



Contribution à la navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteurs

Viviane Cadenat

► To cite this version:

Viviane Cadenat. Contribution à la navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteurs. Robotique [cs.RO]. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2011. tel-00678488

HAL Id: tel-00678488

<https://theses.hal.science/tel-00678488>

Submitted on 13 Mar 2012

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Habilitation à diriger des recherches

présentée devant

l'Université Paul Sabatier de Toulouse

par

Viviane CADENAT

Docteur de l'UPS

Maître de conférences à l'UPS

Contribution à la navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteurs

préparée au LAAS-CNRS

Soutenue le 2 Décembre 2011 devant le jury composé de :

<i>Rapporteurs :</i>	François CHAUMETTE	-	Directeur de recherche INRIA (IRISA Rennes).
	Philippe MARTINET	-	Professeur Ecole Centrale de Nantes.
	Philippe POIGNET	-	Professeur Université Montpellier II.
<i>Examineurs :</i>	Seth HUTCHINSON	-	Professeur University of Illinois.
	Michel DEVY	-	Directeur de recherche CNRS (LAAS).
	Philippe SOUÈRES	-	Directeur de recherche CNRS (LAAS).
<i>Garant :</i>	Michel COURDESSES	-	Professeur Université P. Sabatier.

Table des matières

Remerciements	i
Acronymes	iii
Préambule	v
A Bilan d'activités	1
I Bref curriculum vitæ	3
II Activités de recherche	7
II.1 Synthèse des travaux	7
II.1.1 Navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteur	7
II.1.2 Asservissement visuel de systèmes complexes	10
II.2 Activités d'encadrement	10
II.2.1 Thèses	10
II.2.2 Stages de master et DEA	11
II.2.3 Activités d'encadrement issues de l'enseignement	12
II.3 Animation scientifique	13
II.3.1 Participation à des projets de recherche	13
II.3.2 Rayonnement scientifique	14
II.4 Liste des publications	17
II.4.1 Publications réalisées depuis mon doctorat	17
II.4.2 Publications réalisées pendant mon doctorat	20
III Activités d'enseignement	21
III.1 Généralités	21
III.1.1 Activités menées avant mon recrutement	21
III.1.2 Activités menées après mon recrutement	22
III.2 Contenu des enseignements dispensés	23
III.2.1 A l'UPS	24
III.2.2 Hors de l'UPS	28
III.2.3 Bilan : Contributions pédagogiques spécifiques	28
III.3 Activités administratives au sein de l'université	28
III.3.1 Responsabilités pédagogiques	29
III.3.2 Fonctions d'intérêt général	30
B Projet scientifique	33
IV Problématique	37
IV.1 Approches globales	37
IV.2 Approches locales	39
IV.3 Analyse des deux types d'approches	41

V Contribution à la navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteurs	43
V.1 Approche retenue	43
V.1.1 Objectifs et contraintes	43
V.1.2 Modélisation du problème	44
V.1.3 Principe générique des stratégies de commande synthétisées	49
V.2 Premiers travaux : des obstacles non occultants aux obstacles occultants	54
V.2.1 Navigation par asservissement visuel en présence d'obstacles statiques non occultants	54
V.2.2 Navigation par asservissement visuel en présence d'obstacles statiques occultants	67
V.2.3 Conclusion	82
V.3 Travaux actuels : vers la réalisation de grands déplacements dans des environnements « humains » peu connus	83
V.3.1 Extension des algorithmes en présence d'incertitudes	83
V.3.2 Réalisation de longs déplacements	88
V.3.3 Navigation par asservissement visuel en présence de l'homme	93
V.4 Conclusion	99
VI Prospective	101
VI.1 Extension des travaux « historiques »	101
VI.1.1 Vers la réalisation de tâches de navigation « au long cours » dans des environnements « réalistes »	102
VI.1.2 Vers un environnement « humain » évolutif	105
VI.2 Coordination de systèmes complexes par asservissement visuel	107
VI.2.1 Vers l'asservissement visuel coordonné d'un système à deux bras	107
VI.2.2 Vers l'automatisation des tâches de biomicromanipulation par asservissement visuel	108
A Petit panorama de la thématique « asservissement visuel »	111
A.1 Les structures de commande fondatrices de l'asservissement visuel	111
A.2 Les évolutions	113
A.2.1 Fondements théoriques	113
A.2.2 Applications	115
A.3 Conclusion	115
B Description des différents systèmes robotiques utilisés dans nos travaux	117
B.1 Super Scout II	117
B.2 Rackham	117
B.3 Peeke II	118
B.4 Modélisation de ces robots	119
Bibliographie	121
C Sélection d'articles	137

Table des figures

III.1 Répartition du service par matière et par niveau.	23
III.2 Répartition du service entre les filières « classiques » et IUP.	24
V.1 Les différents systèmes robotiques utilisés.	45
V.2 Modèle sténopé de la caméra.	46
V.3 Un exemple d'amer artificiel et de résultats renvoyés par le tracker.	47
V.4 Détection du risque de collision.	55
V.5 Evaluation du risque de collision et évolution de μ_{coll}	57
V.6 Evitement d'obstacle par potentiel répulsif rotatif et suivi de chemin.	61
V.7 Trajectoire effectuée par le robot.	63
V.8 Evolution des commandes appliquées au robot et du risque de collision – Enchaînement par combinaison convexe.	64
V.9 Evolution des vitesses angulaires de la base mobile et de la platine – Enchaînement dynamique.	65
V.10 Asservissement visuel et évitement de collision par la méthode des potentiels rotatifs. .	66
V.11 Evolution de la commande $\dot{q}$	66
V.12 Caractérisation du risque d'occultation.	68
V.13 Différents risques d'occultation.	69
V.14 Enchaînement par combinaison convexe.	71
V.15 Enchaînement dynamique.	72
V.16 Trajectoire effectuée par le robot.	72
V.17 Evolution des risques de collision et d'occultation.	73
V.18 Cas d'échec : trajectoire effectuée par le robot.	73
V.19 Reconstruction des indices visuels : trajectoire effectuée par le robot.	77
V.20 Evolution des erreurs $\ s - \hat{s}\ $ et $\ z - \hat{z}\ $	79
V.21 Nouvelle architecture de contrôle : couplage des algorithmes de reconstruction et de la commande.	80
V.22 Evolution de la trajectoire du robot et de l'erreur $\ s - \hat{s}\ $	81
V.23 Evolution de la profondeur réelle et reconstruite en contexte bruité et non bruité. . .	84
V.24 Simulation pour un estimateur avec n images.	86
V.25 Estimation de la profondeur avec le robot Peeke II.	86
V.26 Nouvelle architecture de contrôle.	87
V.27 Superviseur.	90
V.28 Environnement, carte topologique et trajectoire du robot.	92
V.29 Evolution des commandes et reconstruction automatique des indices visuels de référence. .	94
V.30 Evolution du robot, des indicateurs de performances et des vitesses appliquées.	98
B.1 Les différents systèmes robotiques utilisés.	118
B.2 Modélisation de la base mobile équipée d'une caméra montée sur une platine.	119

Liste des tableaux

III.1 Service d'enseignement effectué en tant que vacataire et ATER.	22
V.1 Synthèse de l'analyse comparative.	60
V.2 Erreurs obtenues.	77

Remerciements

Les travaux présentés dans ce manuscrit constituent la synthèse de douze ans d'activités de recherche menées au sein du Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS. Je tiens à remercier les directeurs successifs du LAAS qui m'ont accueillie, d'abord pour mon doctorat puis dans le cadre de mon recrutement en tant que maître de conférences à l'université Paul Sabatier : Malik Ghallab, Raja Chatila, Jean-Louis Sanchez, Jean Arlat.

