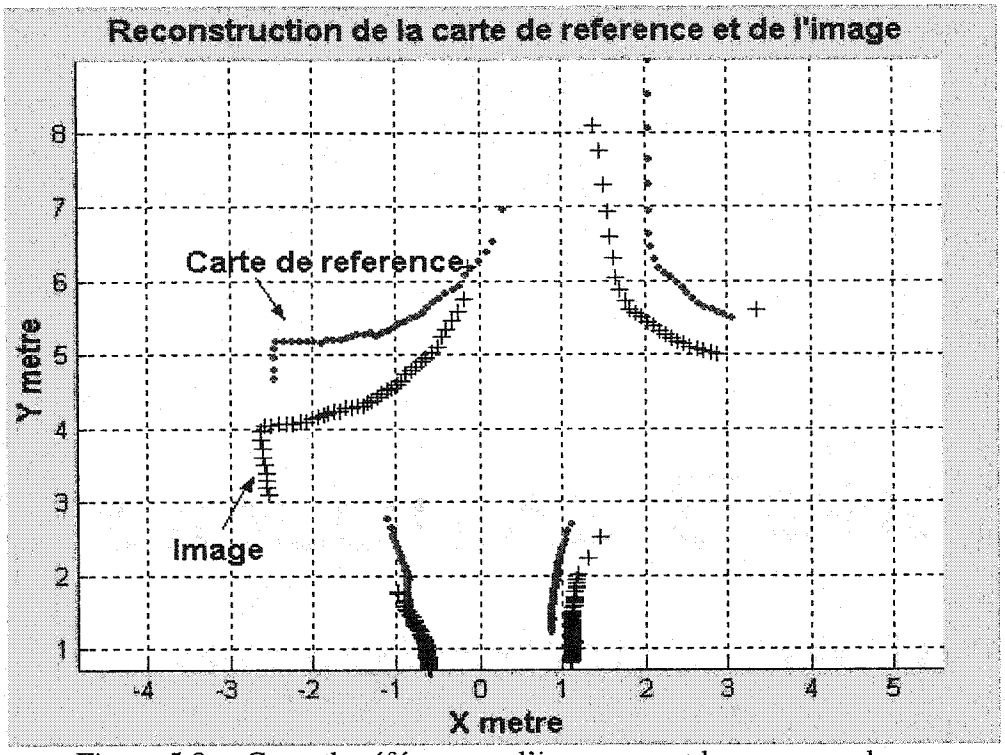


Figure 5.8.a Carte de référence et l'image avant la correspondance

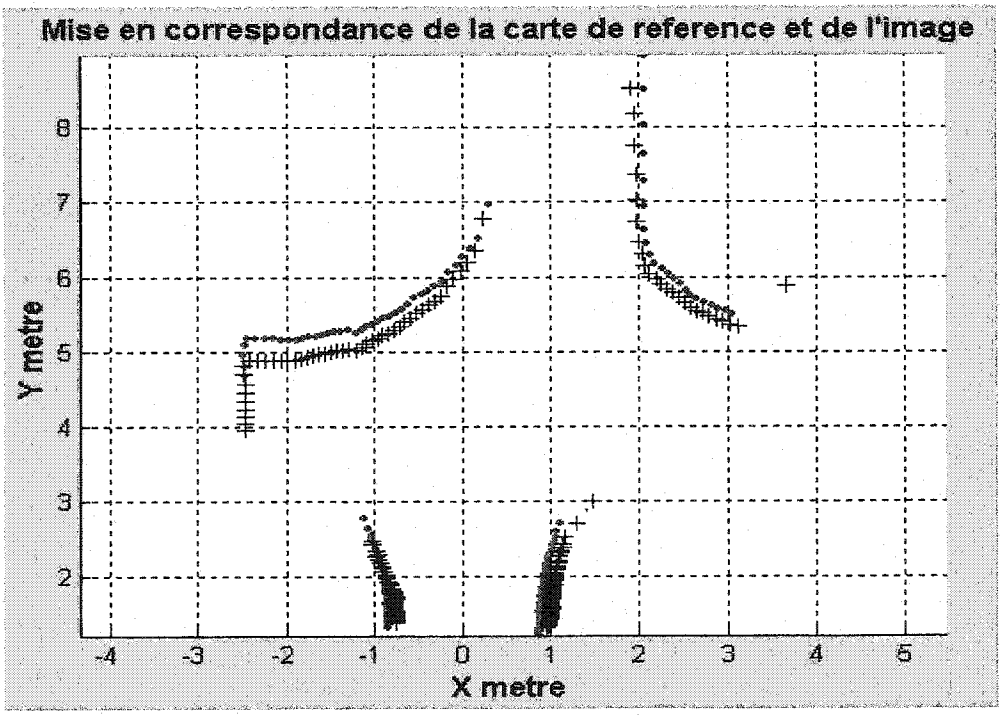


Figure 5.8.b Résultat intermédiaire de la correspondance

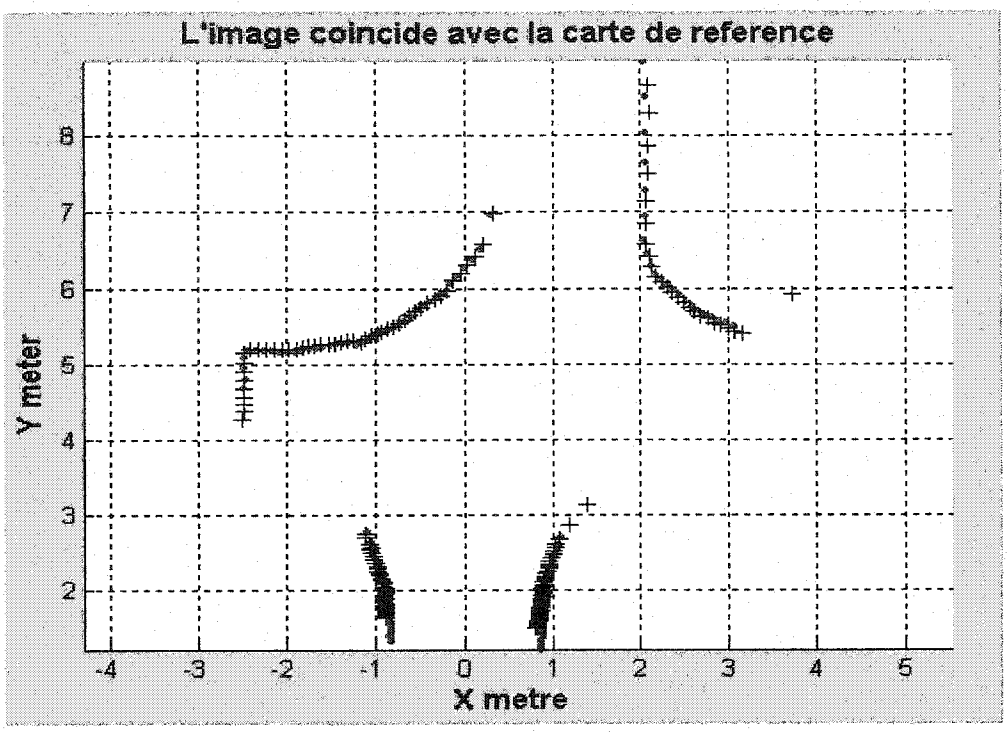


Figure 5.9 Résultat final de la correspondance

5.3.3 Positionnement du véhicule

La position et l'orientation réelles du véhicule sont calculées comme suit :

- ***Calculer la position et l'orientation réelles du véhicule***

  Le calcul de la pose du véhicule par rapport à la carte de référence se fait en intégrant les translations et rotations optimales (élémentaires) obtenues dans chaque itération. Ainsi :

$$P_{reel} = T_{m-1}.(T_{m-2}(...(T_1(\overbrace{T_0(P_0 - C_{g,0})}^{P_1} - C_{g,1})...) - C_{g,m-2}) - C_{g,m-1} \qquad (5\text{-}21)$$

où $T_t = \begin{pmatrix} \cos\Phi_t & \sin\Phi_t & t_x - xg_{img,t} \\ \sin\Phi_t & \cos\Phi_t & t_y - yg_{img,t} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, l'indice t=0, 1, 2, ..,*m-1*, *m* étant le nombre d'itérations effectuées et P_0 la projection de l'estimée de la pose initiale.

- ***Mis à jour de la position.***

  La pose obtenue ci-dessus est utilisée pour mettre à jour la pose estimée par l'odométrie.

5.4 Expérimentation et synthèse de résultats

5.4.1 Expérimentation

- ***Détermination de la position initiale du véhicule dans son environnement.***

La position et l'orientation initiales du véhicule sont déterminées par la mise en correspondance comme illustrée dans les figures 5.10 et 5.11. Dans la figure 5.10, la position initiale du véhicule est spécifiée par le superviseur (0.96m,-0.01m,-1.55deg) et cette position est ensuite corrigée (voir figure 5.11) par la mise en correspondance de la carte de référence et les mesures télémétriques courantes (image).

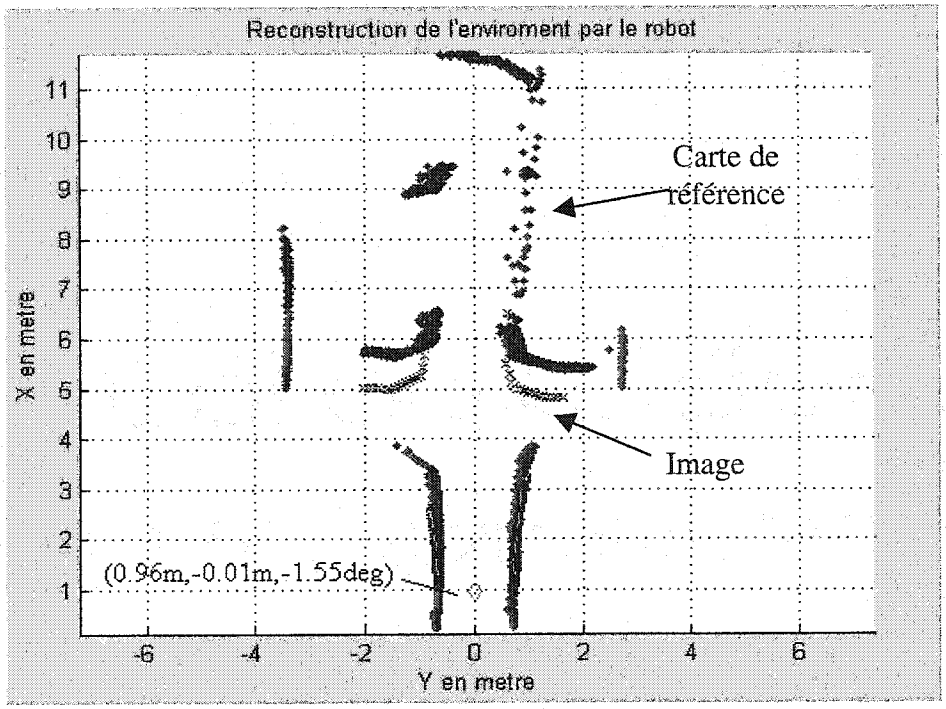


Figure 5.10 Position initiale spécifiée.

Dans la figure 5.11, l'image construite à partir des mesures télémétriques coïncide avec la carte de référence et la vraie position initiale de véhicule est obtenue (1.540 m, -0.003 m, -0.023 deg). L'image avant la mise en correspondance est aussi présente à titre d'illustration.

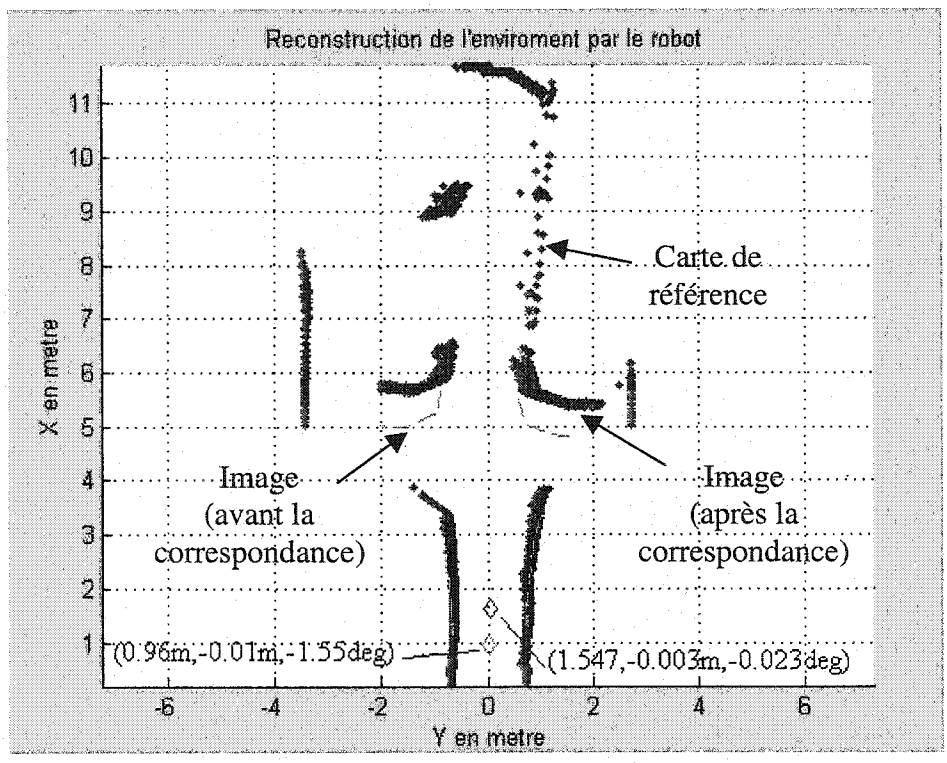


Figure 5.11 Correction de la position initiale.

- ***Localisation du véhicule pendant le mouvement***

Comme nous l'avions déjà mentionné, la position et l'orientation fournies par les senseurs internes sont fiables pour de courtes distances. Les erreurs des senseurs internes augmentent sans limite dans le temps (pour le gyroscope) et en fonction de distance parcourue (pour l'odométrie). Pour un véhicule autonome navigant de longues distances, il est nécessaire de corriger (occasionnellement) ces erreurs à l'aide de senseurs externes (télémètre laser dans notre cas) et des techniques de localisation absolues (mise en

correspondance dans notre cas). Les figures ci-dessous illustrent les résultats de notre approche de localisation à l'aide de carte de référence. Le tableau 5.1 montre les résultats de la mise en correspondance le long d'une galerie de mine souterraine illustrée à la figure 5.12. Ces résultats, comme celui de tous le reste de tableau dans cette section, comprennent les corrections partielles de la pose (translation (t_x,t_y) et rotation Φ élémentaires) à chaque itération du processus de mise en correspondance et la pose du véhicule avant et après la mise en correspondance. La dernière colonne de tableaux montre la convergence d'erreur (la somme de carré des distances entre les points d'image et leurs *segments cible* (voir formule (5-14)).

Tableau 5.1. Résultats de la mise en correspondance le long de galerie de la mine souterraine (voir figure 5.12).

Itération	Translation élémentaire (t_x)	Translation élémentaire (t_y)	Rotation élémentaire (Φ)	Erreur
1	-0.6538 m	0.4227 m	-1.1597 °	79.9064
2	0.2325 m	0.8139 m	-0.7847 °	14.3953
3	-0.2143 m	-0.5211 m	-1.4446 °	14.0751
4	-0.2433 m	-0.5015 m	-1.4062 °	8.8693
5	-0.0239 m	-0.0514 m	0.0400 °	2.8440
6	0.0057 m	0.0045 m	-0.0955 °	2.8364

Position / orientation du véhicule avant la mise en correspondance			Position / orientation du véhicule après la mise en correspondance		
X (m)	*Y (m)*	*Θ (deg)*	*X (m)*	*Y (m)*	*Θ (deg)*
16.0250	-31.3960	-117.3200	15.2978	-31.3161	-122.0751

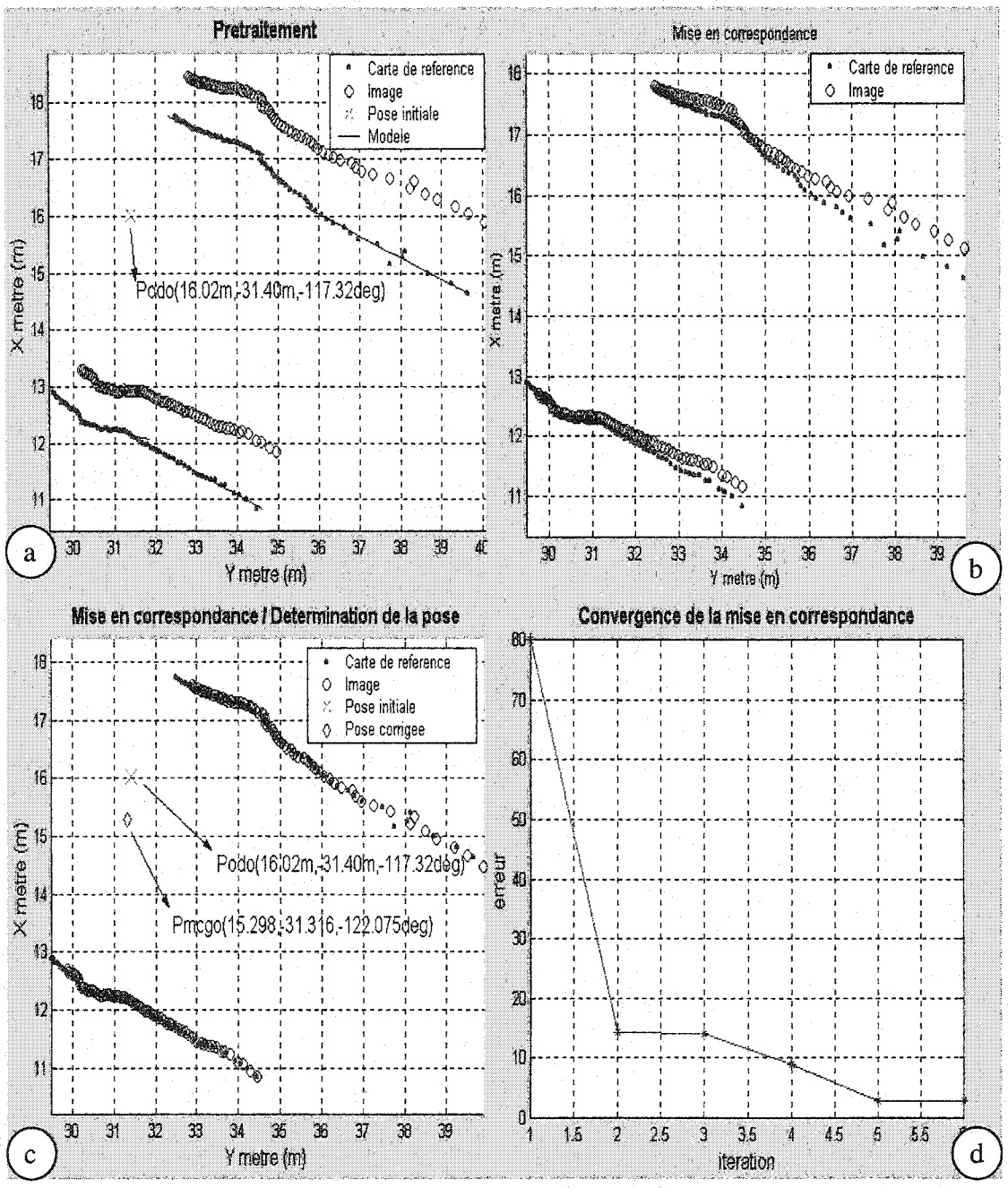


Figure 5.12 Mise en correspondance le long d'une galerie de mine souterraine : (a) Prétraitement : traitement de données et modélisation, (b) mise en correspondance : résultat intermédiaire, (c) l'image coïncide avec la carte et détermination de la pose et (d) convergence de l'erreur.

Le tableau 5.2 montre les résultats de la mise en correspondance près d'une baie de mine souterraine illustrée à la figure 5.13.

Tableau 5.2. Résultats de la mise en correspondance près de baie (voir figure 5.13)

Itération	Translation élémentaire (t_x)	Translation élémentaire (t_y)	Rotation élémentaire (Φ)	Erreur
1	-0.3894 m	0.7641 m	7.7181 °	102.8018
2	-0.1019 m	0.7358 m	1.0037 °	72.4656
3	0.2070 m	0.0406 m	-1.6179 °	38.2946
4	0.0025 m	0.4534 m	0.9697 °	39.0840
5	0.3719 m	0.0921 m	-2.7244 °	31.0440
6	-0.0733 m	0.7385 m	0.0340 °	21.0440
7	0.0577 m	-0.0857 m	-1.4548 °	23.4662
8	-0.056 m	-0.0595 m	-6.7884 °	20.9848

Position / orientation du véhicule avant la mise en correspondance			Position / orientation du véhicule après la mise en correspondance		
X (m)	*Y (m)*	*Θ (deg)*	*X (m)*	*Y (m)*	*Θ (deg)*
14.9350	-34.0030	-120.6660	14.5887	-31.0458	-116.7375

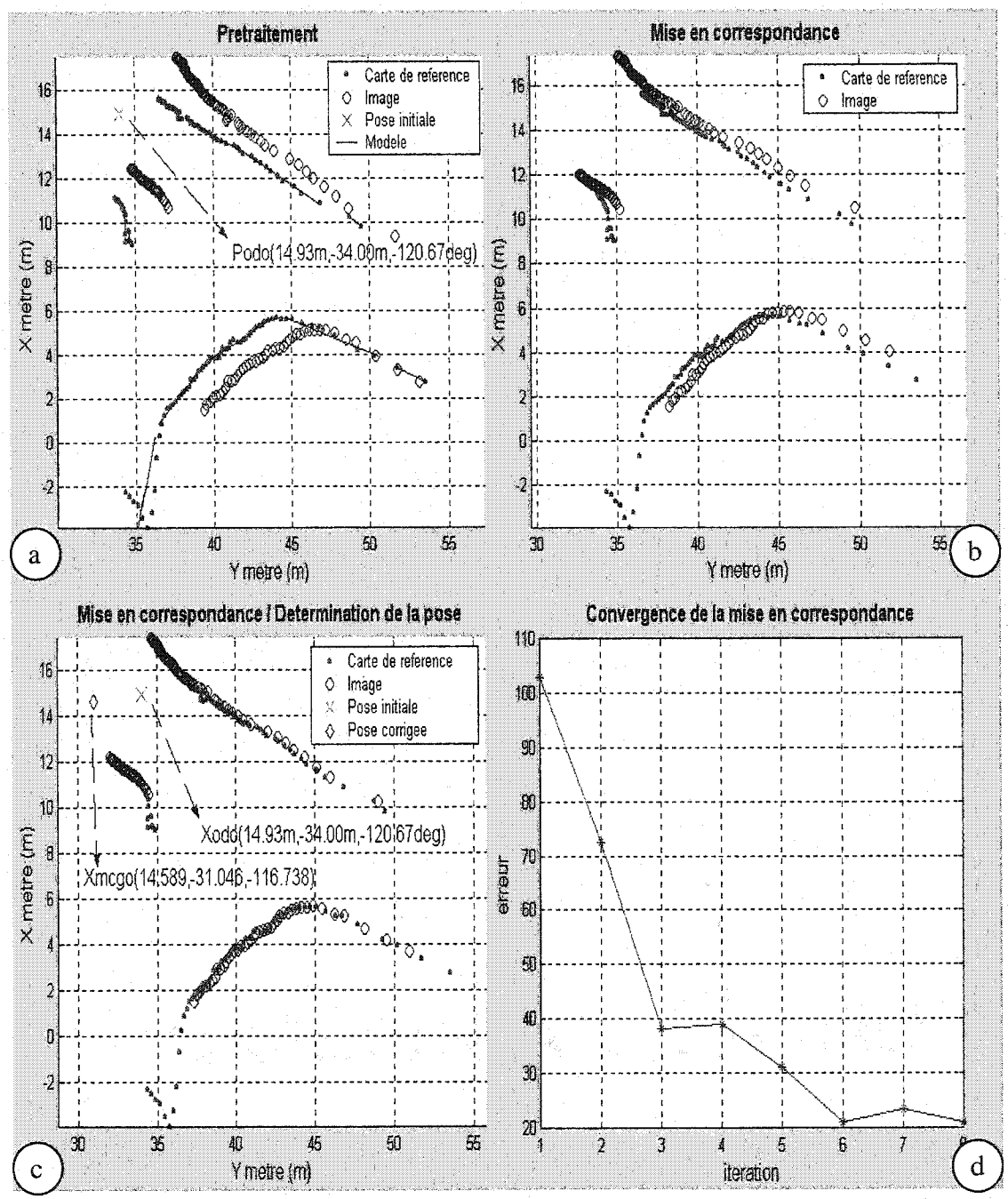


Figure 5.13. Mise en correspondance près d'une baie de mine souterraine : (a) Prétraitement : traitement de données et modélisation, (b) mise en correspondance :

résultat intermédiaire, (c) l'image coïncide avec la carte et détermination de la pose et (d) convergence de l'erreur.