Je souhaite également exprimer toute ma gratitude à François Chaumette, Directeur de Recherche à l'INRIA Rennes Bretagne Atlantique, Philippe Martinet, Professeur à l'Ecole Centrale de Nantes, et Philippe Poignet, Professeur à l'Université de Montpellier II qui ont accepté la charge de rapporter sur ces travaux. Merci pour le temps que vous avez consacré à la lecture du manuscrit ainsi que pour vos questions, vos conseils et nos échanges scientifiques à l'occasion de la soutenance.

Mes remerciements vont aussi naturellement à Michel Devy, Directeur de Recherche au CNRS et responsable de notre groupe de recherche, pour avoir accepté de présider ce jury. J'exprime également ma gratitude aux examinateurs qui m'ont fait l'honneur et l'amitié de participer à ce jury : Seth Hutchinson, Professeur à l'Université de l'Illinois (USA), qui a accepté de traverser l'Atlantique pour seulement quelques jours en France ; et Philippe Souères, Directeur de Recherche au CNRS, qui a guidé mes premiers pas dans le monde de la recherche et à qui je dois beaucoup. Je voudrais également exprimer ma plus profonde reconnaissance à Michel Courdesses, Professeur à l'Université Paul Sabatier, pour la confiance dont il a fait preuve en acceptant d'être le garant de ces travaux. Merci, Michel, pour ton soutien, ton amitié et tes qualités d'enseignant dont j'ai bénéficié plus d'une fois.

Ce manuscrit n'aurait pu être écrit sans l'aide de mes stagiaires et doctorants successifs. Que David Folio, Nouredine Ouadah et Adrien Durand Petiteville trouvent ici l'expression de ma reconnaissance et de mon amitié à leur égard.

Je souhaite en outre remercier mes collègues de travail, chercheurs, enseignants-chercheurs, administratifs pour leur aide et leur bonne humeur. Un merci tout particulier à toute l'équipe de l'IUP SI avec un clin d'œil à Isabelle Ferrané, à Michel Taïx et à Marie-Louise Sitbon. Merci à Frédéric Lerasle et Thierry Sentenac pour les collaborations scientifiques passées et celles qui se profilent à l'horizon. Merci aussi à Natacha Owanssi pour son aide dans l'organisation matérielle de ma soutenance et de divers autres événements. Merci enfin à Marc Renaud et à Patrick Danès pour l'aide scientifique et le soutien qu'ils m'ont apportés ainsi que pour les bons moments passés ensemble.

Je ne saurais conclure ces remerciements sans exprimer toute ma gratitude à tous ceux qui m'ont accompagnée ou apporté leur aide sous quelque forme que ce soit sur cette route exaltante, exigeante et parfois difficile qu'est la vie. Merci donc à François-Xavier et Daniel pour leur amitié, leurs conseils « éclairés », et leur soutien fidèle. Merci aussi à Yves, Pierre et Emmanuel pour leur support et leurs encouragements pendant la préparation de cette HDR. Un grand merci enfin à mes amis dont il est impossible de dresser une liste exhaustive. Que tous trouvent ici un témoignage de ma reconnaissance.

Naturellement, je ne peux terminer sans exprimer ma plus profonde gratitude à ma famille, en particulier à mes parents et à ma sœur. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis. Cette HDR est aussi la leur...

Acronymes

Laboratoires et universités

AIP – PRIMECA	Atelier Inter-universitaire de Productique – Pôle de Ressources Informatiques pour la MECAnique.
CDTA	Centre de Développement de Technologies Avancées.
CERCO	Centre d'Etudes et de Recherches sur la Cognition.
CPGE	Classes Préparatoires aux Grandes Ecoles.
EMAC	Ecole des Mines d'Albi – Carmaux.
ENSEEIH	Ecole Nationale Supérieure d'Electronique, d'Electrotechnique, d'Informatique et d'Hydraulique de Toulouse.
ENSPS	Ecole Nationale Supérieure des Sciences Physiques de Strasbourg.
Institut PRISME	Institut Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Energétique.
IUP	Institut Universitaire Professionnalisé.
LAAS	Laboratoire d'Analyses et d'Architectures des Systèmes.
LAPMA	Laboratoire d'Adaptation Perceptivo Motrice et Apprentissage.
PCA	Physique, Chimie, Automatique.
UPS	Université Paul Sabatier.
UPMC	Université Pierre et Marie Curie.

Sigle des formations

AITR	Automatique, Informatique, Temps Réel.
CIMP	Chimie, Informatique, Mécanique, Physique.
EEA	Electronique, Electrotechnique, Automatique.
GEII	Génie Electrique et Informatique Industrielle.
IDIM	Ingénierie du Diagnostic, de l'Instrumentation et de la Mesure.
IRR	Intelligence Artificielle, Reconnaissance des Formes et Robotique.
ISME	Ingénierie des Systèmes et Microsystèmes Embarqués.
ISTR	Ingénierie des Systèmes Temps Réel.
PISI	Productique : Ingénierie des Systèmes et Informatisation.
SAID	Systèmes Automatiques et Informatique Décisionnelle.
SI	Systèmes Intelligents.
SYGELEC	SYstèmes du Génie ELECTrique.

Divers

ACI	Action Concertée Incitative.
ECMS	Electronics, Control, Measurement and Signals.
MINAS	MIcro et NAno Systèmes.
MOCOSY	Modélisation, Optimisation et Conduite des Systèmes.
PAST	Professeur ASsocié Temporaire.
PGE	Projet de Grande Envergure.
RIA	Robotique et Intelligence Artificielle.
RAP	Robotique, Action et Perception.
RIS	Robotique et Interaction.
ROBEA	ROBotique et Entités Artificielles.
TER	Travaux d'Etudes et de Recherche.

Préambule

Ce mémoire décrit les activités que j'ai menées au sein du LAAS-CNRS et de l'université Paul Sabatier ainsi que les différentes responsabilités que j'ai assumées depuis mon recrutement en tant que maître de conférences en 2000. Il est organisé en deux parties distinctes. La première synthétise l'ensemble de ces activités, balayant les volets recherche, enseignement et administration propres au métier d'enseignant-chercheur. La seconde partie s'intéresse à mes activités de recherche centrées autour de la navigation référencée multi-capteurs. Elle détaille mes contributions à cette thématique et présente les perspectives envisagées. Nous revenons tout d'abord sur le rapport d'activités.

Première partie

Bilan d'activités

Bref curriculum vitæ

Viviane CADENAT

Née le 4/11/1972 à Narbonne (Aude).
Nationalité française.

Adresse personnelle :

5, rue René Cassin - Appt D17
31320 Castanet Tolosan

Adresse professionnelle :

Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes du CNRS
Groupe Robotique, Action et Perception (RAP)
7, avenue du Colonel Roche
31077 Toulouse cedex 4
Téléphone : 05.61.33.68.32 / Fax : 05.61.33.64.55 E-mail : cadenat@laas.fr

Maître de conférences à l'Université Paul Sabatier

61^{ème} section

depuis le 1^{er} septembre 2000

Titulaire depuis le 1^{er} septembre 2001

Formation universitaire

- 1996 – 99 :** Doctorat de l'Université Paul Sabatier de Toulouse spécialité : Robotique.
Mention Très Honorable.
Soutenu le 16 décembre 1999.
Thème : Commande référencée multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile.
- 1995 – 96 :** D.E.A. Automatique et Informatique Industrielle option Automatique.
Mastère en Automatique Avancée et Ingénierie des Systèmes.
Ecole Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, Toulouse.
- 1994 – 95 :** D.E.S.S. et ingéniorat en Intelligence Artificielle, Reconnaissance de Formes et Robotique.
Université Paul Sabatier, Toulouse.
- 1992 – 94 :** Licence et maîtrise Electronique, Electrotechnique, Automatique (EEA).
Option Automatique, mention Télécommunications.
Université Paul Sabatier, Toulouse.
- 1990 – 92 :** D.E.U.G. A option Sciences Pour l'Ingénieur.
Université Paul Sabatier, Toulouse.

Activités de recherche

▷ Activité scientifique

- *Laboratoire et équipe de rattachement* : LAAS-CNRS, groupe Robotique, Action et Perception.
- *Thématique* : Développement de stratégies de commande référencées multi-capteurs pour robots mobiles et bras manipulateurs.
- *Mots-clés* : Robotique, asservissement visuel, commande référencée multi-capteur.
- *Publications* : 37 publications au total dont 1 chapitre de livre, 8 revues internationales, 20 conférences internationales avec actes et comité de lecture, 7 workshops internationaux, et 1 conférence nationale.

▷ Responsabilités d'encadrement (titulaire de la PES depuis 2009)

- 1 thèse soutenue en 2007, 2 thèses en cours qui seront soutenues en 2011, 13 stages de master (M1 et M2).
- Suivi de stages en entreprise (environ trois par an) pour des étudiants de niveau master (M1 et M2). L'un de ces suivis s'est concrétisé par une publication [18].
- Encadrement de 7 TER (travaux d'études et de recherches) de niveau M1.

▷ Animation scientifique

- *Implication dans les projets*
 - ◇ Participation à l'Action Concertée Incitative (ACI) “*De la perception à la commande*” (2001 – 2005).
 - ◇ Participation au projet ROBEA *EGOCENTRE* (2003 – 2006).
 - ◇ Participation au projet européen *COMMROB* (2007 – 2010).
 - ◇ Participation au projet ANR *ICARO* : ce projet débute en juin 2011.
 - ◇ Coordinatrice du projet ANR *BM2V* soumis à l'appel à projet RPIB (Recherches Partenariales et Innovation Biomédicale) en 2011.

- *Rayonnement scientifique*
 - ◇ Mise en place de collaborations :
 - au sein du LAAS, à la fois dans et en dehors du groupe RAP
 - en France (avec l'institut PRISME de Bourges) et à l'étranger (avec le Beckman Institute (Urbana Champaign university) et le CDTA d'Alger). Cette dernière collaboration vient d'être formalisée avec l'acceptation d'un projet international de coopération.
 - ◇ Fonctions d'intérêt général
 - Depuis 1999 : Membre du comité de programme du workshop ECMS (Electronics, Control, Measurement and Signals). Ce workshop vient d'être labellisé IEEE.
 - Depuis 2007 : Membre du conseil scientifique du pôle RIA du LAAS.
 - En 2010 : Organisation du workshop du pôle RIA.
 - Activités de relecture pour plusieurs revues et conférences.
 - Modération de sessions pour plusieurs congrès et workshops.
 - ◇ Divers
 - Participation à plusieurs journées thématiques du GDR robotique en tant qu'orateur.
 - Distinction : L'article [19] a été finaliste du « TJ Tarn Best Paper in Robotics ». Il a ainsi été retenu dans les 5 meilleurs papiers présentés lors de la conférence ROBIO à Kunming (Chine) en 2006.

Activités d'enseignement

- ▷ **UFR et département de rattachement** : UFR Physique, Chimie, Automatique et département Electronique, Electrotechnique, Automatique.
- ▷ **Volume horaire annuel moyen** : environ 205h équivalent TD (depuis mon recrutement).
- ▷ **Disciplines enseignées** : Robotique, Automatique.
- ▷ **Public** : De la Licence 1 au Master 2. Le détail des formations dans lesquelles je suis intervenue est donné dans le chapitre III.
- ▷ **Responsabilités pédagogiques** :
 - *Depuis septembre 2011* : Co-responsable du parcours Intelligence Artificielle, Reconnaissance des formes et Robotique (IRR) du master 2 Ingénierie des Systèmes Temps Réel (ISTR) en collaboration avec Régine André-Obrecht, professeur à l'université P. Sabatier (section 27).
 - *Depuis septembre 2001* : Co-responsable du master 1 de l'IUP Systèmes Intelligents (SI) avec Isabelle Ferrané, maître de conférences à l'université P. Sabatier (section 27).
 - Responsable des UE robotique et automatique en L3 et M1.
- ▷ **Fonction d'intérêt général** :
 - *Recrutement*
 - ◇ 2001 – 2004 Membre élu suppléant de la commission de spécialistes 61^{ème} section de l'Université Paul Sabatier.
 - ◇ 2004 – 2008 Membre élu titulaire de la commission de spécialistes 61^{ème} section de l'Université Paul Sabatier.
 - ◇ 2006 Membre titulaire d'un jury de recrutement pour un ingénieur de recherche pour l'ENSI de Limoges.
 - ◇ 2009 Membre extérieur d'un comité de sélection pour le recrutement d'un maître de conférences à l'université de Perpignan Via Domitia en section 61.
 - ◇ 2010
 - Membre extérieur d'un comité de sélection pour le recrutement d'un maître de conférences à l'université d'Evry Val d'Essonne en section 61.

- Membre d'un jury de recrutement pour un assistant ingénieur pour l'Université P. Sabatier.
- *Autres*
 - ◇ En 2005 et 2006 : Responsabilité de la salle de TP automatique en collaboration avec F. Gouaisbaut, maître de conférences à l'université P. Sabatier (section 61).
 - ◇ En 2009, 2010 et 2011 : Représentation de l'IUP SI au conseil de perfectionnement du département GEII de l'IUT "A" Paul Sabatier en remplacement du directeur.