Le tableau 5.3 montre les résultats de la mise en correspondance près d'une intersection en forme de « X » (voir figure 5.14)

Tableau 5.3. Les résultats de la mise en correspondance près d'intersection en forme de « X » (voir figure 5.14)

Itération	Translation élémentaire (t_x)	Translation élémentaire (t_y)	Rotation élémentaire (Φ)	Erreur
1	-0.2313 m	-0.2817 m	0.5921°	40.6189
2	-0.2767 m	-0.3251 m	0.4416°	37.1773
3	-0.2046 m	-0.2048 m	0.6328°	28.8395
4	-0.1190 m	-0.1240 m	1.0924°	22.1739
5	0.0447 m	0.0181 m	0.2752°	17.2302
6	-0.0320 m	-0.0105 m	-0.0450°	17.0093

Position / orientation du véhicule avant la mise en correspondance			Position / orientation du véhicule après la mise en correspondance		
X (m)	*Y (m)*	*Θ (deg)*	*X (m)*	*Y (m)*	*Θ (deg)*
-3.0750	-58.0480	-147.3090	-4.0534	-58.6875	-144.3496

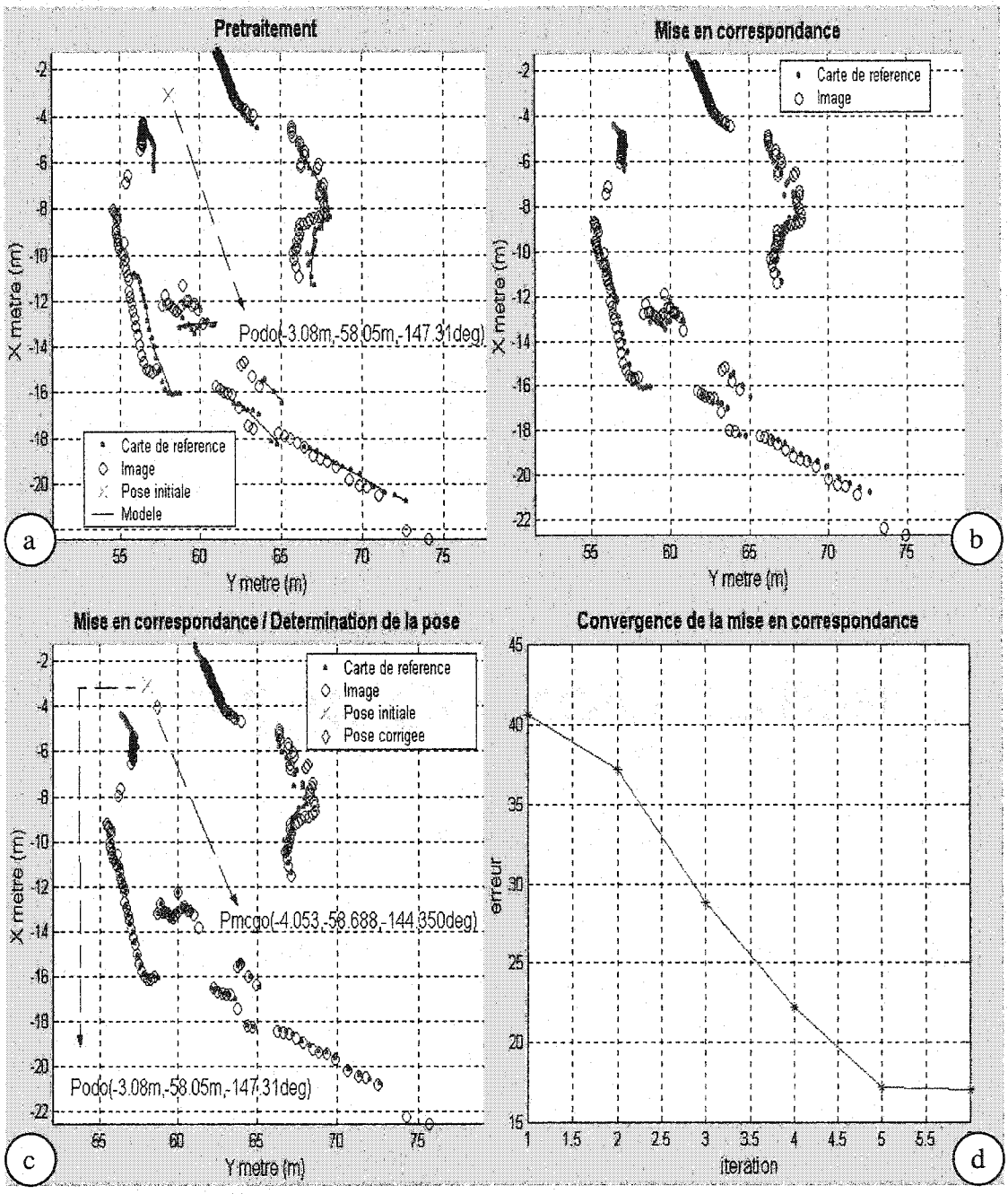


Figure 5.14. Mise en correspondance près d'une intersection de la mine souterraine : (a) prétraitement: traitement de données et modélisation, (b) mise en correspondance: résultat intermédiaire, (c) l'image coïncide avec la carte et détermination de la pose et (d) convergence de l'erreur.

Le tableau 5.4 montre les résultats de la mise en correspondance d'une intersection de mine souterraine illustrée à la figure 5.15.

Tableau 5.4. Les résultats de la mise en correspondance près d'intersection en forme de « T » (voir figure 5.15)

Itération	Translation élémentaire (t_x)	Translation élémentaire (t_y)	Rotation élémentaire (Φ)	Erreur
1	1.4125	-0.1715	-2.9155	97.1044
2	0.2398	0.1696	0.0994	23.2190
3	-0.0101	0.1554	-1.0344	21.9845
4	-0.0365	0.0327	-0.1572	19.3323
5	-0.0122	-0.0136	0.0839	17.9149
6	0.0281	0.0075	0.0517	17.8827

Position / orientation du véhicule avant la mise en correspondance			Position / orientation du véhicule après la mise en correspondance		
X (m)	*Y (m)*	*Θ (deg)*	*X (m)*	*Y (m)*	*Θ (deg)*
-43.9810	-73.2460	171.7840	-42.4368	-73.5261	167.8603

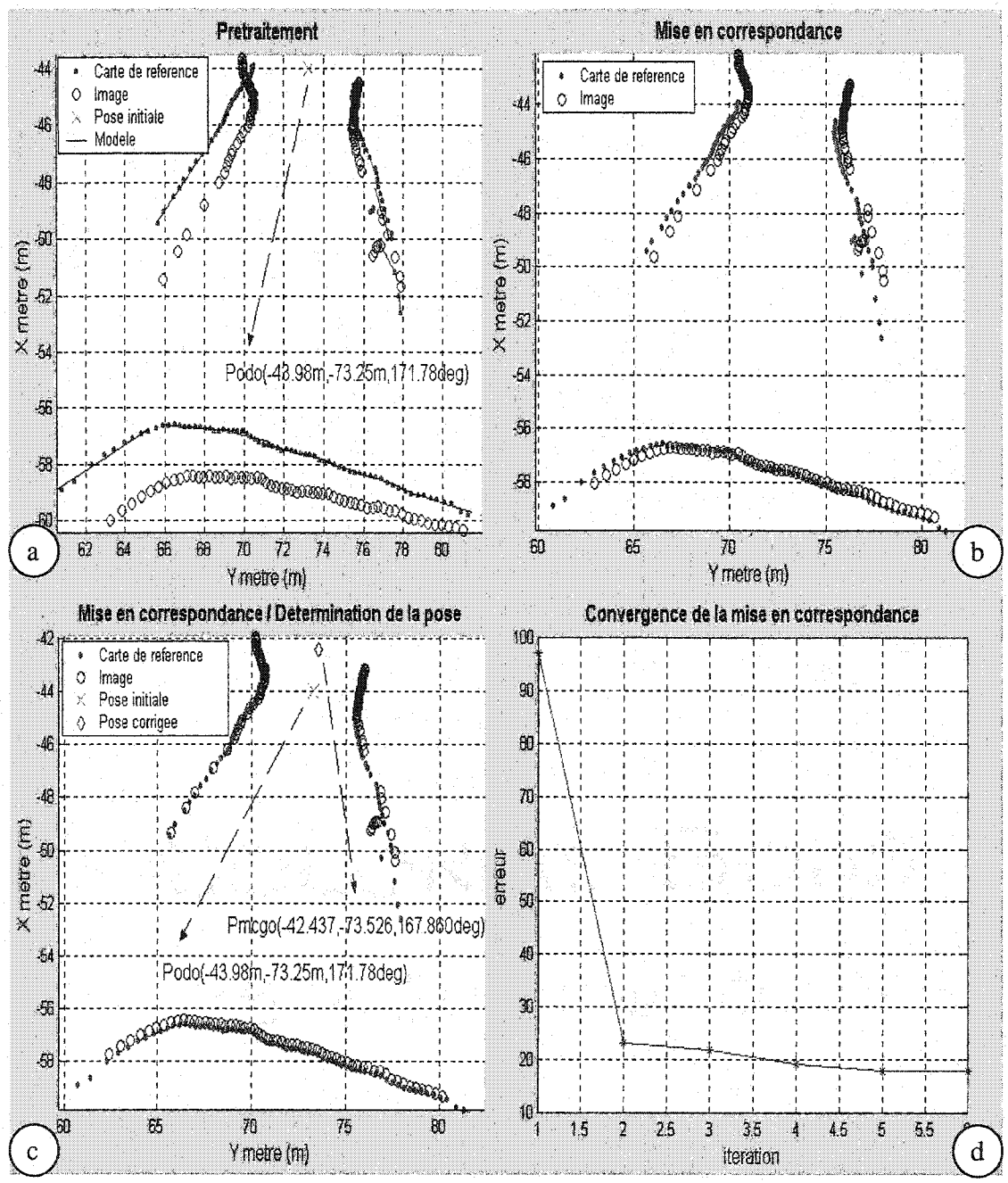


Figure 5.15. Mise en correspondance près d'une intersection en « T » de la mine souterraine : (a) prétraitement : traitement de données et modélisation, (b) mise en correspondance : résultat intermédiaire, (c) l'image coïncide avec la carte et détermination de la pose et (d) convergence de l'erreur.

5.4.2 Synthèse de résultats.

Plusieurs tests ont été réalisés pour valider l'approche de la localisation par mise en correspondance développée dans cette thèse. Les résultats obtenus montrent que l'approche développée:

- accepte une grande l'erreur sur l'estimation initiale de la position (x,y) (voir figure 5.6). Cependant, elle exige que le véhicule soit proche d'un *repère naturel* et que l'erreur en orientation du véhicule soit *inférieure à 15 degré*,
- converge rapidement (*en une dizaine d'itérations*) et permet de corriger en ligne les erreurs de positionnement accumulées par l'odométrie (ou les techniques de localisation relative),
- estime la pose réelle du véhicule avec une précision suffisante pour l'exécution autonome de missions globales de navigation (par exemple : la planification et le suivi de chemins, l'arpentage automatisé, la reconstruction de l'environnement, etc.).

Remarquons que nous utilisons les critères de diminution progressive de l'erreur (voir formule (5-18)) et le pourcentage de la variation de cette erreur (voir formule (5-19)) pour déterminer la validité des résultats de la mise en correspondance. Ces deux critères sont pratiques mais ne prouvent pas que la mise en correspondance ne converge pas vers un *minimum local*.

Chapitre 6: Exploration et navigation globale

6.1 Introduction

Comme nous l'avons déjà mentionné au chapitre trois, la navigation peut être divisée en navigation locale et globale. La navigation locale a été l'objet des chapitres trois, quatre et cinq de cette thèse. Nous y avons abordé les problèmes de la localisation du véhicule, de la détection d'obstacles, de la détection des repères naturels et de la locomotion du véhicule. Dans ce chapitre, nous allons aborder la problématique de la navigation globale des véhicules autonomes et présenter la solution proposée dans notre système intégré pour un réseau de galeries.

Rappelons que la navigation nécessite des réponses aux trois questions suivantes : *où suis-je (" Where am I")?*, *où vais-je ("Where am I going")?* et *comment y arriver ("How to get there")?*. La solution proposée à la question *"où suis-je?"* est l'intégration multi-capteurs (cf. chap.3) pour l'estimation de la pose en permanence et la correction de sa dérive, lorsqu'un repère naturel (intersection ou baie) est détecté, par la mise en correspondance (cf. chap.5) de la carte locale et la carte de référence (carte globale de l'environnement). Quant à la deuxième et la troisième question, elles nécessitent une connaissance globale de l'environnement et nécessitent des actions délibératives, telles

que la planification de chemin et de missions, qui sont généralement lentes. La figure 6.1 illustre les caractéristiques de la navigation globale et locale (ANTHONY, S. 1998)

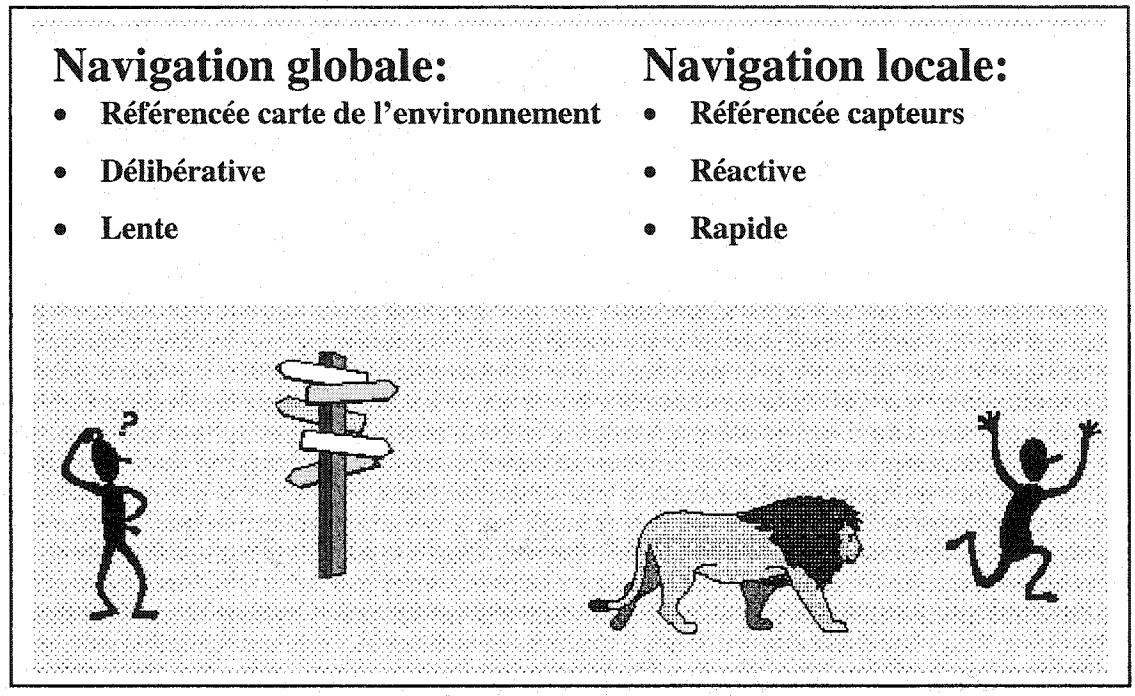


Figure 6.1 Navigation globale *vs* navigation locale

Dans notre solution, la navigation globale est réalisée à l'aide d'une carte de l'environnement que nous avons appelé *carte de référence*, construite par le véhicule lui-même en intégrant les informations sensorielles sur l'environnement et sur les déplacements effectués. Ces informations sensorielles doivent être suffisamment précises pour conserver la cohérence de la carte de référence tout au long des déplacements. Trois concepts importants constituent la problématique de la navigation globale, à savoir : *l'acquisition des informations sensorielles, la concaténation des informations sensorielles en une carte de l'environnement et la navigation référencée carte de l'environnement.*

Cette problématique nous conduit à proposer un système intégré fonctionnant en deux phases : *l'exploration initiale d'environnement* et *l'exécution autonome des missions globales de navigation*. Pendant la phase d'exploration initiale, le véhicule, à l'aide de ses capteurs embarqués collecte des informations sensorielles sur les déplacements et sur l'environnement (*cf.* section 6.2). Au terme de l'exploration, les informations sensorielles recueillies sont utilisées pour la construction de la carte de l'environnement exploré (*cf.* section 6.3). La carte ainsi obtenue est utilisée pour définir et planifier les missions globales de navigation qui seront exécutées dans la seconde phase de fonctionnement du système (*cf.* section 6.4).

6.2 Exploration initiale d'environnement

Rappelons que cette thèse concerne les environnements de type réseau de galeries dont on ignore la *géométrie* et celle-ci est *susceptible de changer localement* en raison de modification de la géométrie locale des galeries ou de la présence d'obstacles dynamiques. Les mines souterraines, les excavations souterraines de toutes sortes et l'intérieur de bâtiments sont des environnements typiques visés dans cette thèse. Suivant que la *connectivité* de l'environnement est préalablement connue ou inconnue, nous avons développé deux types d'exploration : *l'exploration autonome* et *l'exploration téléguidée* respectivement. Quelque soit le type d'exploration, l'objectif est d'acquérir le maximum d'informations nécessaires pour construire une représentation non ambiguë de l'espace libre et non libre (obstacles, par exemple) de l'environnement exploré.

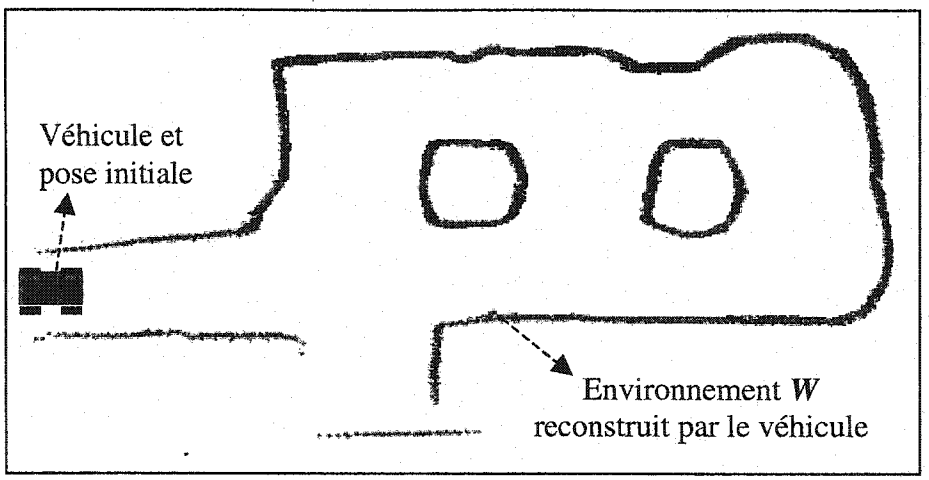


Figure 6.2 Environnement initialement inconnu (reconstruit par le véhicule)

Cette représentation doit contenir les caractéristiques métriques et topologiques de l'environnement exploré et doit permettre la spécification, la hiérarchisation et l'exécution de tâches de navigation.