Activités de recherche

Sommaire

II.1 Synthèse des travaux	7
II.1.1 Navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteur	7
II.1.2 Asservissement visuel de systèmes complexes	10
II.2 Activités d'encadrement	10
II.2.1 Thèses	10
II.2.2 Stages de master et DEA	11
II.2.3 Activités d'encadrement issues de l'enseignement	12
II.3 Animation scientifique	13
II.3.1 Participation à des projets de recherche	13
II.3.2 Rayonnement scientifique	14
II.4 Liste des publications	17
II.4.1 Publications réalisées depuis mon doctorat	17
II.4.2 Publications réalisées pendant mon doctorat	20

II.1 Synthèse des travaux

Mes activités de recherche ont débuté au sein du groupe RIA¹ du LAAS-CNRS durant la préparation de mon doctorat (1996 – 1999). Dans le prolongement de ma thèse, je me suis tout d'abord focalisée sur la commande référencée multi-capteurs pour la navigation autonome d'un robot mobile. J'ai ensuite récemment élargi ma thématique de recherche à la commande référencée vision de systèmes complexes, tels qu'un manipulateur à deux bras.

II.1.1 Navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteur

L'objectif à long terme est de réaliser des tâches de navigation guidées par la vision de manière sûre et autonome dans des environnements structurés dynamiques, peu connus et éventuellement encombrés. Nous souhaitons réaliser ces tâches sur la seule base de données fournies par les capteurs embarqués sur notre robot : une caméra et des capteurs de proximité dédiés à la détection d'obstacles. Il s'agit donc ici d'élaborer des stratégies de commande référencées multi-capteurs permettant à un robot mobile d'effectuer les tâches de navigation considérées. Différents problèmes se posent alors :

le séquençement de tâches : en effet, une tâche complexe ne peut être réalisée « directement » mais doit d'abord être divisée en tâches élémentaires qu'il faut ensuite enchaîner. Nous avons d'abord proposé différentes techniques de séquençement [8] avant d'élaborer un formalisme d'enchaînement

1. Ce groupe a été scindé en 2006 en trois équipes : RIS, RAP et GEPETTO. J'appartiens aujourd'hui au groupe RAP.

de tâches dynamique [22]. Ce travail a été initié au sein de l'ACI *De la perception à la commande : une histoire de repères* et du projet ROBEA EGOCENTRE. Dernièrement, en lien avec les résultats obtenus dans le traitement de la perte des données visuelles (cf. deuxième item), nous avons comparé ces différentes techniques d'enchaînement lorsque l'on exécute une tâche de navigation référencée vision en présence d'obstacles occultants. Les résultats obtenus et l'analyse effectuée ont été acceptés pour publication dans une revue internationale [2]. Enfin, en complément à ces travaux, nous avons aussi étudié le problème de l'enchaînement de tâches hors du cadre de la commande référencée capteur. Nous nous sommes focalisés sur une tâche consistant à suivre un chemin de référence en présence d'obstacles. L'approche développée consiste à modifier continûment un paramètre de la loi de commande lorsque l'évitement est nécessaire. Elle s'apparente donc à un enchaînement dynamique. Elle a été validée expérimentalement et publiée en revue [7].

la gestion de la perte (totale ou partielle) des données visuelles pendant l'exécution de la mission : ce problème a constitué le cœur du doctorat de David Folio que j'ai encadré à 100% entre 2004 et 2007. Les premiers travaux développés dans cette thèse ont consisté à définir des stratégies de commande permettant d'éviter que les occultations se produisent tout en assurant la non collision [20][21][19]². Cependant, ayant montré que l'évitement systématique des occultations n'est pas toujours la stratégie la plus pertinente, nous avons proposé un formalisme générique permettant de déterminer les indices visuels lorsque ceux-ci sont momentanément indisponibles. Nous avons ensuite couplé nos algorithmes de reconstruction avec nos lois de commande de manière à réaliser la tâche de navigation souhaitée en dépit de la perte des indices visuels. Ces derniers résultats ont fait l'objet d'une contribution à ouvrage [1]. Ils ont également été publiés dans une revue internationale [5], ainsi que dans plusieurs conférences internationales [17][16][15]. Cependant, ces résultats ayant été obtenus dans un contexte non bruité, nous avons évalué ces méthodes dans un cadre réaliste. Ce travail, initié dans [Master-LH], a été repris dans le premier volet de la thèse d'A. Durand Petiteville (2008 – 2011) que je co-encadre avec M. Courdresses, professeur à l'université P.Sabatier. Ici, nous avons élaboré des techniques permettant de reconstruire la profondeur de l'amer en présence de différents bruits (bruit dans l'image et/ou sur l'odométrie, etc.) [25][12][11][10][24]. La profondeur ainsi reconstruite est utilisée pour déterminer les indices visuels lorsqu'ils sont indisponibles [25][12], ainsi que pour calculer automatiquement la valeur des indices visuels de référence depuis la position initiale du robot [11]. Les méthodes développées ont été validées en simulation et expérimentalement [10]. Les derniers résultats obtenus sont très concluants et devraient être soumis à une revue internationale.

la réalisation de longs déplacements par asservissement visuel : Cet aspect fait l'objet des travaux menés dans le deuxième volet de la thèse d'A. Durand Petiteville. La méthode proposée a été développée en collaboration avec Seth Hutchinson, professeur à l'université de l'Illinois (USA). Il s'agit ici de réaliser de longs déplacements par asservissement visuel pour atteindre un amer non visible depuis la position initiale du robot. La visibilité de l'amer d'intérêt dès le début de la mission étant une condition nécessaire à la réalisation du mouvement, il est impossible d'utiliser des asservissements visuels conventionnels. Afin d'étendre le rayon d'action de l'asservissement visuel, nous nous sommes appuyés à la fois sur les solutions proposées dans la littérature ainsi que sur les travaux développés dans les deux items précédents. Conformément à ce qui est classiquement proposé, nous avons modélisé l'environnement par une carte topologique dont les nœuds sont définis par des amers d'intérêt présents dans l'environnement. Il suffit ensuite d'extraire dans le graphe topologique correspondant un chemin permettant d'atteindre le but. Ce chemin est défini par une séquence d'amers visuels à atteindre

2. [19] a été finaliste du prix "T.J. Tarn Best Paper in Robotics".

successivement. Enfin, la navigation est réalisée en enchainant différents correcteurs permettant de (i) converger vers l’amer courant (asservissement visuel basé sur données réelles si ce dernier est visible ou estimées s’il y a occultation), (ii) garantir la non collision, (iii) rechercher l’amer suivant, etc. Nous avons ainsi proposé un superviseur permettant de sélectionner le bon correcteur à appliquer en fonction des événements se produisant lors de la navigation. Les transitions entre les différents correcteurs ainsi que la reconstruction des informations visuelles non disponibles sont gérées par les méthodes mentionnées plus haut, démontrant l’inter-complémentarité de chaque point évoqué ici. La faisabilité de l’approche proposée a été démontrée dans [10] où une première navigation au long cours relativement ad-hoc a été réalisée. L’extension de ces travaux a conduit à l’algorithme de supervision sus-mentionné. Celui-ci a été validé en simulation [9]. Des tests expérimentaux seront également menés sur les robots du groupe. Un article décrivant ces aspects devrait également être soumis à une revue internationale.

la saturation des actionneurs pendant la réalisation de la tâche et celui de la robustesse des lois de commande référencées vision par rapport aux incertitudes et bruits de mesure :

Le travail mené dans cette partie est le fruit d’une collaboration avec M. Courdresses, professeur à l’université P. Sabatier. Dans ce travail, nous sommes essentiellement focalisés sur le problème de la robustesse en asservissement visuel. Nous avons ainsi développé une approche générale permettant d’analyser la sensibilité d’une loi de commande référencée vision vis-à-vis des erreurs de calibration et des bruits de mesure [6].

l’aspect dynamique d’un environnement « standard » : Ce problème peut être abordé en deux parties. La première consiste à lier étroitement les techniques d’estimation à celles de l’asservissement visuel. Plus précisément, il s’agit d’estimer le mouvement de la cible à suivre en utilisant les images perçues par le robot suiveur. Des travaux ont déjà été initiés sur ce thème dans [Master-EC] et [Master-SD]. Ils s’inscrivent dans le cadre d’une collaboration à l’intérieur même du groupe RAP avec T. Sentenac et P. Danès, respectivement maître-assistant à l’EMAC et maître de conférences à l’UPS. Les résultats obtenus sont prometteurs mais doivent encore gagner en maturité avant de pouvoir être publiés. La seconde partie (non encore abordée) consistera à synthétiser, à partir des résultats obtenus, des stratégies de commande adaptées à un environnement évolutif.

l’interaction homme/robot lorsque le véhicule évolue dans un environnement « humain » :

il est alors nécessaire de proposer des stratégies de commande sûres basées sur des informations visuelles caractérisant un être humain. Pour cela, nous avons couplé un « tracker » développé au LAAS pour le suivi de personnes avec des techniques de commande robustes en asservissement visuel. Ensuite, nous avons amélioré la stratégie de commande en y intégrant des données RFID permettant de localiser la personne d’intérêt (munie d’un tag) lorsqu’elle n’est pas visible. Ces travaux constituent le cœur de la thèse de N. Ouadah et s’inscrivent au sein du projet européen Commrob dédié au développement d’un chariot assistant autonome naviguant dans des lieux publics hautement dynamiques. Ils sont également le fruit d’une collaboration riche avec F. Lerasle, professeur à l’UPS dont la spécialité est la vision sur l’homme. Ces travaux ont été validés expérimentalement et acceptés pour publication dans plusieurs conférences [13][14][23] et revues [4][3]. Enfin, dernièrement, nous avons commencé à traiter le problème des êtres humains statiques susceptibles de gêner le robot dans son déplacement vers la personne d’intérêt. Pour cela, nous avons étendu la stratégie de commande précédente en intégrant les informations renvoyées par un système de détection des jambes (basé sur les données renvoyées par le laser embarqué sur le robot). Les résultats expérimentaux obtenus sont plus que prometteurs, mais restent encore perfectibles.

II.1.2 Asservissement visuel de systèmes complexes

J'ai très récemment élargi ma thématique de recherche à la commande référencée vision de systèmes complexes, tels qu'un manipulateur à deux bras. En effet, dans un tel cas, la difficulté réside dans le grand nombre de degrés de liberté à disposition. L'objectif de cette nouvelle action est de développer des stratégies de commande référencées vision permettant de faire coopérer les deux bras de manière à réaliser des tâches courantes comme ouvrir une bouteille ou refermer un stylo. Ces travaux ont été démarrés à travers le stage de D. Boissinot [Master-DB] en 2008 et approfondis par S. Khalfaoui [Master-SK]. Ils sont menés en collaboration avec D. Sidobre, Maître de conférences à l'université Paul Sabatier, qui s'intéresse à la manipulation. Vu la pertinence des résultats obtenus, ces travaux se sont ouverts sur un sujet de thèse commun.

II.2 Activités d'encadrement

L'encadrement de jeunes chercheurs m'apparaissant comme une composante essentielle de mon métier, je me suis impliquée dès mon recrutement dans le suivi d'étudiants dans le cadre de leur stage de DEA ou Master. J'ai ensuite assuré la responsabilité de plusieurs thèses, seule ou en collaboration avec mes collègues du LAAS. Ces activités, détaillées ci-après, m'ont permis d'obtenir la PES (ex-PEDR) en 2009 et se résument à :

- 3 encadrements de thèse passés ou en cours ;
- 10 encadrements de stages de niveau M2 et/ou ingénieur ;
- 3 encadrements de stages de niveau M1.

II.2.1 Thèses

Encadrements passés : Ayant sollicité et obtenu l'autorisation de diriger les recherches à titre individuel auprès de l'école doctorale Systèmes, j'ai encadré à 100% les travaux de David Folio sur le thème « Stratégies de commande référencées multi-capteur et gestion de la perte du signal visuel pour la navigation d'un robot mobile » du 1/2/2004 au 11/7/2007. Ces travaux ont été concrétisés par dix publications dont un chapitre de livre [1], une revue [5], et six conférences internationales avec actes et comité de lecture [15][16][17][19][20][21]. D. Folio est aujourd'hui maître de conférences à l'ENSI de Bourges.

Encadrements en cours : A l'heure actuelle, je suis impliquée dans l'encadrement de deux thèses qui ont respectivement débuté en 2007 et 2008. Quelques précisions sur ces activités sont données ci-après :

- ▷ **Depuis le 1/9/07 :** j'encadre à 50% la thèse de Nouredine Ouadah, financé par une bourse algérienne, avec Mustapha Hamerlain, Directeur de recherche au Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) et Farès Boudjema, professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger. Cette thèse s'intéresse à la navigation référencée vision dans un environnement « humain » et vise à adapter les techniques de l'asservissement visuel aux tâches où le robot se trouve en interaction étroite avec l'homme. Ces travaux s'inscrivent au sein du projet Commrob et ont été l'occasion d'une collaboration fructueuse avec F. Lerasle, Professeur à l'université P. Sabatier. Ils ont en effet donné lieu à plusieurs publications dans des conférences [13][23][14] et deux revues internationales [4][3]. N. Ouadah soutiendra sa thèse le 27/10/2011.
- ▷ **Depuis le 1/10/08 :** j'encadre à 50% la thèse d'Adrien Durand Petiteville, financé par une bourse du ministère, avec Michel Courdresses, Professeur à l'université Paul Sabatier. Cette thèse

traite de la reconstruction des informations visuelles et de leur profondeur en contexte bruité, ainsi que de la réalisation de longs déplacements par asservissement visuel. Les résultats obtenus ont été publiés dans plusieurs conférences internationales [25][12][11][10][24][9]. La soutenance de thèse est prévue en janvier 2012.