6.2.1 Exploration semi-autonome (connectivité connue)

Soient W, l'environnement du véhicule et g le graphe de connectivité de W où les *arcs* A_i représentent les galeries et les *nœuds* N_i représentent les intersections de galeries et les baies. Dans ce travail, la connectivité g est connue à partir d'une *carte préliminaire* de l'environnement. Par *carte préliminaire* on entend une carte fournissant la connectivité exacte de l'environnement mais dont les dimensions ne reflètent pas exactement l'environnement réel. L'exploration semi-autonome consiste à exécuter un *plan d'action de navigation* défini avant le début de la phase d'exploration à partir de la carte

préliminaire. L'information métrique de l'environnement n'étant pas connue ou connue partiellement seulement, l'exploration semi-autonome consiste :

- *simultanément à suivre l'axe central de galerie et à chercher la plus proche intersection ou baie spécifiée sur le plan d'action de navigation.*
- *à traverser l'intersection rencontrée en dirigeant le véhicule vers la galerie de branchement spécifiée sur le plan d'action de navigation.*
- *à récolter les informations sur les déplacements et les mesures télémétriques sur l'environnement dans les plans osculateur et normal à la trajectoire du véhicule.*

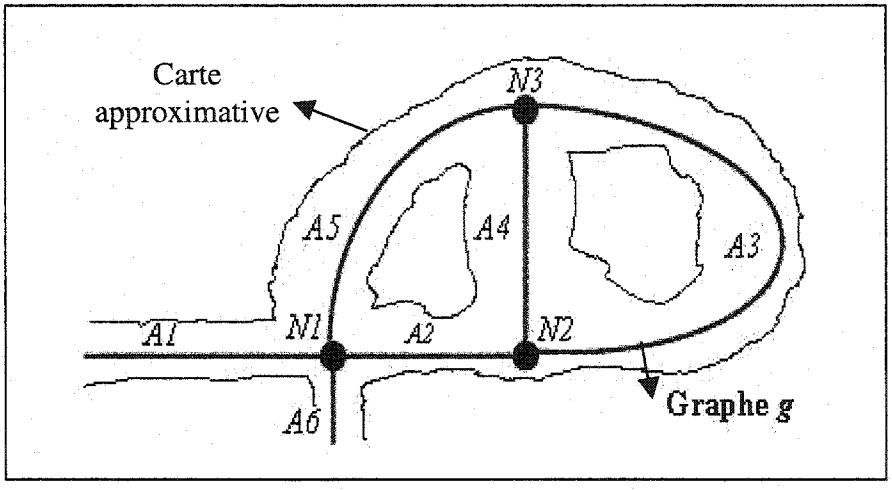


Figure 6.3 Graphe de connectivité de l'environnement

Un exemple concret pour illustrer l'exploration autonome est l'exploration de l'environnement à la figure 6.2 dont le graphe de connectivité est illustré à la figure 6.3. L'exploration de cet environnement est réalisée en demandant au véhicule d'exécuter le *plan d'action de navigation* suivant :

Start 0.00 0.00 0.00	***(pose initiale)***
FollowMiddle	***(Sur la galerie A1 suivre l'axe central)***
Intersection 4	***(Chercher l'intersection, N1, de degré 4)***
SwitchDrift 2	***(Se diriger à la galerie A2)***
Intersection 3	***(Chercher l'intersection, N2, de degré 3)***
FollowRight	***(Suivre le mur droit)***
LeftBay	***(Chercher une baie a gauche)***
FollowLeft	***(Suivre le mur gauche)***
Intersection 3	***(Chercher l'intersection, N2, de degré 3)***
FollowRight	***(Suivre le mur droit)***

Figure 6.4 Exemple de plan d'action de navigation pour l'exploration autonome

La figure 6.5 illustre le résultat de l'exemple d'exploration autonome ci-dessus.

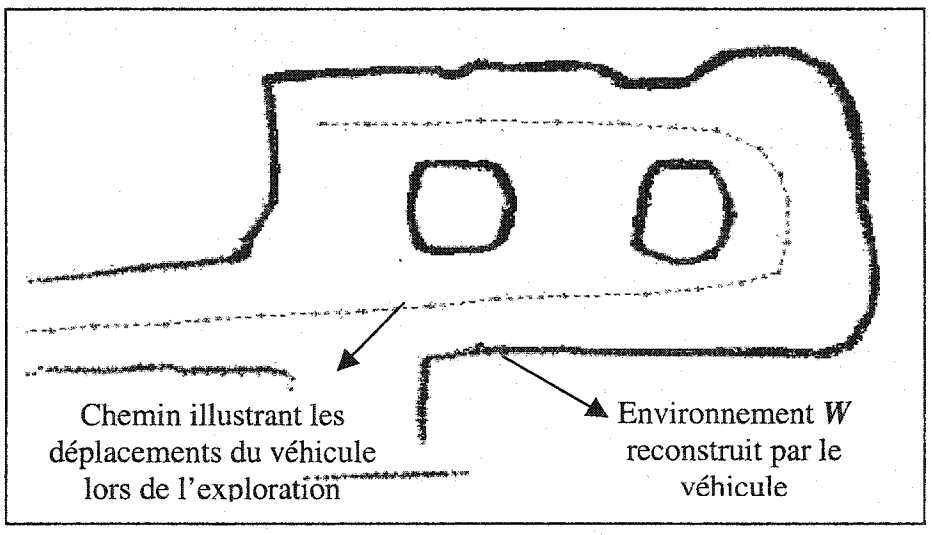


Figure 6.5 Illustration de résultat de l'exploration

6.2.2 Exploration téléguidée (connectivité inconnue)

Contrairement à la section précédente où la connectivité g est connue, ici aucune information sur l'environnement W n'est disponible. Le véhicule explore son environnement en suivant les murs des galeries et en affichant (graphiquement) à l'interface homme-machine du système ses différentes positions/orientations, la *carte locale* (la carte de son environnement immédiat) et la *carte globale accumulée* (voir figure 6.6). Ces différentes informations vont permettre à l'opérateur de définir et d'envoyer *une à une*, via l'interface, les actions de navigation que le véhicule doit exécuter afin d'atteindre l'objectif final de l'exploration. L'objectif de l'exploration peut être l'arpentage d'un environnement inconnu ou hostile à l'être humain, la recherche d'un objet, etc. Par exemple, pour effectuer l'arpentage complet de l'environnement illustré à la figure 6.2, l'opérateur pourra définir et envoyer au véhicule à l'aide de l'interface les instructions suivantes :

- *"Suivre l'axe central des galeries", "Stop;*
- *"traverser l'intersection", "Stop";*
- *"Suit le mur droit", "Stop";*
- *"Suit le mur gauche", "Stop";*
- *"Va tout droit", "Stop";*
- *"Tourne à gauche d'un angle quelconque", "Stop".*

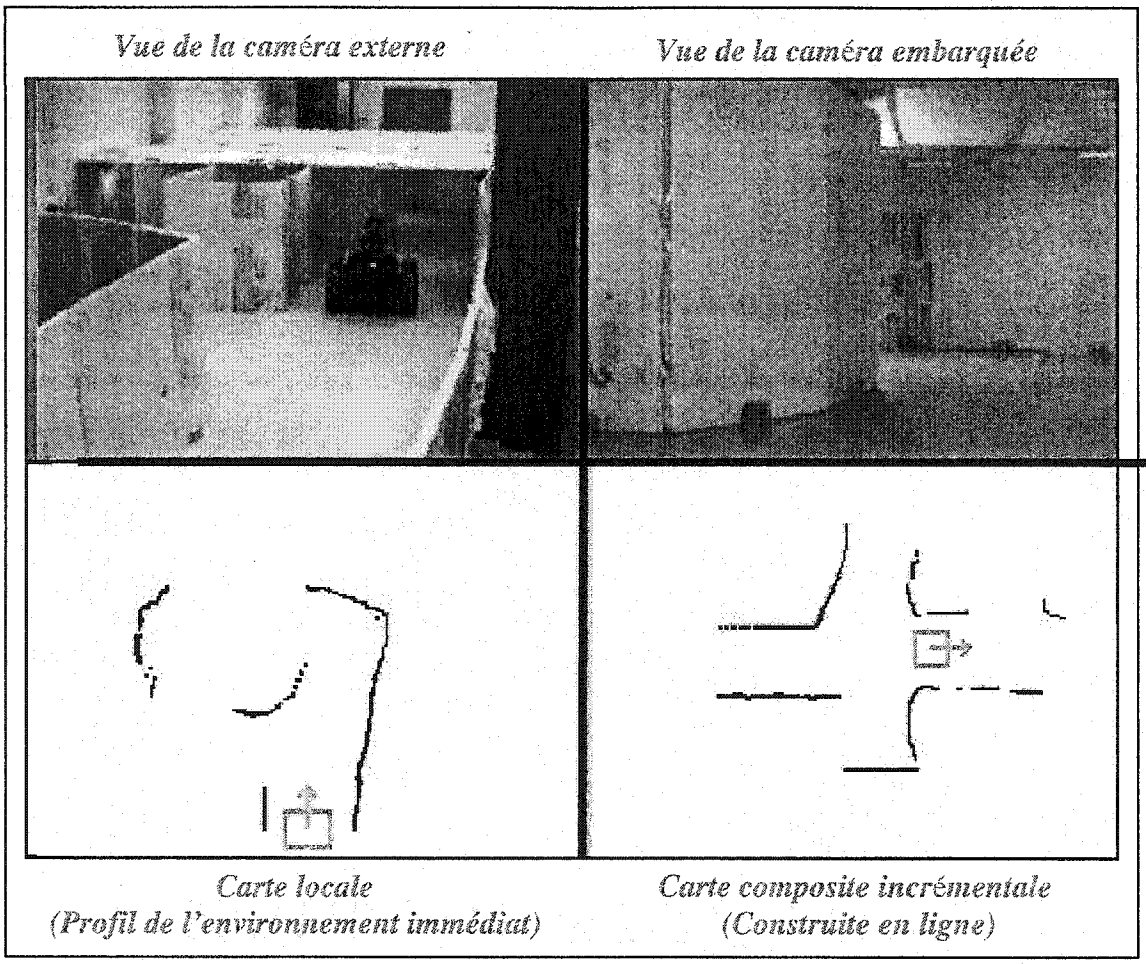


Figure 6.6 Illustration de l'exploration téléguidée

6.2.3 Acquisition de données sensorielles

Tel que présenté au chapitre deux, le véhicule autonome considéré est équipé d'une plate-forme multi-capteurs embarquée au véhicule. Cette plate-forme est équipée :

- d'un système odométrique (les encodeurs de roues) qui fournit une prédiction de la vitesse, de l'accélération et des déplacements élémentaires du véhicule qui après intégration donne l'estimation de la pose du véhicule
- d'un gyroscope qui fourni une prédiction de la vitesse de rotation du véhicule qui après intégration donne l'estimation de l'orientation du véhicule.
- d'un inclinomètre qui fourni une prédiction du tangage et de roulis du véhicule.
- d'une ceinture de douze sonars dont six devant, deux de chaque côté et deux en arrière fournissant des données télémétriques sur les obstacles proches (cinq mètres) du véhicule.
- de deux télémètres laser dont l'un (télémètre frontal) fournit les mesures télémétriques sur l'environnement suivant le plan laser osculateur de la trajectoire du véhicule permettant la reconstruction 2D de l'environnement exploré et l'exécution de *missions globales de navigation*, et l'autre (télémètre normal) fournit les mesures télémétriques sur l'environnement suivant le plan laser normal à la trajectoire du véhicule permettant la reconstruction 3D de l'environnement exploré.

Les détails sur l'intégration des mesures sensorielles recueillies par le véhicule sont donnés au chapitre 3 de cette thèse, et les spécifications du véhicule et des capteurs utilisés sont fournies dans COHEN et al (2000). La figure 6.7 illustre l'emplacement des

capteurs sur le véhicule ainsi que les profils laser (télémètre laser) et ultrason (sonar) virtuels.

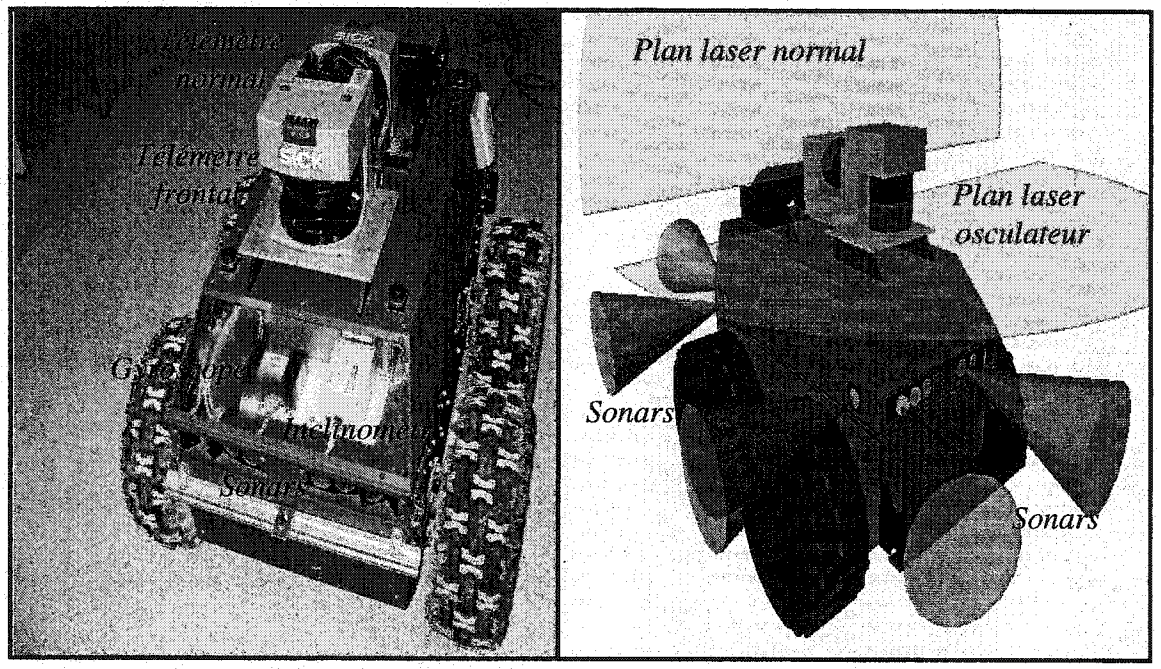


Figure 6.7 Plate-forme multi-capteurs embarquée au véhicule

6.3 Reconstruction des cartes d'environnement

Les informations sensorielles recueillies pendant l'exploration sont utilisées pour la reconstruction d'une représentation interne de la géométrie de l'environnement sous forme de *carte*, qui sera utilisée pour des fins de navigation. Ci-dessous (§6.3.1) nous présentons d'abord une définition de la carte de l'environnement dans le contexte de cette thèse, suivra (§6.3.2) notre approche de cartographie de l'environnement et ensuite le résultat de la cartographie d'une portion de mine souterraine (mine Brunswick de Noranda).

6.3.1 Définition de la carte de l'environnement

Dans ce travail, *la carte* est une structure de données sensorielles pour mémoriser ou extraire les connaissances spatiales d'un environnement.

De cette définition, nous pouvons écrire ce qui suit. Soit C la carte d'un environnement W et C_t la carte à l'instant t, alors :

$$C_t = \{\langle E_\tau, S_\tau \rangle\} \tau = 1,2,\ldots,t \qquad (6\text{-}1)$$

où E_τ est l'état (ceci inclut la position X, Y, le lacet, le tangage, le roulis, les vitesses linéaire et angulaire) du véhicule à l'instant τ et S_τ dénote les profils des télémètres laser frontal (pour la reconstruction 2D) et normal (pour la reconstruction 3D) à la trajectoire du véhicule à l'instant τ.

6.3.2 Cartographie de l'environnement

Étant donné C_t, le rôle de la cartographie est de construire une *représentation* interne de l'environnement sous forme de carte interprétable par le véhicule et permettant la navigation référencée carte. Cette carte sera appelée *carte de référence*. Selon les types de représentation de l'environnement, on peut distinguer comme l'indique la figure 6.8:

- ***les représentation métriques*** : elles sont basées sur une perception géométrique de l'environnement au moyen de capteurs tels que la télémétrie laser, ultrasons ou la vision. Elles utilisent le système de coordonnées globales pour décrire les caractéristiques de l'environnement. Dans ce type de représentation, deux approches sont développées en parallèle suivant que la modélisation s'appuie sur les *primitives géométriques* (points, segments de droites, polygones, courbes, etc.) ou une représentation par des *grilles d'occupation*. Dans cette dernière approche, l'environnement est décomposé en grille de cellules sur laquelle on évalue à partir des données sensorielles, pour chacune des cellules, la probabilité qu'elle appartienne à l'espace navigable ou à un obstacle (MOROVEC, 1985).
- ***les représentation topologiques*** : elles s'appuient sur une description symbolique des lieux (intersections), pièces (baies), couloirs, et des relations d'accessibilité entre eux. Dans ces représentations, les couloirs sont symbolisés par des arcs et les lieux et pièces sont symbolisés par des nœuds. Le graphe de connectivité en est un exemple (voir figure 6.3).
- ***les représentations hybrides ou mixtes*** : elles exploitent ensemble les deux types de représentations ci-dessus (VICTORINO, 2002).

Quel type de représentation doit-on adopter pour la construction de la carte de référence du véhicule? Le problème du choix de la représentation, nous amène naturellement à répondre à deux questions suivantes : « *Quel usage visons-nous à faire de cette représentation?* »

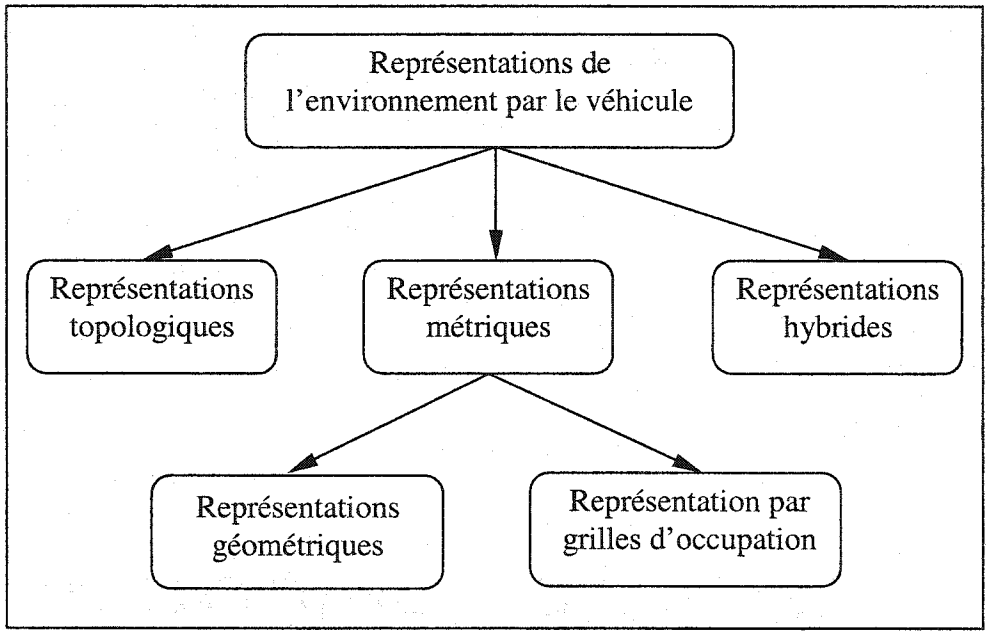


Figure 6.8 Représentation de l'environnement par le véhicule

6.3.2.1 Carte de référence : quelle représentation?

La description que nous nous faisons du monde réel est essentiellement géométrique. Lorsque nous décrivons une scène, nous nous exprimons généralement en des termes géométriques. Par exemple, « le *véhicule navigue dans les couloirs sur une surface plane*», « *les corridors sont cylindriques* », « *les murs de corridors sont perpendiculaires au terrain* ». De plus, l'usage envisagé de la carte de référence est la *navigation autonome du véhicule*. Pour définir ses actions sur l'environnement, un véhicule

autonome utilise sa connaissance de la géométrie des éléments qui composent cet environnement. Pour se déplacer et éviter les collisions, il doit tenir compte de la position des obstacles, et des superficies que ceux-ci occupent dans l'environnement. Ces exemples montrent que les *informations géométriques* jouent un rôle important dans la façon dont le véhicule autonome planifie ses actions. Par informations géométriques, nous entendons la connaissance quantitative des dimensions, des orientations, des positions des éléments constituant l'environnement. Ceci nous amène tout naturellement à exprimer la carte de référence en de termes géométriques, c'est-à-dire en une *représentation métrique géométrique.*

6.3.2.2 Reconstruction 2D de la carte de référence

La reconstruction 2D de la carte de référence se fait en trois étapes : le *filtrage* des mesures télémétriques, la *modélisation* de perceptions locales (*carte locale* de l'environnement) et la *mise à jour* de la carte accumulée.

- ***Filtrage des mesures télémétriques***

Dans cette étape, les données aberrantes sont isolées et retirés des mesures télémétriques S_l (voir la formule (5-1)). Pour ce faire, une fenêtre glissante de trois mesures est appliquée sur les mesures télémétriques S_l, *fournissant une information de continuité de distance* dans S_l. Si la profondeur relative mesurée entre les mesures dans la fenêtre glissante est supérieure à un certain seuil, alors il y a une discontinuité dont la cause peut être la présence d'une mesure aberrante. Ainsi, d'après (5-1) :

$$S_l = \{(\rho_0, \alpha_0), (\rho_1, \alpha_1), \ldots, (\rho_i, \alpha_i), \ldots, (\rho_n, \alpha_n)\} \tag{6-2}$$

L'alignement de $s_i = (\rho_i, \alpha_i)$ dans la séquence ordonnée

$$\{(\rho_{i-1}, \alpha_{i-1}), (\rho_i, \alpha_i), (\rho_{i+1}, \alpha_{i+1})\},$$

est étudié en calculant les distances entre les mesures de la séquence,

$$\begin{cases} \Delta_a = d(i, i-1) \\ \Delta_p = d(i, i+1) \\ \Delta_{pp} = d(i+1, i+2) \end{cases} \tag{6-3}$$

où

$$d(i, j) = \left| \rho_i - \rho_j \cos(\left| \alpha_i - \alpha_j \right|) \right|$$

dans le cas du télémètre laser utilisé dans cette thèse, pour deux mesures consécutives s_i et s_j, on a $\cos\left|\alpha_i - \alpha_j\right| = \cos(\frac{\pi}{180}) \approx 1$. D'où $d(i, j) \approx \left|\rho_i - \rho_j\right|$

Le critère de décision est basé sur l'ensemble de tests suivant :

1. Si les distances (6-3) entre les mesures d'une séquence sont inférieures à un certain seuil dp_{crit}, alors la séquence de mesures est considérée comme alignée.
2. Si $\Delta_a \geq dp_{crit}$ et $\Delta_p \geq dp_{crit}$, alors la mesure s_i n'est pas alignée avec ses voisins s_{i-1} et s_{i+1}. s_i est alors considéré comme une mesure aberrante et est écartée de S_l.
3. Si seulement $\Delta_a \geq dp_{crit}$, alors il peut y avoir un sous-ensemble de mesures alignées qui commence à partir de s_i. La distance Δ_{pp} est calculée et deux cas sont possibles :

a) $\Delta_{pp} \geq dp_{crit}$, alors les mesures s_i et s_{i+1} sont considérées comme de mesures aberrantes.

b) Sinon, il existe une séquence alignée d'au moins trois mesures $\{(\rho_i, \alpha_i), (\rho_{i+1}, \alpha_{i+1}), (\rho_{i+2}, \alpha_{i+2})\}$. Une mesure s_{i+3} est rajouté dans la séquence, si $d(i+2, i+3) < dp_{crit}$.