II.2.2 Stages de master et DEA

Depuis 2001, j'ai encadré treize stages de niveau master. Ces activités sont synthétisées ci-après :

- ◇ **[DEA-JR]** : Joël REINGEWERTZ.
Formation : 3^{ème} année ENSICA et DEA Systèmes Informatiques, Toulouse.
Durée : Mars - Août 2001
Sujet : *Implémentation de lois de commande référencées multi-capteurs pour la navigation de robots mobiles autonomes.*
Encadrement : à 50% avec P. Souères, directeur de recherches au CNRS.
- ◇ **[DEA-AN]** : Athmane NEDJAR.
Formation : DEA Systèmes Automatiques, Université Paul Sabatier.
Durée : Février - Juin 2002.
Sujet : *Navigation réactive mixte : Asservissement visuel et champ de potentiel rotatif.*
Encadrement : à 100%.
- ◇ **[DEA-DF]** : David FOLIO.
Formation : DEA Systèmes Informatiques, Université Paul Sabatier.
Durée : Février - Septembre 2003.
Sujet : *Navigation par enchaînement de tâches référencées multi-capteurs.*
Encadrement : à 100%.
- ◇ **[DEA-FR]** : Fabrice ROUZAUD.
Formation : DEA Systèmes Automatiques, Université Paul Sabatier.
Durée : Février - Juin 2004.
Sujet : *Enchaînement dynamique de tâches robotiques.*
Encadrement : à 100%.
- ◇ **[Master-DFI]** : David FLAVIGNE, Master Systèmes Intelligents (SI), Université Paul Sabatier.
Durée : Mars - Août 2006.
Sujet : *Algorithme de traitement d'images pour l'extraction de primitives complexes.*
Encadrement : à 50% avec David Folio.
- ◇ **[Master-Tovo]** : Tovo RAMAHERIRARINY, Master SI, Université Paul Sabatier.
Durée : Mars - Juillet 2007.
Sujet : *Extension d'un algorithme de traitement d'images pour la réalisation de tâches de navigation référencées vision complexes.*
Encadrement : à 50% avec David Folio.
- ◇ **[Master-MYO]** : Mehdi YAHIA-OUAHMED, Ingénieur ENSEEIHT en génie électrique et automatique, et M2R Systèmes Automatiques, Informatiques et Décisionnels (SAID).
Durée : Février - Septembre 2007.
Sujet : *Gestion de la continuité des commandes lors de la réalisation de tâches de navigation référencées capteurs.*
Encadrement : à 100%.

- ◇ **[Master-DB]** : Dimitri BOISSINOT, Ingénieur ENSPS (Strasbourg).
Durée : Février - Septembre 2008.
Sujet : *Asservissement visuel coordonné d'un manipulateur à deux bras.*
Encadrement : à 50% avec Daniel Sidobre, Maître de conférences à l'UPS.
- ◇ **[Master-LH]** : Lyamine HEDJAZI, M2 Recherche SAID, Université Paul Sabatier.
Durée : Février - Juillet 2008.
Sujet : *Estimation des indices visuels en contexte bruité.*
Encadrement : à 50% avec Michel Courdresses, Professeur à l'UPS.
- ◇ **[Master-SK]** : Souhaïel KHALFAOUI, M2 Recherche spécialité Signaux, Systèmes, Images et Robotique, parcours Robotique et Systèmes Intelligents, Université Pierre et Marie Curie.
Durée : Février - Juillet 2009.
Sujet : *Asservissement visuel coordonné pour un manipulateur mobile à deux bras.*
Encadrement : à 50% avec Daniel Sidobre, Maître de conférences à l'UPS.
- ◇ **[Master-EC]** : Estelle COMMENT, Ecole Polytechnique, Département de Mathématiques Appliquées, Promotion X 2006.
Durée : Avril - Août 2009.
Sujet : *Estimation de mouvement pour l'asservissement visuel en contexte dynamique.*
Encadrement : encadré à 33% avec Patrick Danès, Maître de conférences à l'université P. Sabatier et Thierry Sentenac, Maître assistant à l'école des mines d'Albi-Carmaux.
- ◇ **[Master-JG]** : Jérémy GROSSMANN, Master 1 Systèmes Intelligents.
Durée : Avril - Juillet 2010.
Sujet : *Commande par asservissement visuel d'un manipulateur cartésien.*
Encadrement : encadré à 50% avec Patrick Danès, Maître de conférences à l'UPS.
- ◇ **[Master-SD]** : Sylvain DESSUS, Ingénieur ENSEEIHT en génie électrique et automatique, en double cursus avec Georgia Tech.
Durée : Juin - Novembre 2010.
Sujet : *Estimation de mouvement pour l'asservissement visuel en contexte dynamique.*
Encadrement : encadré à 50% avec Thierry Sentenac, Maître assistant à l'école des mines d'Albi-Carmaux.

II.2.3 Activités d'encadrement issues de l'enseignement

Outre les responsabilités d'encadrement inhérentes à tout cadre scientifique mentionnées ci-dessus, je suis amenée en tant que maître de conférences à suivre les étudiants de l'IUP SI ou du M2Pro IRR pendant leur stage en entreprise. Je suis ainsi tutrice d'environ 3 ou 4 étudiants par an. Il s'agit alors d'aller visiter le stagiaire (si cela est possible) et de prendre contact avec son responsable afin de s'assurer du bon déroulement du stage. L'un de ces suivis s'est notamment concrétisé par une publication [18].

De plus, dans le cadre de mes activités à l'IUP SI, j'assure également l'encadrement de travaux d'études et de recherche où il s'agit pour des étudiants du M1 d'effectuer un petit travail (bibliographique ou appliqué) sur des thèmes liés à la robotique. Ces encadrements ont été l'occasion de compléter les travaux de thèse de D. Folio, N. Ouadah et A. Durand Petiteville. Ils ont aussi permis de débroussailler un travail de stage, de donner quelques éléments de réflexion sur des thèmes de recherche spécifiques, ou de favoriser des collaborations avec un industriel. Ils ont ainsi contribué au développement de mes activités de recherche.

II.3 Animation scientifique

Depuis mon recrutement, je me suis impliquée dans différents projets de recherche. J'ai aussi cherché à nouer des collaborations fructueuses, à la fois à l'intérieur du laboratoire mais également à l'extérieur. Un bref compte-rendu de ces activités figure ci-dessous.

II.3.1 Participation à des projets de recherche

Cette partie effectue un résumé de mes implications au sein de projets anciens ou en cours d'élaboration.

- Projets en cours
 - ◇ *Projet ICARO : Industrial Cooperative Assistant Robots* : Ce projet, d'une durée de trois ans et demi, est financé par l'ANR pour un budget total d'environ un million d'euros. Porté par EADS, il démarre en juin 2011. Le consortium est composé de sept partenaires : le LAAS, le LIRMM, Kineo, PSA, EADS, Fatronik et le CNAM (laboratoire d'ergonomie). L'objectif de ce projet est de développer des outils permettant d'améliorer et de simplifier l'interaction des robots industriels avec l'homme et son environnement. Il s'agira ici pour moi de proposer des solutions permettant de coordonner le mouvement des robots à deux bras par asservissement visuel.
- Projets passés
 - ◇ 2007 – 2010 : *COMMROB : Advanced Behaviour and High-Level Multimodal Communication with and among Robots*, projet européen STREP FP6-045441, coordonné par Gregor Nowak de l'université de Vienne. Ce projet associe sept partenaires : l'université de Vienne (Vienna University of Technology (TUW)), le LAAS, KTH (Kungliga Tekniska Högskolan) de Stockholm, FZI (Forschungszentrum Informatik) de Karlsruhe (Allemagne), Zenon industry (Athènes, Grèce), et enfin ETP (Electronics Trading & Production e. K. industry) de Karlsruhe. L'objectif de ce projet est de développer des chariots assistants autonomes naviguant dans des lieux publics hautement dynamiques tels qu'un supermarché ou un aéroport par exemple. Le projet se focalise sur la communication entre les agents (humains, chariots) partageant l'espace afin de faciliter la navigation et l'aide à l'utilisateur (guidage, suivi, ...). Pour ma part, j'ai contribué essentiellement au niveau du workpackage 3 dédié à la navigation et intitulé « Advanced robot behaviour and navigation ». Il s'agissait de réaliser une mission de guidage de l'utilisateur par commande référencée multicapteurs en dépit des obstacles et des occultations. Les travaux de Noureddine Ouadah s'inscrivent pleinement au sein de ce projet. Ma participation à ce projet s'est concrétisée par les publications suivantes : [4][3][13][23][14].
 - ◇ 2003 – 2006 : *EGOCENTRE : Enchaînement de tâches référencées multi-capteurs pour l'exécution de mouvements complexes en robotique mobile*, projet ROBEA coordonné par P. Souères (Directeur de recherches au CNRS) du LAAS. Ce projet a réuni quatre partenaires académiques : le LAAS, le CERCOS, le LGP-ENIT et l'INRIA Rennes Bretagne Atlantique (IRISA). L'objectif de ce projet est de proposer des solutions au problème de l'enchaînement de tâches robotiques en étudiant les mécanismes neuronaux mis en œuvre chez le vivant. J'ai contribué essentiellement au niveau de la description d'un formalisme d'enchaînement dynamique des tâches basé sur l'idée de conférer à l'espace des configurations une structure de variété différentielle. Ces travaux ont débouché sur une publication [22].
 - ◇ 2001 – 2005 : *De la perception à la commande : une histoire de repères*, ACI du programme interdisciplinaire « Cognition et traitement de l'information » sous la coordination de Y. Trotter du CERCOS.