- ***Modélisation de perceptions locales : carte locale de l'environnement.***

Rappelons que nous avons opté pour une représentation géométrique de la carte de référence dans cette thèse. Ceci veut dire que nous utiliserons les primitives géométriques pour la construction de la carte de l'environnement. Parmi les primitives les plus utilisés, on cite : les segments de droite (VICTORINO, 2002) et les polynômes (LABROSSE, 1998). Dans notre travail, nous avons choisi d'utiliser *les points* comme primitives pour la représentation de la carte de référence. Ce choix est guidé par les raisons suivantes :

1. L'usage des points permet de représenter toutes formes de structure. Ceci est évident car *le point* est l'élément élémentaire de la géométrie.
2. L'usage des points permet d'éviter l'étape de la modélisation des points en segments de droite ou en polynômes. Cette modélisation est un processus très coûteux en termes de temps de computation, surtout pour des environnements larges et non structurés.
3. L'usage des points permet d'éviter les pertes d'informations dues aux approximations faites dans la modélisation.
4. Il suffit d'une transformation de coordonnées polaires en coordonnées cartésiennes de mesures fournies par le télémètre laser (LMS SICK 200) pour

obtenir les points caractérisant l'environnement courant du véhicule (ou du capteur).

Ainsi, après ce choix judicieux d'usage des *points*, la modélisation de perceptions locales en carte locale de l'environnement courant du véhicule revient à reconstruire le *profil S* correspondant. Cette construction a été discutée au chapitre précédente (cf. les formules (5.1)~(5.3)).

- ***Mis à jour de la carte composite 2D : Carte de référence***

La position et l'orientation initiales du véhicule lors de la *phase d'exploration* constituent l'origine et l'orientation du repère globale de la carte de référence. Il est donc important de remarquer que la *carte de référence* construite dans cette thèse est une *carte relative* et non pas *une carte globale* dans le vrai sens du terme. Elle est construite, de façon itérative, à partir d'observations locales (cartes locales) réalisées en différents points de l'environnement. D'où le nom de *carte composite*. Étant donné C_t (voir formule (6.1)), la cartographie se fait en deux principales étapes suivantes:

1. ***Initialisation de la carte de référence***. Le premier profil (ou première carte locale) est reconstruit à partir de mesures télémétriques $S_{\tau=0}$ et l'état du véhicule $E_{\tau=0}$, et initialise en son entier *la carte de référence* notée $C_{t=0}$.
2. ***Intégration d'un nouveau profil dans la carte de référence***. Soit à intégrer le $i^{ème}$ profil (reconstruit à partir de $S_{\tau=i}$ et $E_{\tau=i}$) dans la carte de référence (notée $C_{t=i-1}$). Pour ce faire, on suppose que la pose du véhicule à l'instant $t=0$ (notée P_0) est connue précisément et par conséquent la carte de référence $C_{t=0}$ est cohérente

avec à l'environnement réel du véhicule à cet instant ($t=0$). Cette supposition est vraie car la pose initiale du véhicule peut être spécifiée par l'opérateur.

L'intégration de chaque nouveau profil étant identique, nous montrons à titre d'exemple l'intégration du deuxième profil, c'est-à-dire $i=1$. Connaissant la pose du véhicule à l'instant $t=1$ (notée P_1),

(a) définir une fenêtre de corrélation (voir §5.3.1);

(b) faire la mise en correspondance de la portion de $C_{t=0}$ et de la portion du deuxième profil à l'intérieur de la fenêtre;

(c) corriger la pose P_1 en lui assignant le résultat de la mise en correspondance P_{1m};

(d) à partir de P_{1m} et $S_{\tau=1}$, reconstruire le profil et rajouter les points de ce dernier dans $C_{t=0}$ tout en éliminant les points redondants. Un point du profil est dit redondant si sa distance avec un point de la carte est inférieure à un seuil spécifié. On obtient alors la carte de référence $C_{t=1}$, qui est une mis à jour de la carte de référence $C_{t=0}$.

Pour intégrer le $i^{ème}$ profil (reconstruit à partir de $S_{\tau=i}$ et $E_{\tau=i}$) dans la carte de référence $C_{t=i-1}$, répéter les étapes (a)~(d). La carte issue de cette intégration sera notée par $C_{t=i}$.

Cet algorithme de construction des cartes 2D permet la construction en temps réel de la carte de référence par le véhicule. Plusieurs figures de cette thèse sont les résultats de cet algorithme.

La section suivante présente le résultat de la reconstruction d'une portion de mine souterraine (mine Brunswick de Noranda) à partir des données recueillies lors de l'arpentage de la mine par le véhicule ***ATRV-2***.

6.3.3 Présentation de résultats de l'exploration et de la reconstruction de la carte d'environnement

La figure 6.9 illustre une portion d'une ancienne carte de la mine. Cette carte a été créée manuellement à partir des données d'arpentage manuel de la mine. Un tel arpentage manuel d'un tel environnement (± 130 mètres de long, 5 à 7 mètres de large et 3 à 4 mètres de hauteur) peut prendre plusieurs jours, sans compter la compilation de données pour la reconstruction de la carte.

L'arpentage automatisé réalisé par notre véhicule autonome ***ATRV-2*** durant la phase d'exploration par le *système intégré* a permis de construire une nouvelle carte 2D de la zone explorée (voir figure 6.10). Cette nouvelle carte reflète l'état actuel de la portion de la mine. Les données d'arpentages ont été recueillies durant un voyage d'exploration aller-retour dans la portion de la mine.

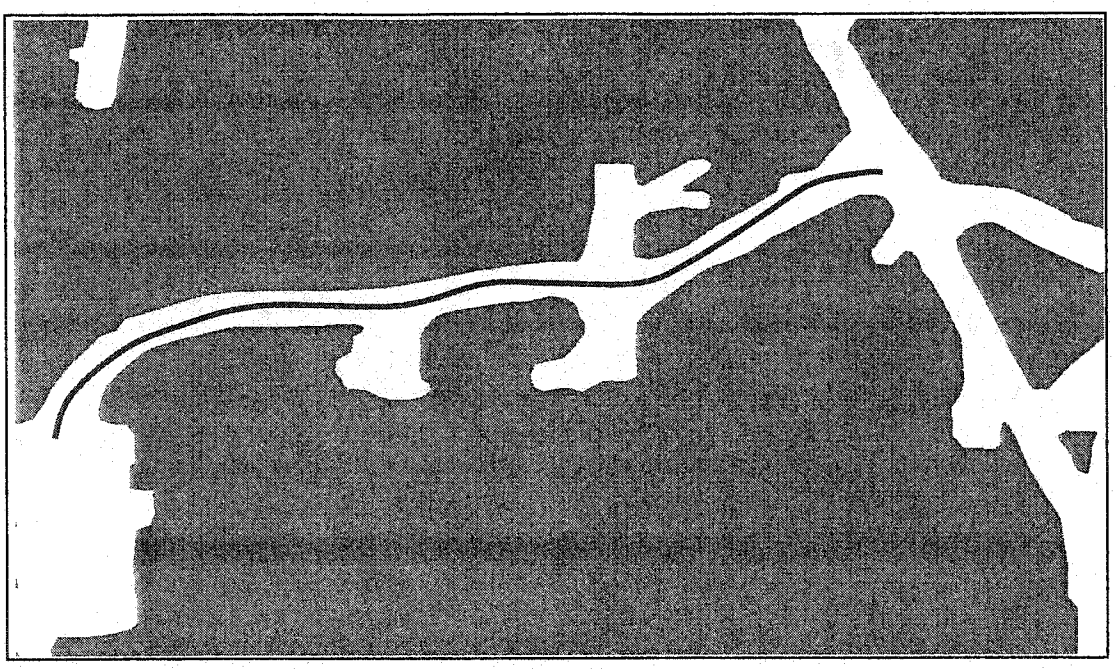


Figure 6.9 Carte d'arpentage manuel de la mine (construite par l'homme)

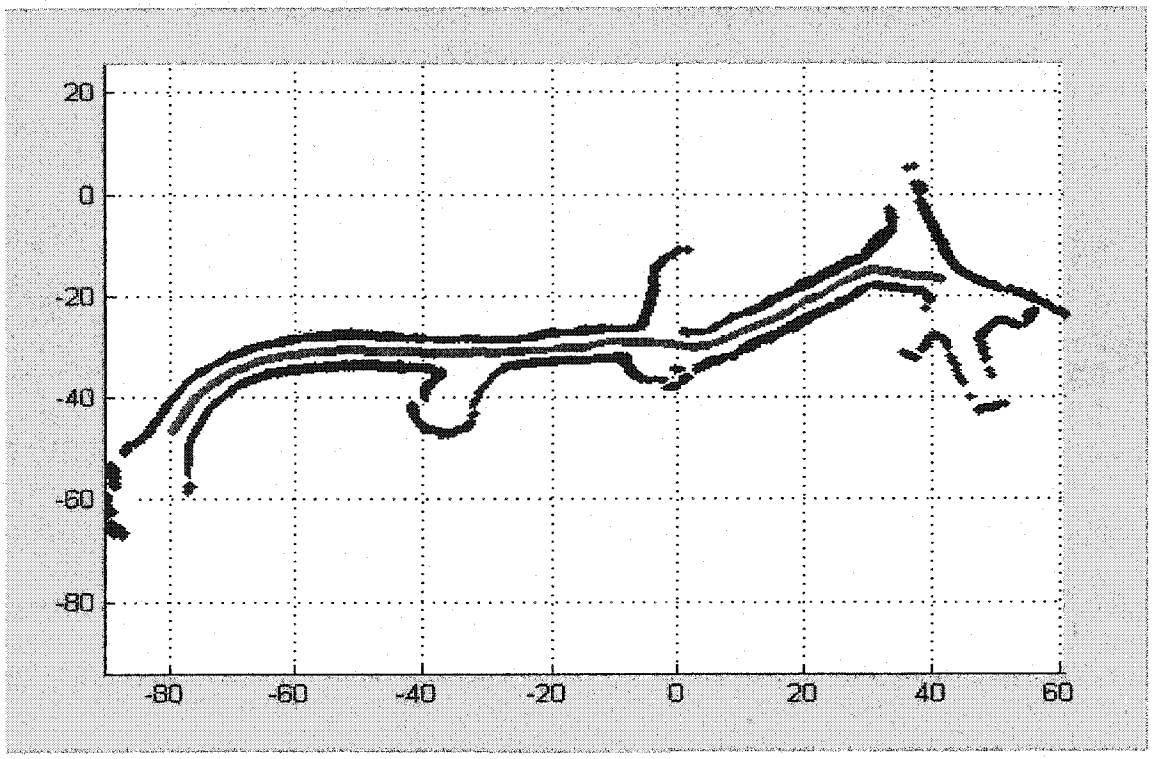


Figure 6.10 Carte de l'arpentage automatisé

L'arpentage, la compilation de données d'arpentage et la construction de la carte 2D de la zone explorée ont été réalisés en moins de trente minutes sur l'ordinateur abord du véhicule (lire COHEN et al (2000) pour le détails sur l'ordinateur à bord du véhicule)

Outre la carte 2D, le système est muni des outils pour la reconstruction de carte 3D de l'environnement à partir des mesures recueillies pendant exploration de l'environnement par le véhicule. Ci-dessous une vue 3D d'une portion explorée de la mine.

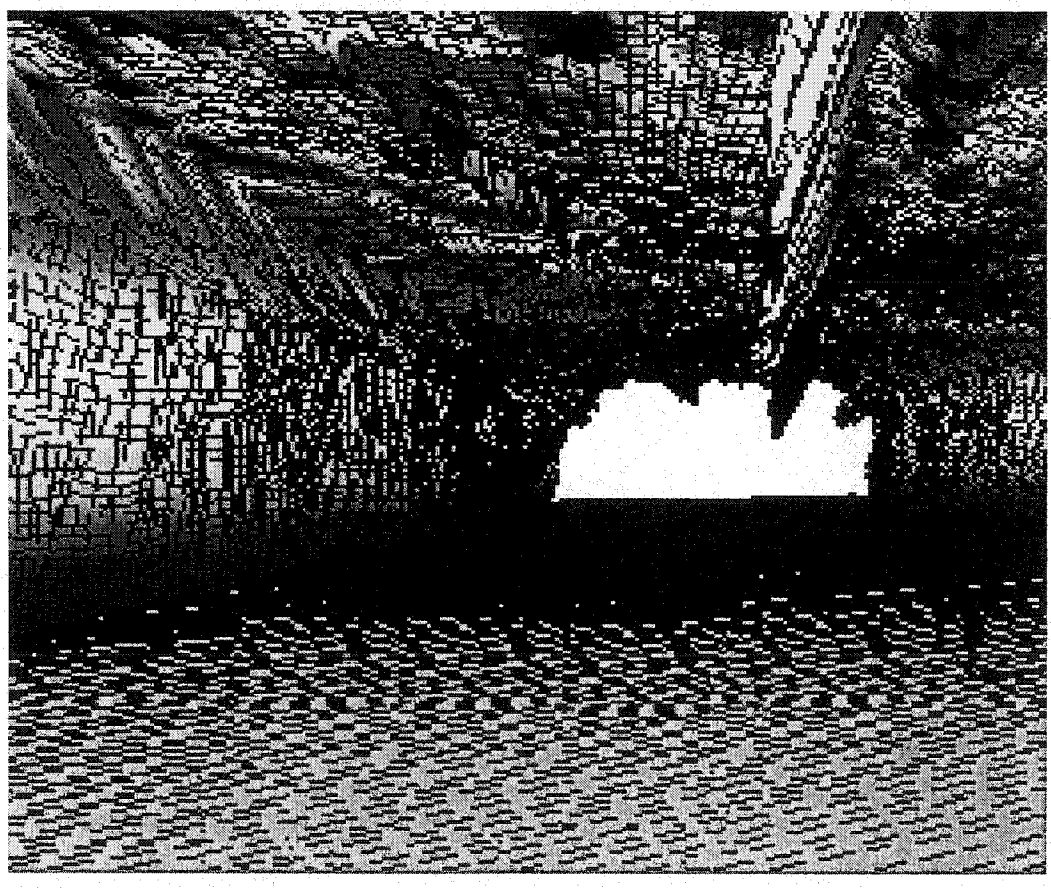


Figure 6.11 Reconstruction 3D à partir des données d'exploration

6.4 Navigation par carte de l'environnement

Comme l'avons déjà définie plus tôt, la *navigation référencée carte de l'environnement* est une navigation utilisant la carte acquise au cours de la phase d'exploration pour la planification de missions, la planification de chemin, la localisation du véhicule, la reconnaissance de lieux et l'exécution de missions. Au chapitre cinq, nous avons développé un algorithme de mise en correspondance entre la carte de référence et les données perceptions locales prise par le véhicule pour sa localisation par rapport à l'environnement et pour la reconnaissance de lieux déjà visités dans l'environnement. Dans cette section, nous allons aborder les problèmes de planification de missions (§6.4.2), de planification de chemins (§6.4.2) et d'exécution de missions (§6.4.2). Au préalable, il est utile de présenter l'*interface homme-machine* (§6.4.1) du système intégré proposé dans cette thèse. Elle permet la spécification de missions, la spécification des points intermédiaires, nommés *points de passages*, pour la planification de chemins, l'envoi des commandes au véhicule et la supervision de l'exécution de missions.

6.4.1 Interface homme-machine

Un système intelligent doit pouvoir accepter des commandes de la part d'un opérateur humain et être capable de les interpréter et d'accomplir des actions qui les réalisent. L'interface homme-machine est justement l'outil qui permet cette interaction entre l'opérateur humain et le système intelligent. C'est ainsi qu'une interface bien conçue ne doit pas seulement être un habillage de fonctions logicielles du système mais aussi et surtout permettre une bonne interaction entre la machine et l'homme. Pour ce faire, nous

avons défini un langage de spécification de mission qui contient, dans un formalisme très simple, tous les concepts jugés nécessaires à la définition d'une mission de navigation. Dans ce langage, une mission de navigation est exprimée en termes des actions de navigation que le véhicule doit exécuter pour atteindre l'objectif de la mission (voir figure 6.4).

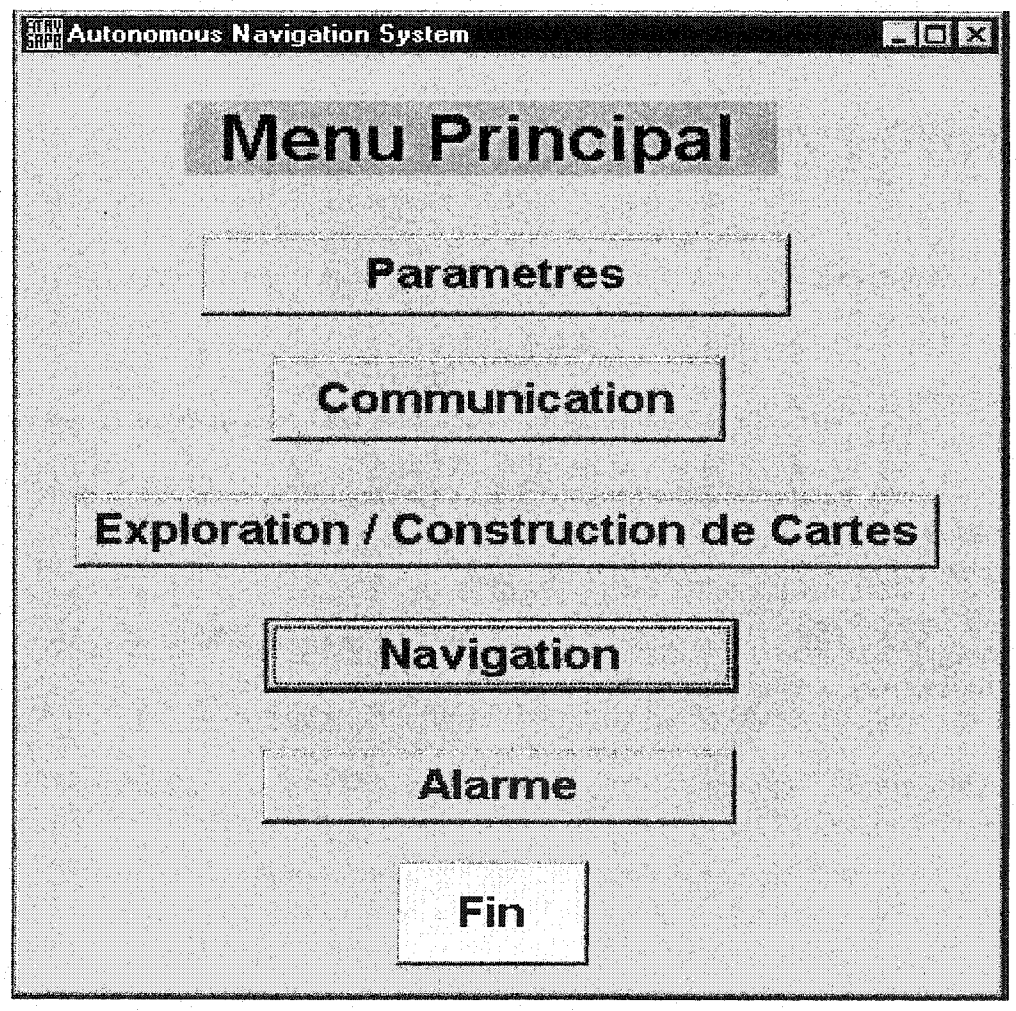


Figure 6.12 Menu principal d'interface homme-machine

Dans notre système, les fonctionnalités de l'interface homme-machine permettent : la spécification paramètres du système, l'établissement de communication entre l'interface et le système embarqué (au véhicule), la spécification de missions, la supervision de l'exécution de missions et la simulation à partir des informations d'exécution d'une mission effectuée par le véhicule. Les figures 6.12~6.14 illustrent les fenêtres d'interface homme-machine.