L'objectif est ici de comprendre le lien entre perception et action en s'inspirant des fonctions sensorimotrices chez le vivant et de la commande référencée capteurs en robotique. J'ai contribué ici à la réflexion sur le choix d'un repère permettant d'exprimer au mieux la tâche à réaliser et favorisant l'enchaînement de tâches.

– Projets soumis

- ◊ *Projet BM2V (« BioMicroManipulation par asservissement Visuel »)* : Ce projet dont je suis la coordinatrice s'intéresse à l'élaboration de stratégies de commande référencées multicapteurs pour la micromanipulation de cellules vivantes (ou biomicromanipulation). Il a été soumis à l'appel à projet Recherches Partenariales et Innovation Biomédicale (RPIB) de l'ANR en 2011. D'une durée de trois ans, il associe cinq partenaires : trois laboratoires de recherche (le LAAS-CNRS, le laboratoire PRISME de Bourges, l'INRIA Rennes Bretagne Atlantique), une fondation privée (l'institut Curie de Paris) et un industriel, Leica Microsystems (situé à Nanterre). Le budget global demandé est d'environ 930000 euros.

L'objectif de ce projet est d'offrir au monde de la santé une plateforme robotisée, totalement instrumentée, permettant de réaliser des tâches de biomanipulation de manière automatisée. Il s'agira de produire un premier prototype prêt à l'emploi, présentant des performances supérieures à l'existant, et susceptible de correspondre aux exigences industrielles potentielles (coût, fiabilité, etc.). Les applications visées seront dans un premier temps ciblées sur l'isolement de cellules particulières, les mélanocytes, dans le but de comprendre comment et pourquoi ils se transforment en mélanomes.

Ce projet est l'opportunité pour moi d'élargir ma thématique de recherche vers des domaines actuellement en pleine expansion et qui apparaissent comme un champ d'application très riche pour l'asservissement visuel. De plus, c'est aussi une occasion de contribuer aux progrès de la recherche médicale, ce qui donne un sens et un poids plus important à mes propres travaux.

II.3.2 Rayonnement scientifique

Cette partie décrit mes activités en termes de collaboration et de responsabilités collectives spécifiques.

II.3.2.1 Les collaborations

Durant ces dernières années, j'ai noué différentes collaborations à la fois à l'intérieur du laboratoire (chercheurs appartenant au groupe RAP ou à d'autres équipes de recherche) et à l'extérieur (France et étranger). Ces collaborations, leurs contextes et objectifs, sont décrites ci-après.

Collaborations au sein du laboratoire : Compte tenu de mes thématiques de recherche (cf. section II), j'ai été amenée à collaborer avec la plupart des chercheurs du groupe RAP, bénéficiant ainsi de leurs compétences dans le domaine de la vision ou de l'estimation et leur apportant mes propres connaissances dans l'élaboration de stratégies de commande référencées multi-capteurs. Ces collaborations, toujours riches et fructueuses d'un point de vue humain et scientifique, se sont concrétisées sous différentes formes, principalement par le biais de co-encadrements ou de projets. Elles ont pour la plupart donné lieu à des publications communes comme l'atteste la liste présentée dans la partie II.4.

L'une des collaborations les plus anciennes est celle entretenue avec M. Courdresses, professeur à l'université P. Sabatier, dont le domaine de recherche est centré autour de la commande et de l'estimation. En effet, déjà effective pendant mon doctorat, elle n'a cessé de se développer après mon

recrutement prenant d'abord la forme de discussions scientifiques avant de se formaliser par le biais de co-encadrements. Nous avons ainsi suivi ensemble les travaux menés dans le stage de L. Hedjazi consacré à l'estimation des indices visuels en contexte bruité. Nous co-encadrons également la thèse d'Adrien Durand Petiteville dont la première partie se situe directement dans le prologement de ces travaux. Depuis qu'elle a été initiée, cette collaboration a donné lieu à 10 publications communes.

Sur les aspects liés à l'estimation et au filtrage, j'ai également collaboré avec P. Danès et T. Sentenac, respectivement maître de conférences à l'UPS et maître assistant à l'EMAC. Ce travail commun concerne la réalisation de tâches de navigation référencées vision dans un environnement dynamique au sens où la cible d'intérêt et les obstacles sont mobiles. Pour mener à bien cet objectif, il est nécessaire de s'intéresser à l'estimation de mouvement, d'où l'émergence de cette collaboration. Celle-ci s'est concrétisée par le suivi des stages d'E. Comment et de S. Dessus. Elle devrait également se traduire par un co-encadrement de thèse et des publications dans un futur proche.

Enfin, j'ai collaboré avec F. Lerasle, professeur à l'UPS dont la spécialité est la vision sur l'homme. Il s'agissait ici de réaliser des tâches de navigation référencées vision non plus vis à vis d'un amer mais relativement à l'homme. Cette collaboration a été initiée dans le cadre du projet Commrob évoqué plus haut. Elle s'est traduite par l'implication de N. Ouadah dans ce projet et s'est concrétisée par plusieurs publications dans des conférences et revues internationales. Cette collaboration a permis de développer un asservissement visuel sur l'homme ; elle se poursuit maintenant par l'intégration d'une fonctionnalité d'évitement de personnes basées sur les informations fournies par le laser embarqué. Ce dernier travail a été mené conjointement par A. Mekkonen, doctorant encadré par F. Lerasle, chargé de la perception et A. Durand Petiteville, doctorant sous ma responsabilité en charge de la commande.