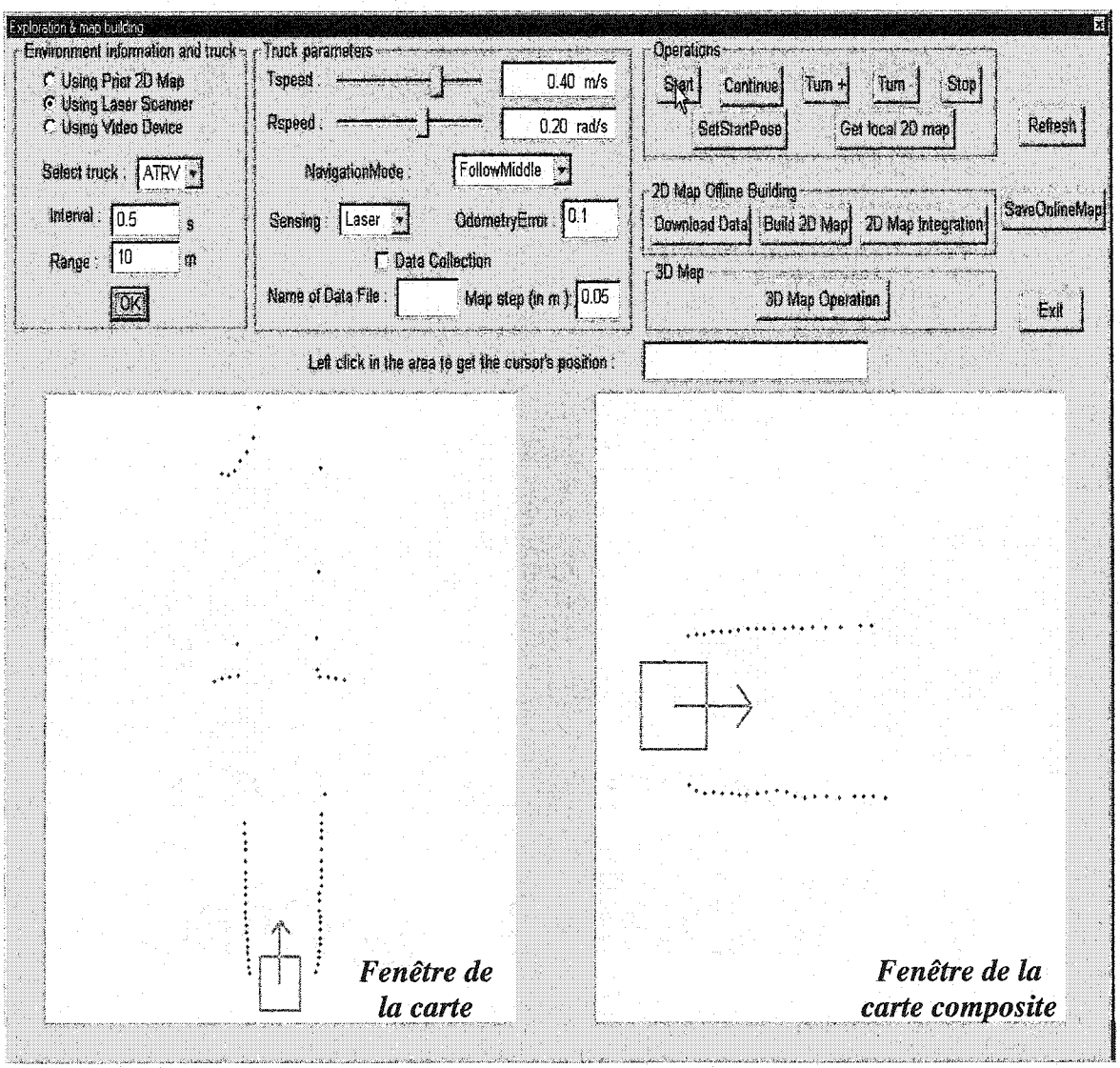


Figure 6.13 Interface homme-machine : Phase d'exploration initiale d'environnement

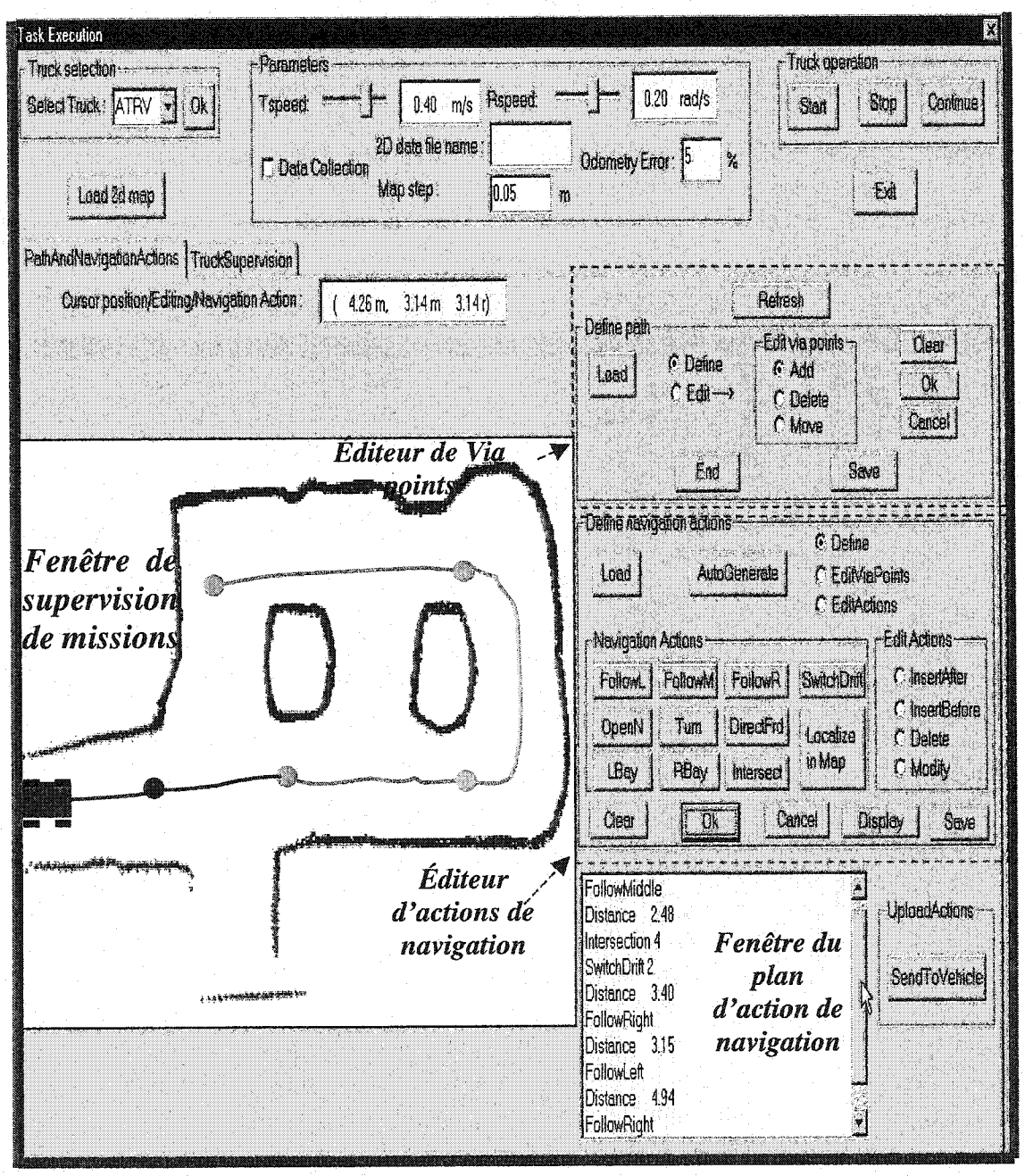


Figure 6.14 Interface homme-machine : Phase d'exécution autonome de missions de navigation

6.4.2 Planification de missions et de chemins

Tel que présenté au chapitre 2 (*cf.* figure 2.12), le module de planification de missions permet de *décomposer* les missions de navigation de haut niveau d'abstraction (par exemple, *aller du point du départ A au point d'arriverée B*) aux actions de navigation (par exemple suivre un mur, chercher une intersection,...). Nous appelons *action de navigation* une mission élémentaire (non décomposable au niveau de planification) et concrète (exécutable directement par une fonction du système). Les actions de navigation peuvent être divisées en deux types : les *modes de navigation* et les *événements* à observer dans l'environnement. Les modes de navigation spécifient les structures naturelles disponibles pour la locomotion du véhicule entre deux repères naturels (intersections et baies) consécutifs. Les événements à observer sont les *repères naturels à chercher et à identifier* à partir des perceptions locales sur l'environnement, et la *distance parcourue* à surveiller. La technique utilisée dans cette thèse pour décomposer d'une mission de navigation en actions de navigation est spécifique aux environnements considérés dans cette thèse, c'est-à-dire les réseaux de galeries.

Pour planifier une mission de navigation, l'opérateur spécifie les actions de navigation nécessaires à l'accomplissement de la mission à l'aide de *l'éditeur d'action de navigation* (voir figure 6.15 qui est un module de l'interface à la figure 6.14) et les points de passage à l'aide de *l'éditeur de points de passage* (voir figure 6.16 qui est une boite de l'interface à la figure 6.14). À partir des actions de navigation spécifiées par l'opérateur, le module de planification de missions génère un *plan d'action de navigation*. Ce plan est composé

des actions de navigation spécifiées et des contraintes de distances associées aux points de passage. La partie inférieure droite de la figure 6.14 montre la fenêtre du plan d'action de l'interface homme-machine, alors que les figure 2.11 et 6.4 illustrent des plans d'action de navigation.

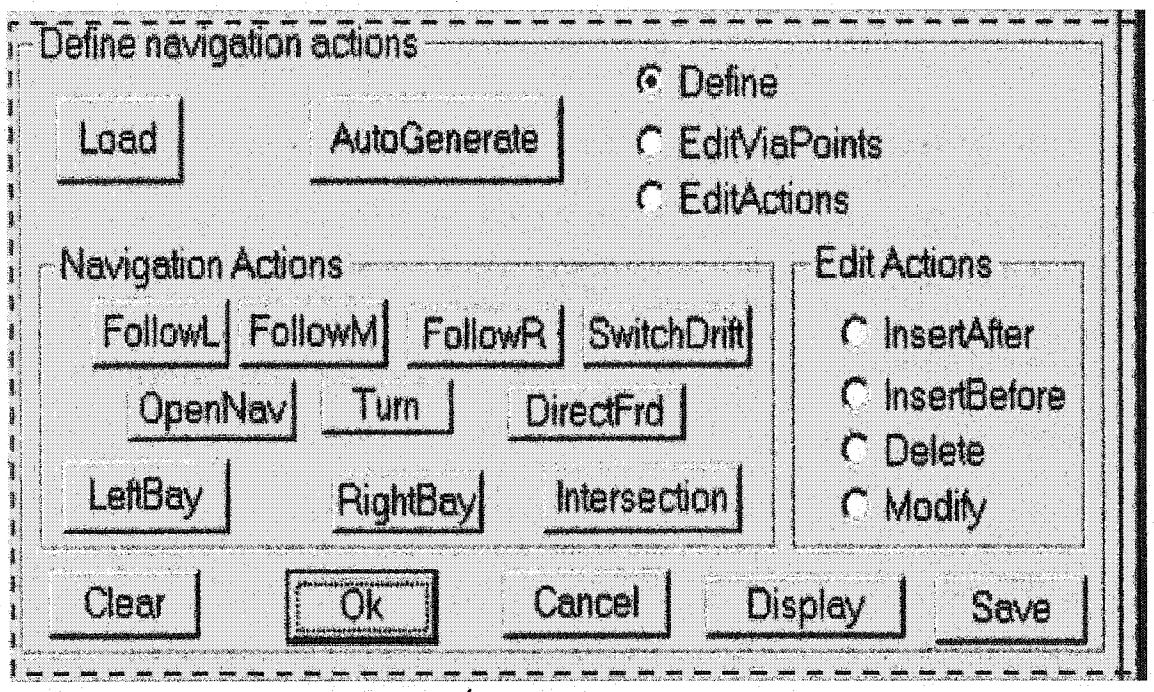


Figure 6.15 Éditeur d'actions de navigation

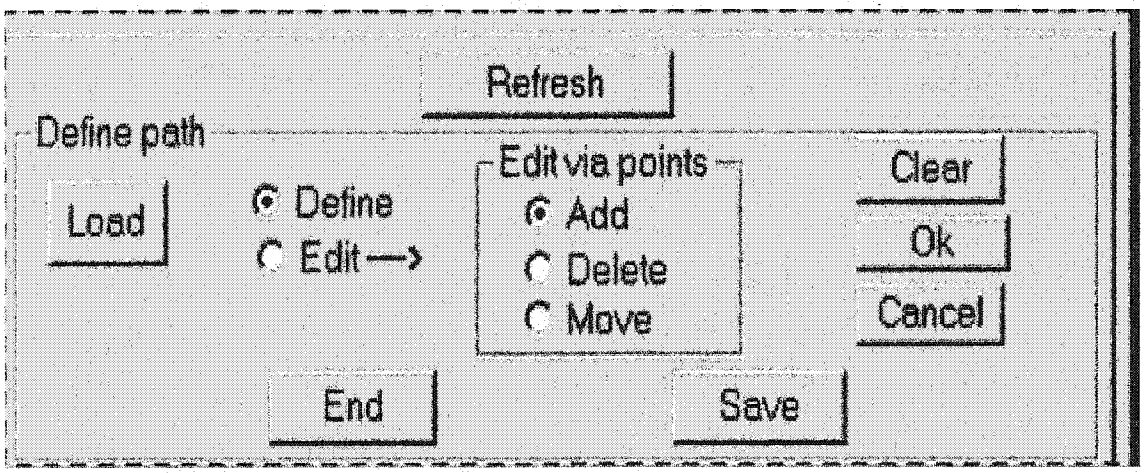


Figure 6.16 Éditeur des points intermédiaires : via points

La planification de chemins dans cette thèse est réduite à la génération des chemins lisses reliant les points de passage, spécifiés lors de la planification de missions (voir figure 6.16), tout en respectant les contraintes cinématiques. Les chemins générés sont constitués de segments de droite et d'arcs de cercle.

6.4.4 Ordonnancement d'exécution de missions

Tel que présenté au chapitre 2, le module d'ordonnancement d'exécution de missions a pour tâche l'interprétation du plan d'action de navigation et son exécution en interagissant avec un environnement réel (incertain et dynamique). Pour accomplir sa tâche, il active/désactive, contrôle et coordonne l'exécution des fonctionnalités temps réel nécessaires à l'exécution du plan d'action de navigation. L'exécution d'une action de navigation est représentée par des activités. Une activité est l'exécution d'une fonction par un module. Cette activité peut déclencher des requêtes vers d'autres modules déclenchant des activités filles. Ainsi, un *ordonnanceur* doit assurer :

- l'exécution du plan d'action de navigation
- la gestion de toutes les activités déclenchées pour l'exécution des actions de navigation.
- la réactivité du système aux changements dans l'environnement réel par rapport à la carte de référence.
- la communication entre modules et entre l'opérateur et les modules.

La conception d'un ordonnanceur capable d'assurer les exigences ci-dessus nous a conduit à adopter une stratégie basée sur la théorie des *automates à états finis*. Les automates à états finis ont un pouvoir d'expression suffisant pour représenter le fonctionnement d'un ordonnanceur (MEDEIROS, 1997). L'ordonnanceur peut alors être vu comme un grand automate où les changements d'état se produisent en raison des signaux externes qui lui parviennent et le franchissement des transitions entre états peut occasionner l'émission de signaux vers l'extérieur. La figure 6.17 illustre les entrées et sorties de l'ordonnanceur.

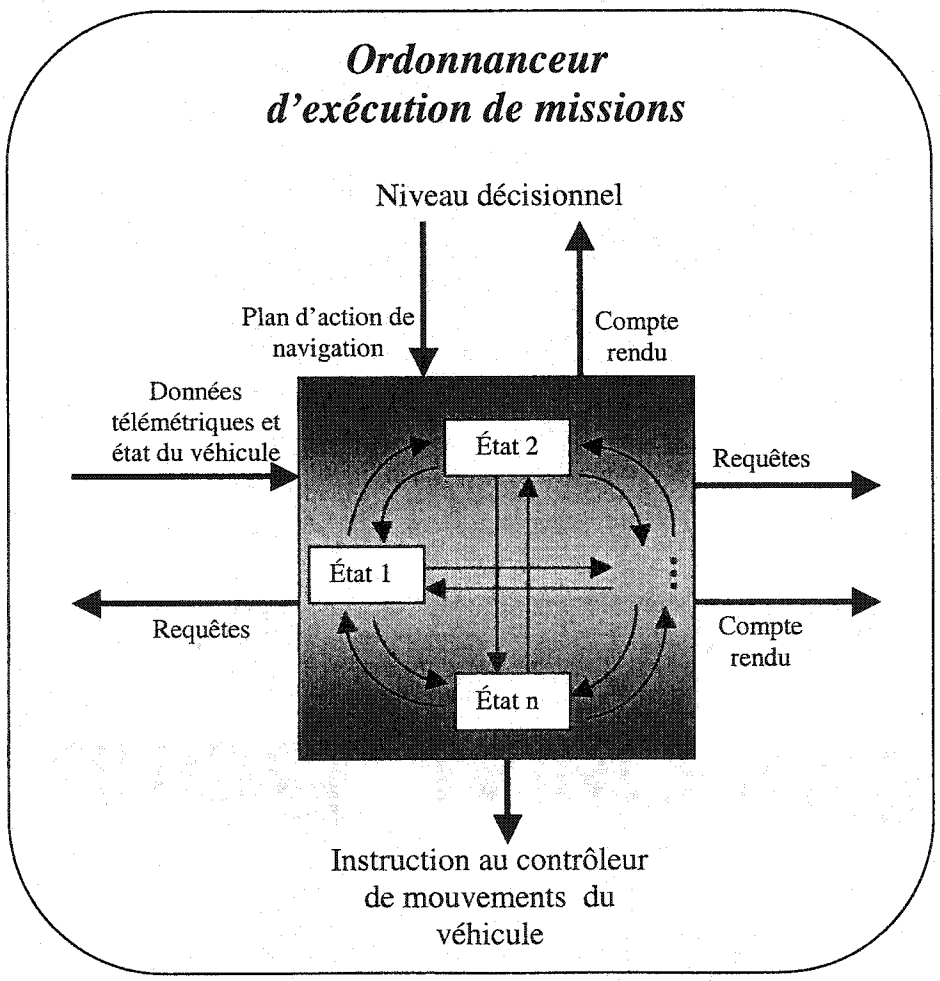


Figure 6.17 Ordonnanceur : automate à états finis

Les signaux externes qui peuvent faire évoluer l'automate sont :

- le plan d'action de navigation,
- les données sensorielles (*estimation de distance parcourue* et *détection de repères naturels*) et les événements externes non prévus (par exemple les obstacles), et
- le compte rendu de modules.

Les signaux que l'ordonnanceur émet lui-même sont :

- le compte rendu au niveau décisionnel,
- les instructions au contrôleur de mouvements, et
- les requêtes adressées aux modules.

La figure 6.19 illustre la coordination des activités par l'ordonnanceur pour exécuter le *plan d'action* à la figure 6.18 (*Noter que ce plan est celui qui est planifié* à la figure 6.14).

Les figures 6.18 et 6.19 montrent explicitement notre approche de navigation référencée carte de l'environnement. Le système compare et exploite les informations provenant de la carte transformée en *plan d'action de navigation* et les informations recueillies en ligne par les capteurs pour exécuter les missions globales de navigation spécifiées par ce même plan d'action de navigation.

En fait, outre les modes de navigation, le plan d'action de navigation prédit les repères naturels (baies et intersections) que le véhicule va rencontrer et fournit l'estimation des distances que le véhicule doit parcourir pour atteindre ou pour débuter la recherche d'un repère naturel spécifié dans ce plan d'action de navigation. La détection par le véhicule de repères naturels prédits par le plan et/ou l'accomplissement d'une distance pré-estimée par le plan entraînent le début ou la fin d'exécution d'une action de navigation. Et ainsi de suite jusqu'à l'exécution totale du plan d'action de navigation.

FollowMiddle
Distance 2.48
Intersection 4
SwitchDrift 2
Distance 5.00
FollowRight
Distance 3.15
FollowLeft
Distance 4.49
FollowRight
Distance 5.00

Figure 6.18 Plan d'action de navigation

À partir du plan d'action à la figure 6.18, l'ordonnanceur va générer automatiquement un automate à états finis suivants:

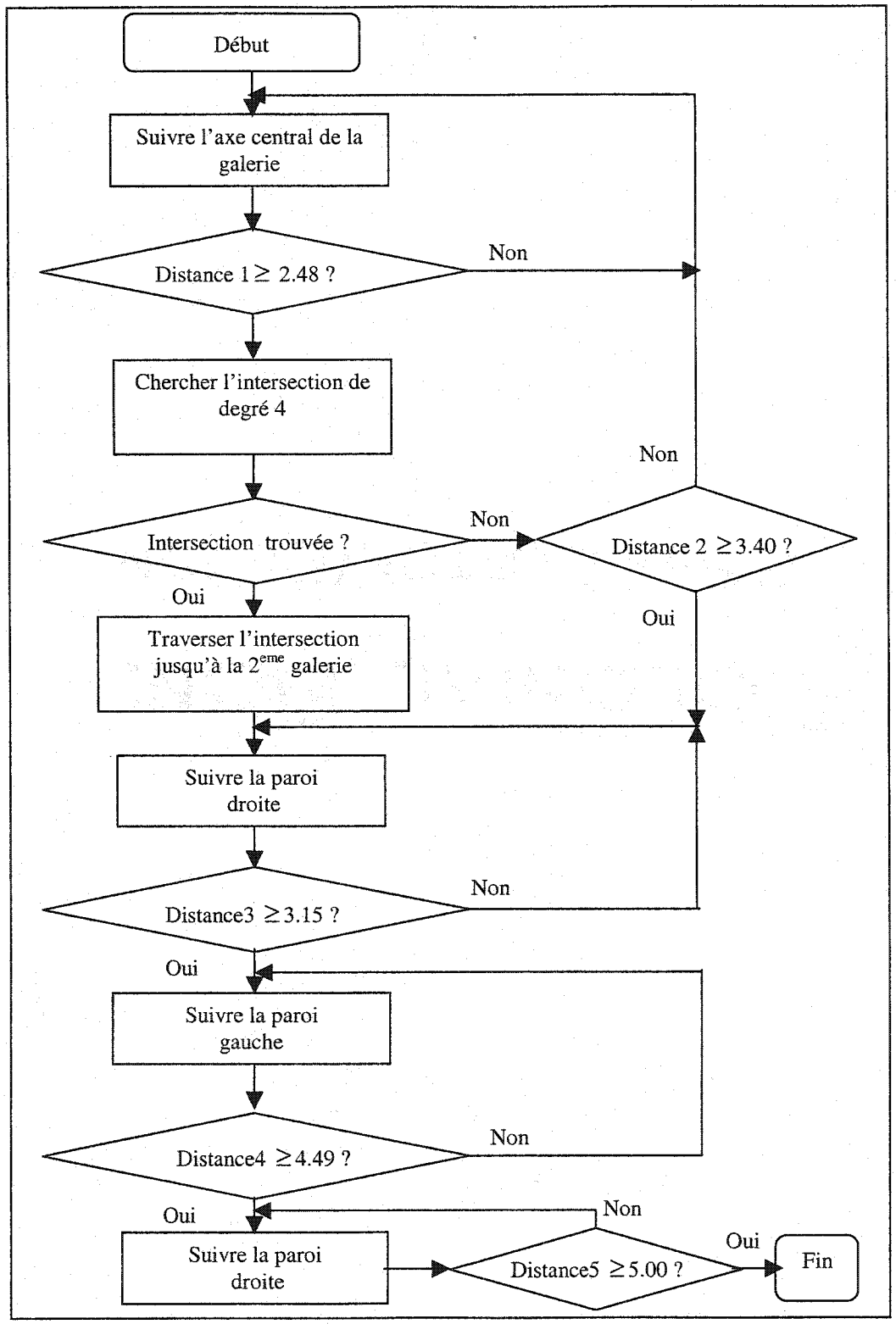


Figure 6.19 Exemple d'automate de coordination

6.5 Récapitulation et expériences

6.5.1 Récapitulation

Dans ce chapitre, exploration et navigation globale, nous avons mis en évidence la navigation autonome des véhicules dans un réseau de galeries inconnu a priori. Nous avons pour cela proposé deux phases de fonctionnement : l'exploration et l'exécution autonome de missions globales de navigation. Suivant que la connectivité du réseau est disponible ou pas, nous avons distingué l'exploration semi-autonome et l'exploration téléguidé respectivement. L'objectif principal de la phase d'exploration est de recueillir des informations télémétriques sur l'environnement et sur les déplacements du véhicule. Ces informations sont ensuite concaténées en cartes géométriques 3D et 2D de l'environnement. La carte 2D, nommée carte de référence, est utilisée pour la planification de missions et la localisation du véhicule pendant la phase d'exécution autonome de missions globales de navigation. C'est ce que nous avons appelé navigation référencée carte. Nous avons présenté notre approche de planification de missions qui génère un plan d'action de navigation. Ce plan d'action et ensuite interprété et exécuté par l'ordonnanceur d'exécution de missions. Pour assurer l'exécution du plan d'action de navigation, la gestion de toutes les activités déclenchées pour l'exécution des actions de navigation et pour garantir la réactivité du système aux changements dans l'environnement réel par rapport à la carte de référence, nous avons opté pour un ordonnanceur de type automate à états finis. Pour exécuter un plan d'action, l'ordonnanceur compare et exploite les informations provenant de la carte transformée en

plan d'action de navigation et les informations recueillies en ligne par les capteurs. La détection de repères naturels prédits et l'accomplissement de distances pré-estimées par le plan d'action de navigation déclenchent ou marquent la fin d'exécution d'une action de navigation.

6.5.2 Expériences avec le système intégré

Dans ce chapitre, nous décrivons quelques expériences effectuées pour évaluer la robustesse et la fiabilité du système intégré proposé. Nous présenterons les résultats des expériences effectuées en laboratoire et dans la mine souterraine de Noranda à Bathurst au Nouveau Brunswick.

6.5.2.1 Expériences en laboratoire

Objectif et réalisations

L'objectif des expérimentations au laboratoire est de faire la preuve de concept du système et de tester la compatibilité entre les différents modules, algorithmes et fonctionnalités intégrés dans notre système avant de se rendre sur un site réel d'expérimentation. Pour ce faire, nous avons expérimenté l'exécution autonome des tâches suivantes par le véhicule :

- suivi de paroi (gauche, droite) et de l'axe central de galerie basé sur les données télémétriques provenant du télémètre laser;
- localisation du véhicule par intégration multi-capteurs et par la mise en correspondance de la carte de référence avec la carte locale de l'environnement;

- planification et suivi de chemin basé sur l'odométrie en boucle ouverte et en boucle fermée;
- détection de repères naturels (baies et intersections);
- arpentage automatisé de réseaux de galeries;
- reconstruction des cartes de l'environnement (cartes de références 2D et 3D) à partir des données d'arpentage;
- navigation à l'aide de la carte de référence.

Configuration des expériences et résultats

Nous avons aménagé divers environnements en laboratoire pour simuler des réseaux de galeries. Mais, en raison cause de la limitation de l'espace, ces environnements sont généralement composés d'une ou deux intersections et/ou d'une ou deux baies et de galeries. Les galeries de ces environnements sont approximativement de 1.5 mètres de largeur et de 1.2 mètres de hauteur pour un véhicule de 1 mètre de largeur. Les figures 6.20~6.22 illustrent respectivement un croquis de l'environnement aménagé au laboratoire, les cartes 2D et 3D reconstruites après l'exploration, par le véhicule, de cet environnement (initialement inconnu). Il est important de mentionner qu'une rampe et quelques débris de bois ont été posés dans cet environnement (figure 6.20) pour simuler les pentes et les irrégularités de terrain. Comme l'indique la figure 6.22.a, seulement une portion de l'environnement était couverte.

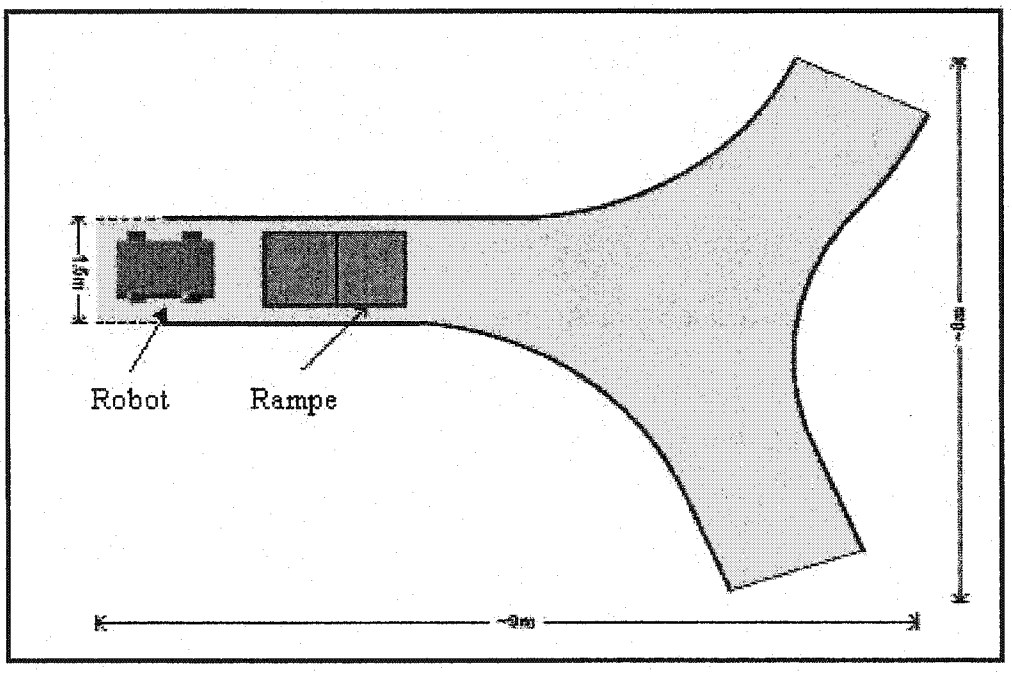


Figure 6.20 Croquis du site d'expérimentation au laboratoire

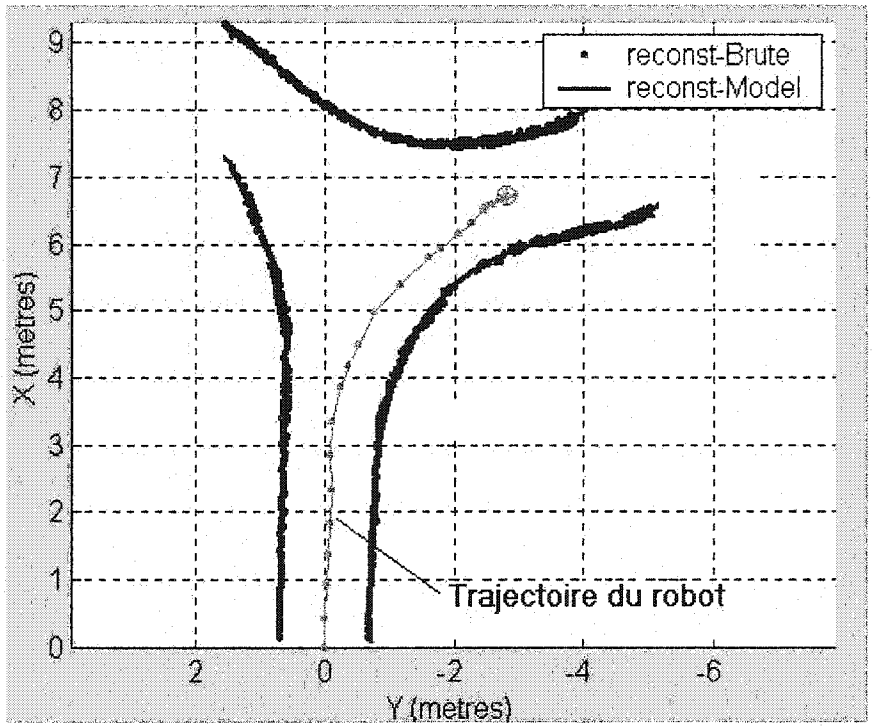


Figure 6.21 Reconstruction 2D de l'environnement

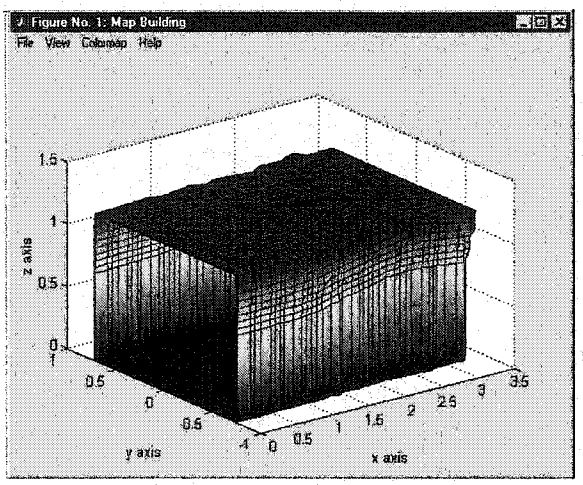


Figure 6.22.a Reconstruction 3D

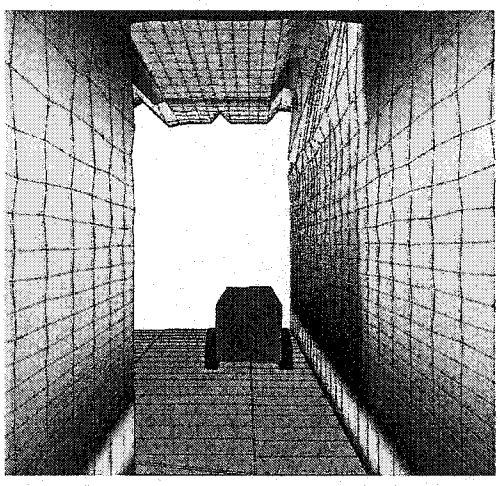


Figure 6.22.b Animation 3D

Divers environnements de configurations beaucoup plus complexes ont aussi été aménagés en laboratoire pour s'assurer de la robustesse et de la fiabilité du système intégré. La figure 6.23 illustre le résultat de la planification de missions et de chemin pour l'exécution autonome de missions globales de navigation dans l'environnement reconstruit après la phase d'exploration illustrée dans la figure 6.6. La partie inférieure de la figure 6.23, c'est-à-dire la vue de l'environnement sur l'interface homme-machine, est constituée de la carte de référence (reconstruite par le véhicule après la phase d'exploration) et le chemin de navigation généré à partir des points de passage spécifiés par l'opérateur. Les différentes couleurs sur le chemin correspondent aux différentes modes et actions de navigation à exécuter par le véhicule pour accomplir la mission définie par l'opérateur.

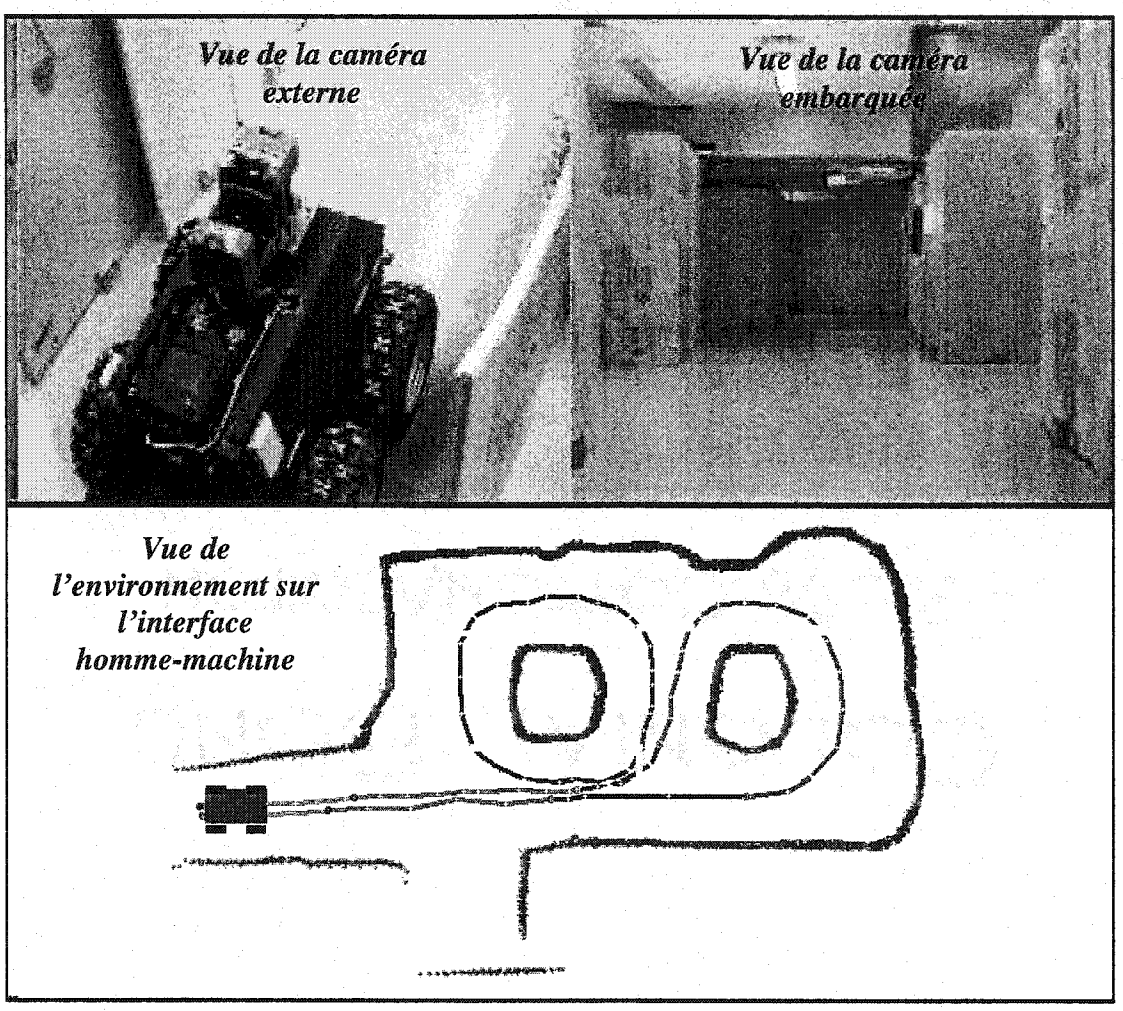


Figure 6.23 Exécution de missions

6.5.2.2 Expériences dans la mine

Notre système a été développé et intégré façon incrémentale. Durant la période de réalisation de ce système, nous avons effectué deux séries d'expérimentations dans la mine souterraine de Noranda à Bathurst, Nouveau Brunswick. La première série d'expérimentations a été effectuée du 12 au 15 novembre 2001, alors que la seconde série a eu lieu du 15 au 18 avril 2002.

▫ Première série d'expériences dans la mine

Objectifs des expériences

Les objectifs de la première série d'expérimentation dans la mine souterraine de Bathurst étaient de tester:

- les capacités de perception du système : vérifier les performances des stratégies d'intégration multi-capteurs;
- la robustesse et la fiabilité du contrôleur de mouvement du véhicule : mettre en évidence les capacités de suivi de parois et de l'axe central des galeries.
- les capacités du système à récolter les données sensorielles : données provenant de l'odomètre, du gyroscope, de l'inclinomètre et de deux télémètres laser (frontal et latéral);
- les capacités du système à reconstruire les cartes 2D et 3D à partir de données sensorielles recueillies;

- les capacités du système à détecter les obstacles et à arrêter, si nécessaire, le véhicule de façon sécuritaire.

Site des expériences

Une zone abandonnée de la « *mine 1550* » a été mise à notre disposition pour les deux séries d'expérimentations. La figure 6.24 illustre la carte du site des expériences. Et la figure 6.25 montre la configuration du système de communication installé pour permettre la supervision de missions et l'échange d'informations opérateur-véhicule.

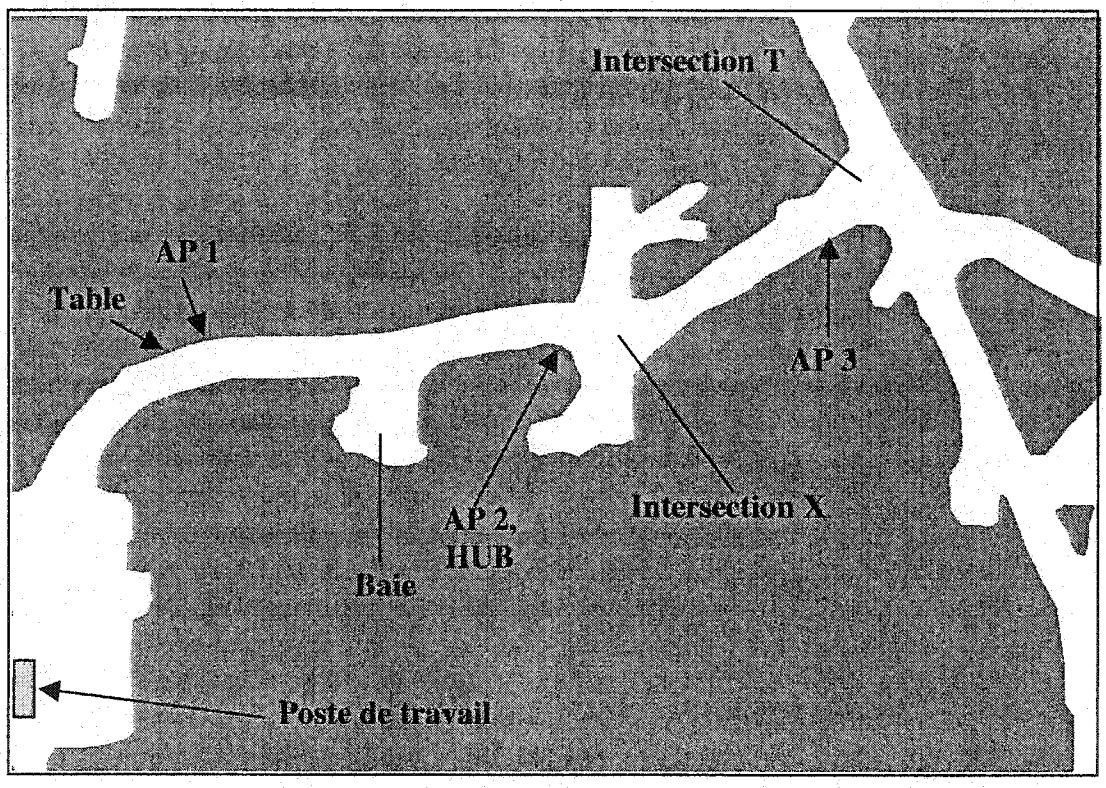


Figure 6.24 Carte du site des expériences

Résultats des expériences

Les figures 6.26 et 6.27 illustrent les résultats des tests effectués à la mine lors de la première série d'expérimentation dans la mine.

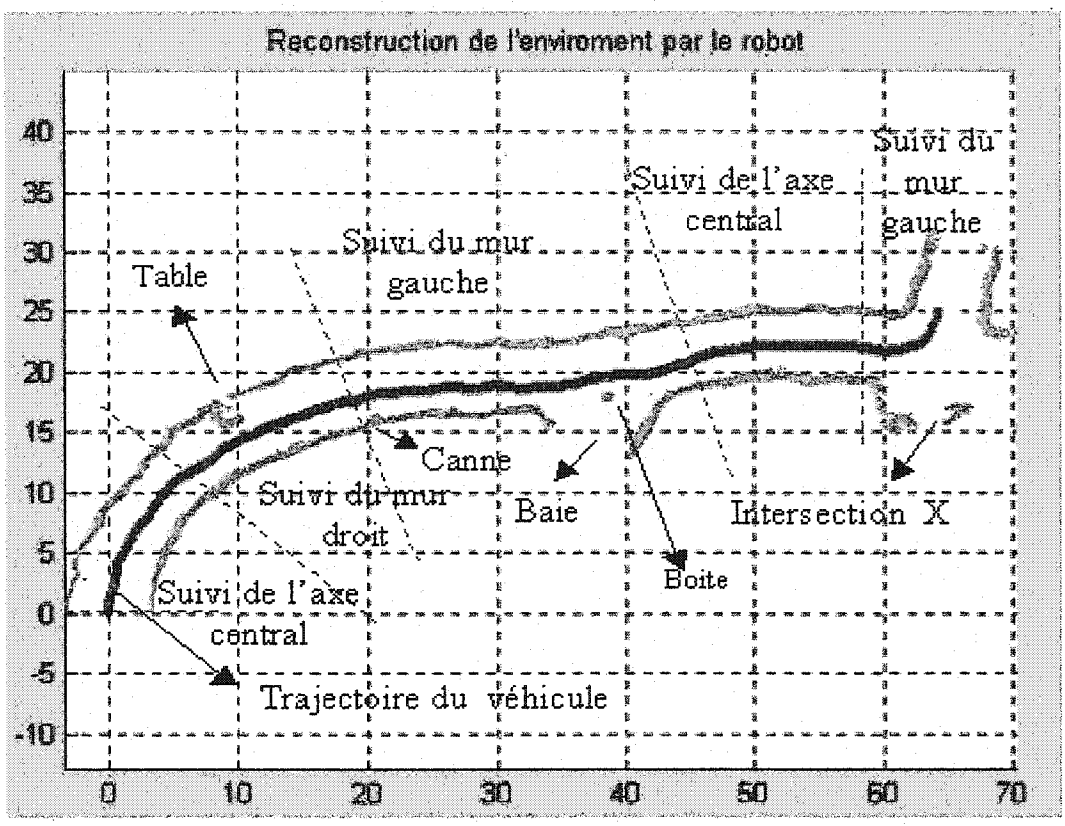


Figure 6.26 La reconstruction de la carte 2D du site des expériences

Tenant compte des objectifs énumérés ci-dessus, plusieurs tests répétitifs ont été effectués afin de s'assurer de la robustesse et fiabilité du système. Durant nos expériences, différentes vitesses allant de 0.4m/s à 1.0m/s ont été utilisées pour étudier les comportements du véhicule. Le résultat illustré à la figure 6.26 est l'exécution successive des tâches de navigation suivantes :

- suivre l'axe central de galerie jusqu'à la table;
- de la table suivre le mur droit jusqu'à la canne;
- de la canne suivre le mur gauche jusqu'à la fin de la baie;
- après la baie suivre le milieu jusqu'à l'approche de l'intersection en X;
- suivre la paroi gauche pour entrer dans la galerie à gauche.

Les tâches de navigation ci-dessus ont été exécutées avec succès de façon répétitive et le véhicule a été capable de percevoir les objets (table de travail, canne, boîte) placés volontairement dans la mine pour tester les capacités de perception du système et de détection d'obstacle. En présence d'obstacles, le véhicule s'arrêtait de façon sécuritaire et poursuivait sa mission dès que les obstacles (les opérateurs de la mine) disparaissaient.

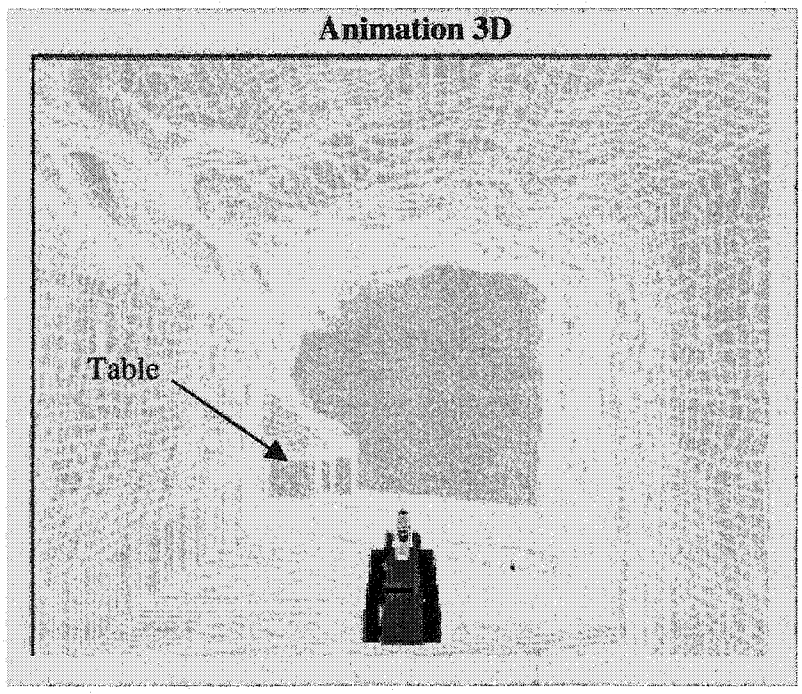


Figure 6.27 La reconstruction de la carte 3D du site des expériences

▫ Deuxième série d'expériences dans la mine

Objectifs des expériences

Les objectifs de la deuxième série d'expérimentation dans la mine souterraine de Bathurst étaient de tester:

- la spécification (*cf.* figure 2.10) et la supervision des missions du véhicule à l'aide de l'interface homme-machine;
- les algorithmes développés pour la détection de repères naturels (baies et intersections) dans la mine;
- les capacités du contrôleur de mouvements à traverser des intersections où aucune structure naturelle (paroi latérale) n'est disponible pour le guidage;
- l'approche proposée pour la navigation globale du véhicule dans un réseau de galeries : navigation basée sur la distance et les repères naturels;
- l'exécution autonome de missions globales de navigation dans un réseau de galeries;
- le système de communication dans la mine souterraine (cf. figure 6.25).

Résultats des expériences

Les figures 6.28 et 6.30~6.33 illustrent les résultats de la deuxième série d'expérimentation dans la mine. La figure 6.28 est le résultat de l'exécution des plans d'action de navigation illustré aux figures 2.11 et 6.29 respectivement pour la phase aller et pour la phase retour. Le plan d'action de navigation de la figure 2.11 peut être traduit comme suit :

- assigner x = -80.0 m, y = 45.0 m et θ = 45.0 degré comme la position et orientation initiales;
- suivre l'axe central (milieu) de galerie et après une distance de 35.84 mètres, commencer la recherche d'une baie à droite;
- après avoir détecté la baie, suivre le mur gauche et effectuer la correspondance entre la carte locale courante et la carte locale en mémoire pour corriger les erreurs de positionnement accumulées. La carte locale en mémoire est enregistrée dans le fichier « MapMatching.dat »;
- 8.90 mètres après la détection de la baie (fin de baie), suivre le milieu de galerie;
- 13.94 mètres après la fin de baie, commencer la recherche d'une intersection de degré 4 (nombre de couloir à l'intersection) et effectuer le branchement à la deuxième galerie de gauche à droite (sens horaire);
- 11.67 mètres après la détection de l'intersection (c'est à dire à la fin de l'intersection), suivre le milieu de la galerie (il s'agit de la deuxième en sens horaire);
- 20.38 mètres après la fin de l'intersection, suivre le mur droit pendant 21.08 mètres et s'arrêter (c'est la fin des missions en phase aller simple).

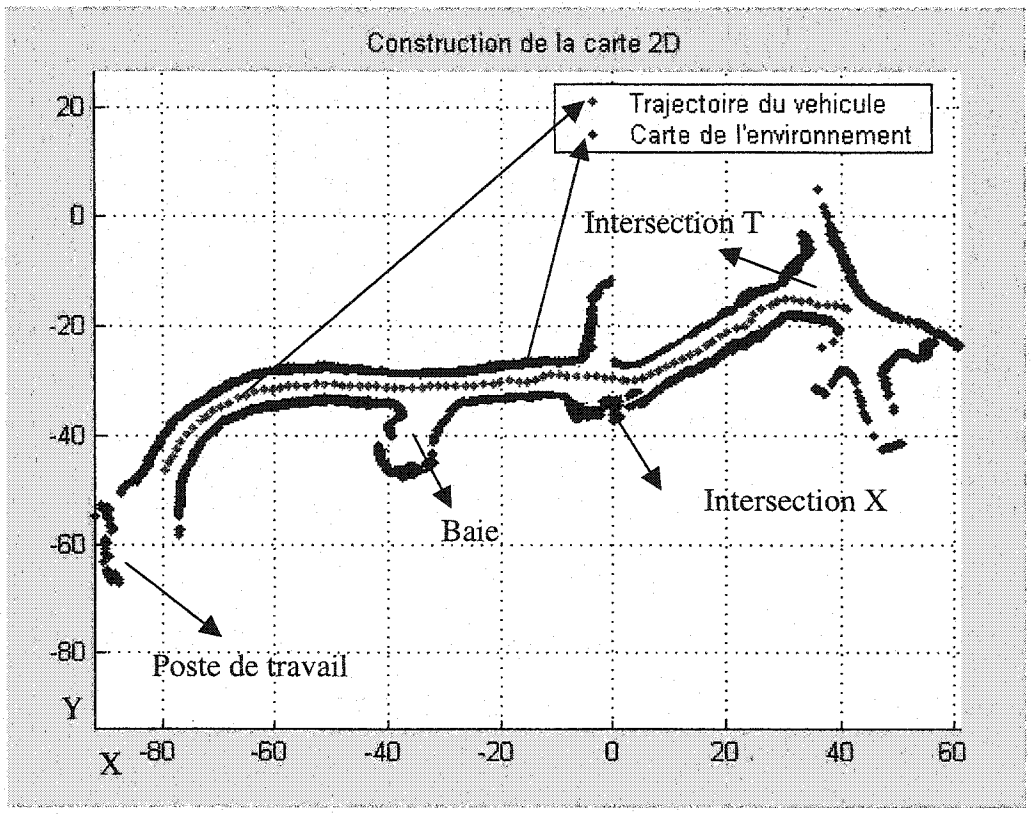


Figure 6.28 Carte 2D : aller-retour.

Turn Angle 180.0
FollowRight
Distance 20.40
FollowMiddle
Intersection 4
MapMatching
MapMatching.dat
SwitchDrift 2
Distance 12.60
FollowMiddle
LeftBay
FollowRight

Figure 6.29 Plan d'action de navigation: phase retour.

Au terme de nos expériences dans la mine, nous avons présenté aux opérateurs miniers (mineurs, techniciens, ingénieurs et responsables) de la mine souterraine de Brunswick, une démonstration mettant en évidence les capacités de notre système intégré à exécuter de façon autonome des missions globales de navigation. Les figures qui suivent illustrent les résultats de cette démonstration. Les missions globales de navigation ont été définies comme suit:

- suivre l'axe central (milieu) de galerie jusqu'à la détection d'une baie à droite, puis suivre le mur gauche;
- à la détection de la fin de baie, suivre l'axe central de galerie jusqu'à une distance donnée et s'arrêter;
- effectuer une rotation, sur place, de 180 degré (demi tour);
- suivre l'axe central de galerie jusqu'à la détection d'une baie à gauche (c'est la même baie), puis suivre la paroi gauche (entrer dans la baie) jusqu'à une distance donnée;
- exécuter en boucle ouverte une manœuvre effectuant un carré d'un mètre de côté, puis effectuer une rotation de 90 degré sur place (sens anti-horaire);
- suivre la paroi droite jusqu'à une distance donnée, puis faire une rotation, sur place, de 180 degré;
- suivre l'axe central de galerie jusqu'à la détection d'une baie à gauche (c'est la même baie), puis suivre la paroi droite jusqu'à la détection de fin de baie;
- suivre l'axe central de galerie jusqu'à une distance donnée, puis s'arrêter (retour au poste de travail)

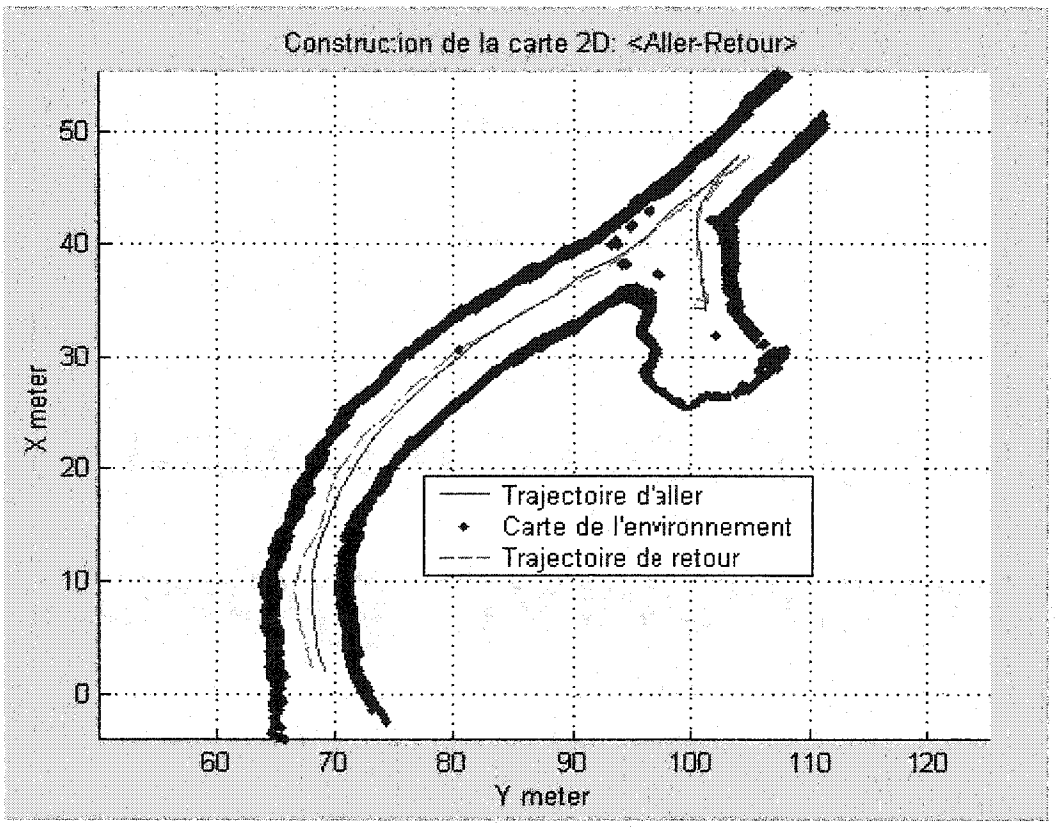


Figure 6.30 Démonstration aller-retour

Toutes ces missions de navigation ont été définies via l'interface homme-machine et exécutées avec succès par le véhicule sans intervention humaine. La figure 6.30 illustre le résultat d'exécution du plan d'action de navigation associé aux missions globales de navigation énumérées ci-dessus (aller et retour). La figure 6.31 illustre les trajectoires aller et retour. La figure 6.32 illustre la phase aller (vers la baie), alors que la figure 6.33 illustre le retour du véhicule au poste de travail.

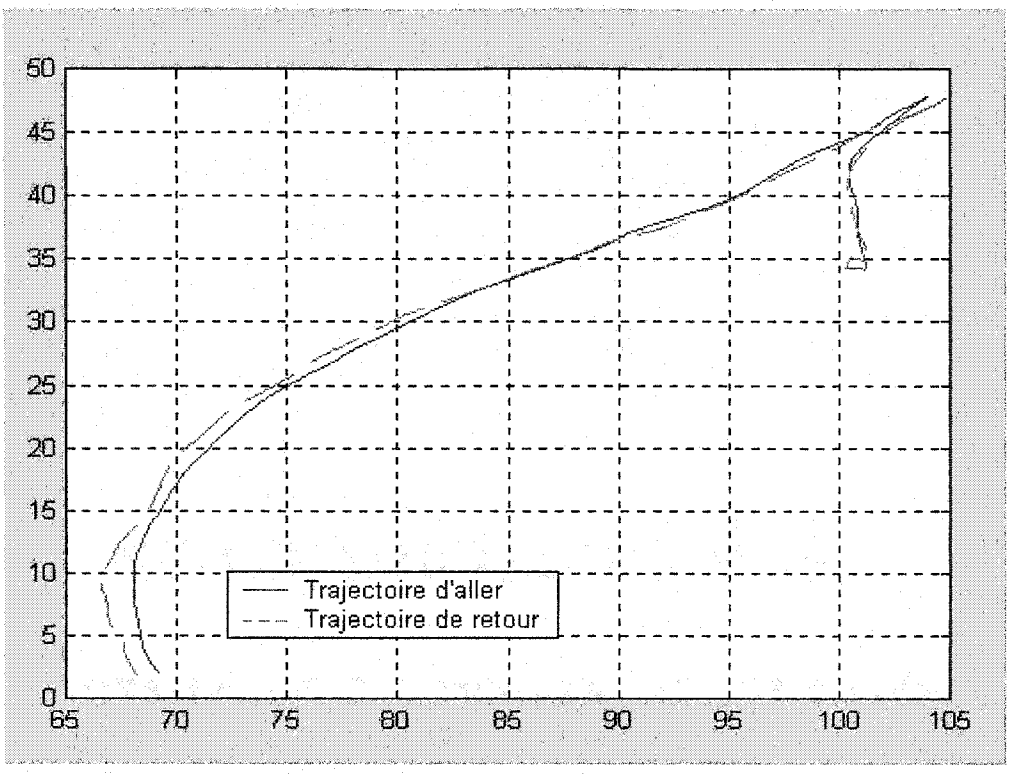


Figure 6.31 Trajectoires de la démonstration : aller-retour

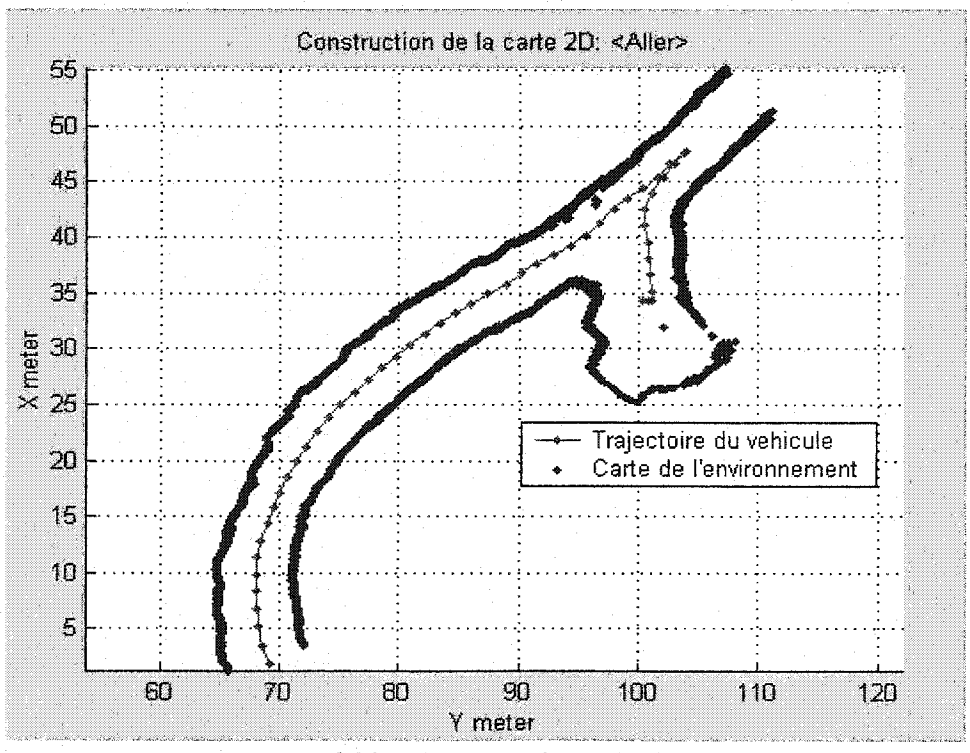


Figure 6.32 Démonstration: phase aller

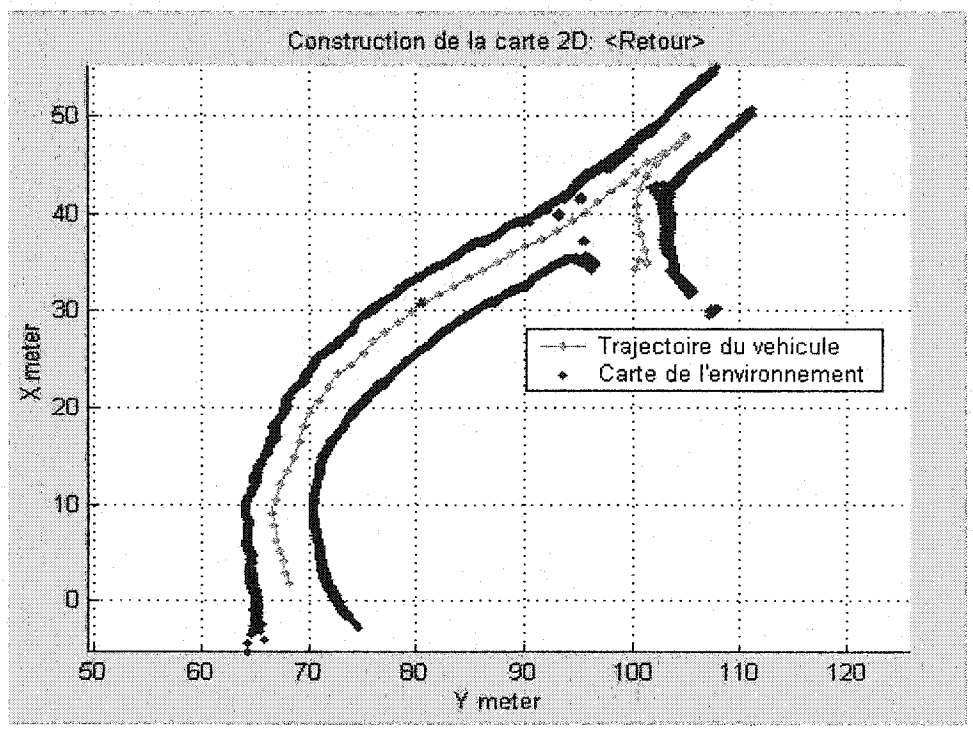


Figure 6.33 Démonstration: phase retour

Pour plus de détails sur les expériences et démonstrations en laboratoire de la robustesse et de la fiabilité de notre système, le lecteur peut se référer à COHEN et al (2000), NSASI et al (1999, 2002) et POLOTSKI et al (2000).

Chapitre 7 : Conclusion générale

7.1 Conclusion

Nous avons proposé un système intégré pour la navigation autonome de véhicule dans un réseau de galerie dont, au départ, seule la connectivité est connue mais dont la géométrie est inconnue et susceptible de changer localement. La navigation autonome dans un tel environnement, nous a conduit à développer un système fonctionnant en deux modes de base : l'exploration initiale de l'environnement et l'exécution autonome des missions globales de navigation. Pendant l'exploration, le système récolte des données sensorielles sur l'environnement et les déplacements du véhicule pour ensuite reconstruire la carte de l'environnement exploré. La carte ainsi obtenue est utilisée pour la navigation en mode d'exécution autonome des missions.

Les expériences effectuées au laboratoire et dans la mine souterraine de Noranda à Bathurst prouvent que le système proposé fonctionne efficacement en ces deux modes de base sans intervention humaine et ne nécessite pas d'infrastructures additionnelles dans l'environnement pour la localisation et le guidage du véhicule. Le système proposé exploite des repères naturels, qui sont les baies et les intersections, pour la localisation et le guidage du véhicule. Les résultats obtenus montrent que ce système permet au véhicule d'explorer et de construire la carte d'un environnement initialement inconnu, de

se localiser et de naviguer de façon autonome dans un long réseau de galeries en se référant à la carte, de détecter et de traverser les intersections et les baies, et enfin de détecter les obstacles.

Notre principale contribution à la recherche est la réalisation d'un prototype du système intégré proposé dans cette thèse. Les contributions innovatrices de ce travail portent sur les éléments suivants:

(1) Mise en évidence d'un *contrôleur de navigation référencée carte*, celle-ci étant acquise préalablement par le véhicule. Ce contrôleur intègre dans sa boucle de contrôle les informations topologiques de l'environnement, les informations télémétriques, les informations odométriques et inertielles. Il permet d'apporter une solution au problème de guidage d'un véhicule autonome à la fois dans des galeries et dans des intersections.

(2) Développement de *stratégies d'intégration multi-capteurs*, en occurrence le gyroscope, l'inclinomètre et l'odomètre. Les mesures d'inclinomètre sont utilisées pour compenser l'erreur du gyroscope due aux perturbations du tangage et du roulis provoquées par l'irrégularité du terrain. Le gyroscope corrigé est ensuite utilisé pour corriger l'orientation d'odométrique.

(3) Développement d'une méthode d'auto localisation basée sur l'identification de *repères naturels* (baies et intersections). Ceci se fait par la mise en correspondance des repères naturels sur la carte avec ceux détectés en ligne.

(4) Réalisation d'un système d'arpentage autonome 2D et 3D en milieu non structuré.

La précision des cartes métriques construites par le système est suffisante pour des fins de navigation autonome du véhicule. Toutefois, la considération des informations 3D de l'environnement lors de la construction de la carte 2D pourra considérablement améliorer la précision de celle-ci.

7.2 Perspective de recherche

La reconstruction d'une *carte globale* (voir figure 7.1) consistante à partir des cartes relatives (voir figure 7.2) construites par le véhicule après exploration des différentes régions de l'environnement constitue un domaine important pour rendre la phase d'exploration plus pratique.

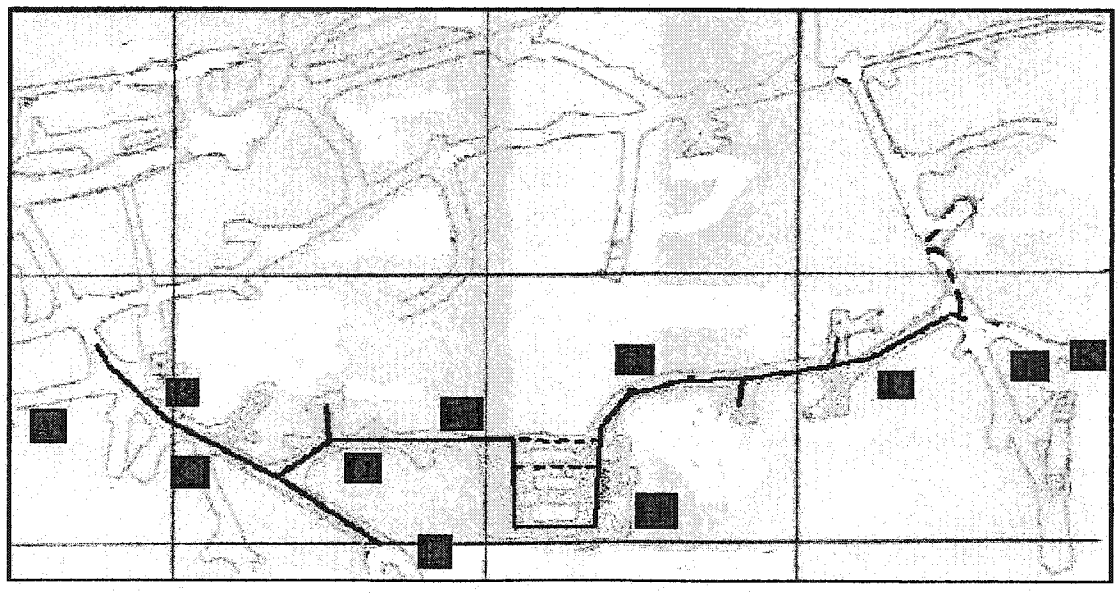


Figure 7.1 Carte globale d'un réseau de galeries

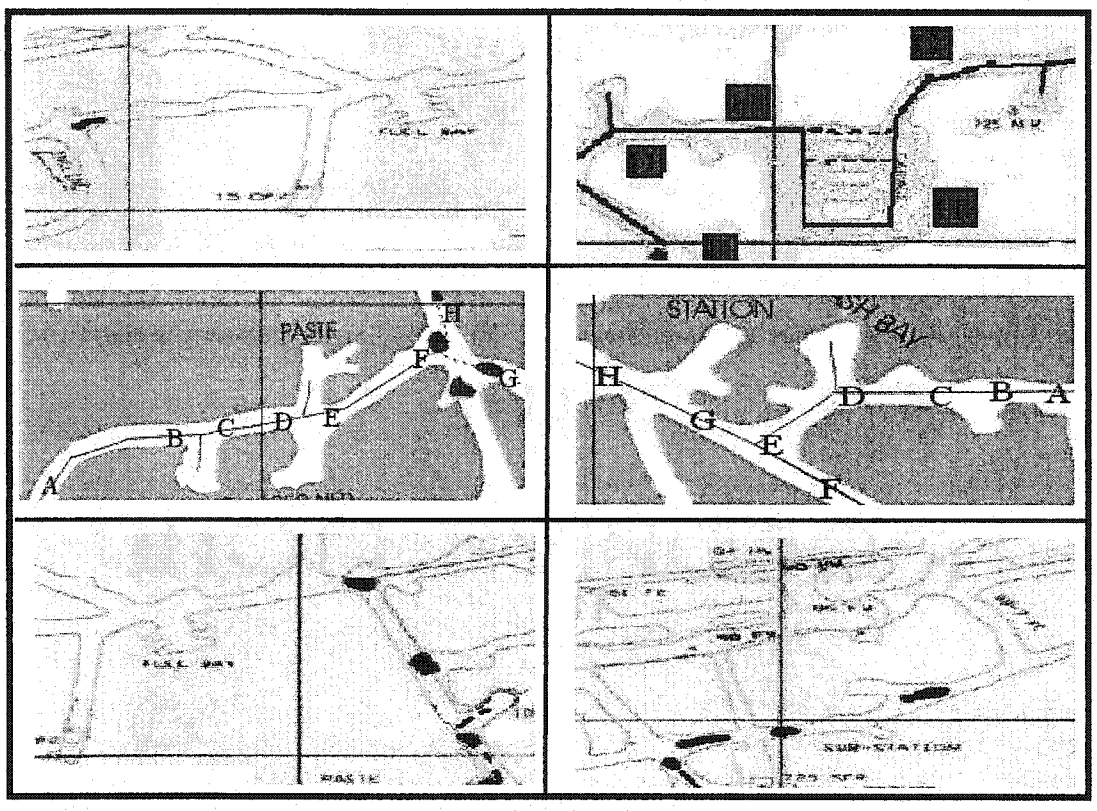


Figure 7.2 Les cartes relatives de différentes sections d'un réseau de galeries

Un accent particulier doit être mis sur la reconstruction de la carte et la localisation simultanée lors de l'exploration afin de minimiser l'erreur de localisation et d'augmenter la consistance de la carte issue de l'exploration.

L'exploitation de l'aspect 3D de l'environnement dans les algorithmes de détection des repères naturels éviterait les problèmes mentionnés à la section 3.5.3.

Bibliographie

AHMADI, MOJTABA, POLOTSKI, V., et al., Path Tracking Control of Tracked Vehicles. Proceedings of the Int. Conf. on Robotics and Automation, Los Angeles, 2000

ALAMI, R., CHATILA, R. et al, An architecture for autonomy, Int. Journal of Robotics Research, vol 17, No 4, avril 1998, pages 315-337.

ANOUSAKA, G.C. et KYRIAKOPOULOS, K.J., Simultaneous Localization and Map Building for Mobile Robot Navigation, IEEE Robotics & Automation Magazine, septembre 1999, pages 42-53.

ARTHUR G.O. MUTAMBARA, Decentralized Estimation and Control for Multisensor Systems, CRC Press Washington, DC 1998

ASTOLFI, A. Exponential stabilization of nonholonomic systems via discontinuous control, IFAC Symposium on Nonlinear Control System Design, Lake Tahoe, CA, 1995.

ASTOLFI, A. Exponential stabilization of a mobile robot, 3rd European Control Conference, Rome, Italy, 1995.

ASTOLFI, A. Exponential stabilization of a car-like vehicle, Conference on Robotics and Automation, Nagoya, Japan, 1995.

AYARI, ISKANDER, Fusion Multi-capteurs dans un cadre Multi-agents : application à un robot mobile, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy I, janvier 1996.

BAILEY, T., DURRANT-WHYTE, H.F. *et al*, Data association for mobile robot navigation: graph theory approach, IEEE Int. conf. on robotics and automation, San Francisco, USA, avril 2000.

BANTA, L. et RAWSON, K.D., Sensor fusion for mining robot", IEEE Trans. On Industry Applications, 1994, 30(5). pages 1321-1325.

BARSHAN, B. et DURRANT-WHYTE, H. F., Inertial Navigation Systems for Mobile Robots, IEEE Trans. On Robotics and Automation. Vol. 11, No. 3, juin 1995.

BETGÉ-BREZETZ, STÉPHANE, Modélisation incrémentale et localisation par amers pour la navigation d'un robot mobile autonome dans un environnement naturel, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, février 1996.

BISSE, E., Automatisation d'une pelle mécanique. Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, mars 1997.

BLOOMQUIST, L et HINTON, ERIC, Towards an Infrastructure less Guidance system: a Proposed Guidance System for autonomous Underground Vehicles", 31st International Symposium on Robotics, Montreal Canada, mai 2000.

BOISSIER, BRUNO, Problème de contrôle dans un système intégré de vision : Utilisation d'un système multi-agents. Thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Grenoble, France, 1997.

BORENSTEIN, J. et FENG, L., Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots, Proc. IEEE Inter. Conf. On Robotics and Automation. Minneapolis, Minnesota, avril 1996.

BORENSTEIN, J., EVERETT H.R. et FENG, L., Navigating Mobile Robots: Sensors and techniques, A.K. Peters, Ltd 1995.

BORGHI, G. et BRUGALI, D., Autonomous map learning for a multisensor mobile robot using diktionmetric representation and negotiation mechanism, Proceeding of the Inter. Conf. on Advanced Robotics, Spain 1995.

BORTHWICK, S. et DURRANT-WHITE, H. Simultaneous localization and map building for autonomous guided vehicles, Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Munich, Germany, 1994, pages 761-768

BROOKS, R. A., A robust layered control system for a Mobile Robot, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol RA 2 No 1, mars 1986.

BROOKS, R. A., Intelligence Without Representation, Artificial Intelligence Journal (47), 1991, pages 139-159.

BULATA, HANNA, Modélisation d'un environnement structuré et localisation sur amers pour la navigation d'un robot mobile autonome, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, mars 1996.

CASTELLANOS, J.A., TARDOS, J.D. et SCHMIDT, G., Building a Global Map of the Environment of a Mobile Robot: The Importance of Correlations, Proc. Of the IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation. Albuquerque, New Mexico, avril 1997, pages.1053-59.

CAUSSE, OLIVIER, Navigation sous contraintes : Planification et contrôle d'exécution pour un robot mobile autonome. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, novembre 1994.

CHATILA, R. et LAUMOND, J-P, Position referencing and consistent Word Modeling for Mobile Robots, IEEE Int. Conf On Robotics and automation, St Louis, MI, USA, 1985.

CHEN, H. et CHEN, H. DA, A Novel Approach for Motion Planing, proc. Of the 1993 IEEE/RSJ Int. Conf. On Intl. Robots and System, Yokohama, Japan, July 26-30, pages 692-696

CHUNG, H. Y., BORENSTEIN, J. et al., Accurate Mobile Robot Dead-Reckoning with a Precision-calibration of Fibre optics Gyroscopes. Proc. IEEE Trans. On Robotics and Automation, Vol. 17, No. 1, Feb. 2001

COHEN, P., POLOTSKI, NSASI BAKAMBU, J. et al., Underground Navigation System. Rapport interne, GRPR, École Polytechnique de Montréal, Oct. 2000.

COHEN, P., POLOTSKI, V, et al., Obstacle Detection System for Underground Mining Vehicles. CIM Bulletin, 1998, vol. 91, pages 75-79.

COTÉ, JACQUES, Détection et évitement d'obstacles pour le véhicule Automatisés : État de l'art et Application minières, Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, août 1992.

COX, J., et al., Blanche—An Experiment in Guidance and Navigation of an Autonomous Robot Vehicle. IEEE Trans. on Robotics and Automation, 1991, vol. 7, No.2.

DEBANNÉ, PHILIPPE, Système d'arpentage automatisé pour les mines souterraines, Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal, Mai 2000.

DE MEDEIROS, ADELARDO A. D., Contrôle d'exécution pour les robots mobiles autonomes : architecture, spécification et validation, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, février 1997.

DE SANTIS, R., Modeling and Path Tracking for a Load-Haul-Dump Vehicle", ASME J. Dynamic Systems, measurement and Control, 1997, vol. 119.

DUDEK, G., et al, Robotics Exploration as Graph Construction, IEEE trans. On Robotics and Automation, Vol. 7, No. 6 .1991.

DUDEK, G., FREEDMAN, P. et HADJRES, S., Using local information in a non-local way for mapping graph-like word, Proc. of IJCAI, 1993, Vol. 2 .page 1637-1645.

DUDEK, G., JENKIN, M., et al, Map Validation and Self-location in a Graph-like World, Proc. of IJCAI, 1993, Vol. 2 .page 1648-1653.

DUDEK, G., FREEDMAN, P. et HADJRES, S., Mapping in Unknown Graph-Like word, Journal of Robotics Systems, 13(8),page 539-559, 1996.

EDLINGER, T, PUTTKAMER, E. V., Exploration of an Indoor-Environment by an Autonomous Mobile Robot", IROS 1994, Munich, Germany. Pages 1278-1784.

EL MUSTAPHA M. et MARHIC, BRUNO, Geometrical matching for mobile robot localization, IEEE Trans. On Robotics and Automation, NY, Vol. 16, No. 5, Oct. 2000, pages 542-552.

EVERETT, H.R., Sensor for Mobile Robot, A.K. Peter, 1995

FUKAO, T., NAKAGAWA, H et ADACHI, N., Adaptive Tracking Control of a Non holonomic Mobile Robot, IEEE Trans. On Robotics and Automation, NY, Vol. 16, No. 5, Oct. 2000, pages 609-614.

FOX, DIETER, THRUM, SEBASTIEN, et al, Position Estimation for Mobile Robots in Dynamic Environments, American Association for Artificial Intelligence (AAAI) 1998, pages 983-987.

GAUTHIER, ÉRIC, Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la commande d'un véhicule autonome, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1993.

GE, S. S. et CUI, Y. J. New Potential Functions for Mobile Robot Path Planing, IEEE Trans. On Robotics and Automation, NY, Vol. 16, No. 5, Oct. 2000, pages 615-620.

GONZALEZ, J., An Iconic Position Estimator for a 2D Laser Range Finder. Proceedings of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Nice, France 1992.

GUTMANN, J.-S., BURGARD, W. et al, An Experimental Comparison of Localization Methods, Proc. Of the IEEE/RSJ Int. Conf. Of Intelligent Robots and Systems, Victoria, Canada, Octobre 1998, pages 736-743.

GUTMANN, J.-S., SCHLEGEL, C., AMOS: comparison of scan matching approaches for self-localization in indoor environments, 1st Euromicro Workshop on Advanced Mobile Robots (EUROBOT), Kaiserslautern, Germany, Octobre 1996.

G.R.P.R. Autonomous Navigation System Demonstration, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, octobre 2000 http://www.ai.polymtl.ca/webDemos/index.html

HASSOUN, MOUNA, Contrôle d'exécution des mouvements d'un robot mobile: application à l'assistance à la conduite automobile, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1994

JOANNIDES, MARC, Navigation intégrée d'un engin sous-marin remorqué filtrage non-linéaire des systèmes sans bruit d'observation et/ou mesures parfaites, Thèse de doctorat, Université de Provence Centre de Mathématiques et d'Informatique, mars 1997.

JUNEAU L., Étude d'un système de guidage autonome pour des environnements structurés. Mémoire de Maîtrise, École Polytechnique de Montréal, août 1993.

JUNEAU L., HURTEAU R. et al., Using laser range data to model tunnel curvature for the automatic guidance of a mining vehicle. Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications, 1993, pages 643-648.

KARIM ABDERRAHIM, Commande de robots mobiles, Thèse de Doctorat, École de Mine de paris, 1993.

LABROSSE, FREDERIC, Modélisation générique d'objets et application aux mines. Thèse de Doctorat, École Polytechnique de Montréal, 1998.

LACROIX, S., CHATILA, R et al., Autonomous Rover Navigation on Unknown Terrains Functions and Integration, LAAS report 02127, laboratoire d'analyse et d'architecture de système, Toulouse, France, mars 2002.

LACROIX, S. et al, Reactive Navigation in out door environments, rapport de recherche LAAS 98364, Toulouse, France, aout 1998.

LAPERRIERE, Y. et al., Pilot Production with Autoguided Truck at Brunswick Mining, CIM Conference, Montreal, Canada, 1998

LAUGIER, CHRISTIAN. et al, Sensor-based Control Architecture for a car-like vehicle, Rapport de recherché No 3552, INRIA, octobre 1998

LEOPOLDO, J., SAURO, L., et VENTURINI, G., Development and Experimental Validation of an adaptive extended Kalman filter for the localization of mobile robots ", IEEE Trans. On Robotics and Automation, NY, Vol. 15, No. 2, avril 1999, pages 219-229.

LEROQUAIS, WILLIAM, Modélisation et commande de robots mobiles à roues en présence de pseudo-glissements, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieurs des Mines de Paris, juin 1998.

LU, Feng. et MILIOS, E., Robot pose estimation in unknown environments by matching 2D range scans. Journal of Intelligent and Robotics systems, 1998

LUCIDO, LAURENCE, Navigation sous-marin référencée terrain par mise en correspondance de cartes bathymétriques, Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, janvier 1998.

LUO, REN C., KAY, MICHAEL G., Multisensor integration and fusion in intelligent systems, IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics, Vol. 19, No. 5, Sep-Oct. 1998.

MADHAVAN, R. et al, Autonomous Underground Navigation of an LHD Using a Combined ICP-EKF Approach, Proc. of the Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, 1998.

MOEZ CHERIF, Planification de mouvements pour un robot mobile autonome tout terrain : une approche par utilisation des modèles physiques, Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique de Grenoble, Octobre 1995.

NEHMZOW, ULRICH, Mobile Robotics: A practical Introduction. Springer 2000

NSASI BAKAMBU, J., POLOTSKI, V., COHEN, P., Heading-Aided Odometry and Range data Integration for Positioning of Autonomous Mining Vehicles. Proc. of IEEE International Conf. on Control Applications, Anchorage AK, Sept. 1999.

NSASI BAKAMBU, POLOTISKI, V., et COHEN, P., Estimation de la pose d'un véhicule autonome: Fusion multi-capteurs. Association Canadienne-Francaise pour l'Avancement de la Science -ACFAS 2000.

NSASI BAKAMBU, J., XU, FUYI, et al, Guideless Autonomous System for Underground Navigation. The CIM2002 International Mining Conference and Trade Exhibition, Vancouver, Canada, avril 2002.

NSASI BAKAMBU, POLOTISKI, V., et COHEN, P., Système intégré de navigation autonome dans un réseau de galeries : guidage, exploration et repérage naturel,

Association Canadienne Française pour l'Avancement de la Science ACFAS 2002.

NSASI BAKAMBU, J., POLOTISKI, V. et COHEN, P., Autonomous System for Underground Mine Exploration and Navigation. The CIM2003 International Mining Conference and Trade Exibition, Montreal, Canada, avril 2003.

NSASI BAKAMBU, J., POLOTISKI, V. et COHEN, P., Autonomous System for Exploration and Navigation in Drift Networks. IEEE International Conference on Intelligent Robots and systems, Las Vegas NV, USA 2003 (Submitted).

OJEDA, L., BORENSTEIN, J. et al., Precision-calibration of Fibre optics Gyroscopes for Mobile Robot Navigation. Proc. IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, San Francisco, CA. April 2000

PAQUEREAU, J., Extraction et exploitation de la structure de cartes de mines souterraines. Rapport de stage, GRPR, École Polytechnique de Montréal, 1999

PLOUZNIKOFF, NICOLAS, Estimation de la pose d'une plate-forme de laboratoire pour l'émulation de machinerie lourde, Mémoire de Maîtrise, Ecole Polytechnique de Montréal, Février 2002.

POLOTSKI, V., NSASI BAKAMBU, J., et al., Guideless Navigation System for Underground Mining Vehicles: Architecture and Experimental Setup. The 31st Int. Symposium on Robotics, Montreal, Canada, Mai 2000

Q-NAVIGATOR, HUNS underground navigation system. site web. http://www.qnav.se

RAIMUNDEZ, A. et DELGADO ROMERO, Pose Acquisition through Laser Measures in Structured Environments, Int. Federation of autonomous control (IFAC), Intelligent Components for Vehicles-ICV 98, Seville, Spain, march 23-24, 1998.

REIGNIER, PATRICK, Pilotage réactif d'un robot mobile : étude du lien entre la perception et l'action, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, novembre 1998.

ROBERTS, J. M. et al., Autonomous Control of Underground Mining Vehicles using Reactive Navigation, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, 2000.

SAINT-AMANT, M. et al, Evaluation of automatic guidance systems and their applicability to load haul and dump (LHD) vehicles, Proc. Of the 3rd Canadian Symposium on Mining Automation, Montréal, Canada, 1998, pages 177-186.

SARATA, S., KIYAMA, T. et SEISHO, M., Development of a mechanism for underground coal mines, 5th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing, Tokyo, Japan, 1986, pages 53-58.

SEAN, P., ENGEISON et DREW Mc DEERMOTT, Error correction in Mobile robot Map Learning, IEEE Int. conference on robotics and automation, France, 1992.

SGOUROS, N. *et al,* Localised qualitative navigation for indoors environments. Proc. of IEEE Int. Conf. on robotics and automation, Minneapolis, 1996, pages 921-925.

SHAFFER, G., et STENTZ, A., A Robotics System for Underground Coal Mining, IEEE trans. Conf. on Robotics and automation, Nice, France, mai 1992, pages 633-638.

SHAFFER, G, STENTZ, A. et al, Position estimation for Underground Mine Equipment, IEEE trans. on Industry application, Vol. 28, No 5, 1992

SIMMONS et KOENIG, Probabilistic robot navigation in partially observable environment, Proceedings of the Int. Joint conference on Artificial intelligence. 1995, Vol. 2, pages 1080-1087.

STENTZ, A. et HERBER, M., A Complete Navigation System for Goal acquisition in Unknown Environments, Proc. Of the IEEE/RSJ. Int. Conf. Of Intelligent Robots and Systems, Victoria, Canada, octobre 1995, Vol. 1, pages 736-743.

STENZEL, ROLAND, Navigation, Site web: http://www-i4.informatik.rwth-aachen.de/~stenzel/Navigation.html

SUKKARIEH, S., NEBOT,E. et DURRANT-WHYTE, H., A high integrity IMU GPS navigation loop for autonomous land vehicle application, IEEE Trans. On Robotics and automation, vol. 15, No 3, juin 1999, pages 572-578.

TAMROCK, Mine Automation, Mining magazine, 2000, pages 12-16.

TOSHIHIRO, A. et al, Positioning of vehicle on undulating ground using GPS and dead reckoning, Proceeding of the IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, mai 1998, pages 3443-3448.

THRUN, SEBASTIEN, WALFRAM, B. et FOX, DIETER, A real-time algorithm for mobile robot Mapping with applications to multi-robot and 3D mapping, IEEE Int. conf. on Robotics and Automation, San Francisco, avril 2000.

WANG, MING C., Location estimation and uncertainty analysis for mobile robots, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and automation, 1988, pages 1231-1235

WILLIAM, H. P., et al., Numerical Recipes in C the art of scientific computing, Cambridge University press 1990.

WILSON, H.W., Probabilistic self-localization for mobile robots, IEEE Trans. On Robotics and Automation, NY, Oct. 2000, pages 542-552.

WU, W., POLOTSKI, V et COHEN, P., Sensor-Based Navigation System for Underground Vehicles", 1st International Workshop on Robotics for Mining Applications, Brisbane Australia, octobre 2000.

YAMAUCHI, B., et al, Integrating Exploration and Localisation for Mobile Robot, Rapport technique de Naval Research Laboratory, Washington, 1996

YAMAUCHI, B., Frontier-Based Exploration Using Multiple Robots, Proc. Of the second Int. Conf. On Autonomous agents, Minneapolis, MN, mai 1998.

YAMAUCHI, B. et BEER, R., Spatial learning for navigation in dynamic environments, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 26(3), 1996, pages 496-505.

ZHANG, ZHENG YOU, Le problème de la mise en correspondance: L'état de l'art, INRIA Rapport de recherche No 2146, France 1993.

ZHANG, Z., Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces, International Journal of Computer Vision, 1994, vol. 13 no. 2, pages 119-152.

ZOPPIS, BRUNO, Outils pour l'intégration et le contrôle en vision et robotique mobile, Thèse de doctorat, Institut national Polytechnique de Grenoble, France, 1997.