Les collaborations précédentes sont liées à mes activités autour de la navigation référencée vision dans des environnements peu connus. Récemment, j'ai souhaité élargir mes thématiques de recherche à l'asservissement visuel de systèmes complexes, en particulier un système robotique constitué de deux bras manipulateurs. La réalisation de tâches de manipulation typiquement humaines apparaît comme un challenge qui peut être relevé à l'aide de stratégies de commande évoluées basées sur la vision (et éventuellement sur d'autres informations sensorielles pertinentes telles que les forces exercées par exemple). C'est dans cette optique que j'ai sollicité D. Sidobre, maître de conférences à l'UPS, pour débiter un travail commun sur ce thème. Cette collaboration s'est traduite par deux co-encadrements de stage de master (D. Boissinot en 2008 et S. Khalfaoui en 2009) et un sujet de thèse commun.

A l'extérieur du laboratoire :

Laboratoire Pluridisciplinaire de Recherche en Ingénierie des Systèmes, Mécanique, Energétique (PRISME), Bourges : Toujours au sein de cette nouvelle thématique de recherche consacrée à la commande référencée multi-capteurs de systèmes complexes, j'ai sollicité un de mes anciens doctorants, D. Folio, aujourd'hui maître de conférences à l'ENSI de Bourges et rattaché à l'institut PRISME, pour initier une collaboration dans le domaine de la micro-robotique. En effet, ce domaine est actuellement en pleine expansion et apparaît comme un nouveau champ d'application privilégié pour les techniques d'asservissement visuel. Nous avons concrétisé cette collaboration par la mise en place du projet ANR BM2V mentionné plus haut autour de la commande référencée multi-capteurs pour la biomicromanipulation cellulaire. Des encadrements de stagiaires communs étaient également prévus dès 2011, malheureusement ils n'ont pu être concrétisés faute de candidat adéquat.

Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA), Alger : Cette collaboration a été initiée en 2007 par l'accueil de Nouredine Ouadah au LAAS dans le cadre de sa thèse de doctorat. S'étant avérée fructueuse, un projet international de coopération scientifique d'une durée de trois ans a été élaboré pour l'étoffer et favoriser son développement. Ce projet est consacré à la navigation par asservissement visuel d'un robot mobile dans un environnement humain encombré. Dans un premier temps, il s'agira d'améliorer les asservissements visuels robustes déjà proposés et de les valider expérimentalement. Ensuite, nous souhaitons les coupler aux techniques d'évitement d'obstacles développées respectivement au CDTA et au LAAS afin de gérer les problèmes de collision. Des validations expérimentales sur les robots à disposition dans ces deux laboratoires sont également prévues. Il sera ainsi possible de tester les stratégies de commande mises en place dans des contextes très différents (milieu intérieur structuré pour le LAAS, site industriel pour le CDTA). Enfin, suite aux premiers résultats obtenus dans le doctorat d'Adrien Durand Petiteville, nous prévoyons aussi de collaborer sur les aspects navigation au long cours par asservissement visuel. Cette collaboration pourrait prendre la forme d'une aide à la validation expérimentale des travaux sus-mentionnés. Ce projet, soumis en 2009 au CNRS, a été accepté en 2010 sous le numéro 24543 et reconduit en 2011. Le financement obtenu permet de prendre en charge des séjours de jeunes chercheurs algériens au LAAS et inversement.

Beckman Institute, Urbana Champaign University, Illinois, USA : Cette collaboration est née pendant le séjour temporaire d'Adrien Durand Petiteville au Beckman Institute entre septembre et décembre 2010. Ce séjour a été l'occasion d'élaborer, avec Seth Hutchinson, professeur à l'université de l'Illinois, une méthode permettant de réaliser une tâche de navigation au long cours par asservissement visuel. Ces travaux ont été acceptés pour publication à la conférence ECC – CDC 2011 [9].

II.3.2.2 Fonctions d'intérêt général

Participation au conseil de pôle RIA Le LAAS comporte quatre pôles qui regroupent de manière cohérente les thématiques scientifiques abordées au sein du laboratoire. Le pôle RIA (Robotique et Intelligence Artificielle) est ainsi composé de trois groupes de recherche : RIS (Robotique et InteractionS), RAP (Robotique, Action, Perception) et GEPETTO : le mouvement humanoïde. Depuis 2007 et pour une durée de 4 ans, je suis membre nommé du conseil scientifique de ce pôle dont le rôle est de favoriser la concertation et la coordination entre les différents groupes concernés.

Organisation du workshop du pôle RIA : En 2010, j'ai organisé le workshop du pôle Robotique et Intelligence Artificielle (RIA) en collaboration avec N. Ouwanssi, secrétaire du pôle et N. Mansard, chargé de recherche au CNRS. Il s'agit d'un séminaire annuel regroupant tous les membres permanents et non permanents du pôle (environ 80 personnes). Ce séminaire se déroule généralement sur deux journées et est l'occasion pour tous les chercheurs d'échanges scientifiques et humains dans un cadre convivial à l'extérieur de Toulouse.

Membre du comité de programme du workshop ECMS : Depuis 1999, je suis impliquée dans le workshop ECMS (Electronic, Control, Measurement, and Signals). Ce workshop est né d'une coopération entre l'université Paul Sabatier et l'université de Liberec (République Tchèque) qui s'est récemment élargie à l'université de Mondragón (Espagne). Il se tient tous les deux ans alternativement à Toulouse ou Liberec, excepté en 2009 où il a eu lieu pour la première fois à Mondragón. Il est plus particulièrement dédié aux jeunes chercheurs afin de leur permettre de faire connaître leurs travaux.

Il est prévu à terme de le lier plus étroitement aux écoles doctorales. Ce workshop a également donné naissance en 2010 à un master international autour des systèmes intelligents dans lequel j'assure des cours de robotique. Il a été labellisé IEEE en 2011. J'ai participé au comité d'organisation de ce workshop en 2001 et 2005, lorsqu'il s'est tenu à Toulouse. Je suis également membre du comité scientifique de programme de ce workshop depuis 1999.

Activités de relecture

Revues : IEEE Transactions on Robotics, IEEE Transactions on Automatic Control, International Journal of Robotics Research/International Journal of Computer Vision, Journal of Intelligent and Robotic Systems, IEEE Transactions on Mechatronics, Control Engineering Practice.

Conférences : IEEE International Conference on Robots and Systems (IROS), IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), European Conference on Mobile Robots (ECMR), IEEE Conference on Decision and Control (CDC), IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), IEEE workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals (ECMS).

II.3.2.3 Divers

Participation au GDR robotique

- Présentation de mes travaux de recherche autour de la navigation par commande référencée multi-capteurs lors d'une journée thématique du GT 4.
- Participation à une journée robotique et enseignement en tant qu'auditeur et orateur.

Distinction particulière : L'article [19] a été retenu parmi les cinq meilleurs papiers présentés lors de la conférence ROBIO en 2006. A ce titre, il a été finaliste du « TJ Tarn Best Paper in robotics » décerné lors de cette conférence.

II.4 Liste des publications

II.4.1 Publications réalisées depuis mon doctorat

Contribution à ouvrage

1. *Treating image loss using the vision/motion link : a generic framework*, D. Folio, V. Cadenat, Computer Vision, Edited by : Xiong Zhihui ; IN-TECH ; 538p., N°ISBN 978-953-7619-21-3, Novembre 2008, Chapitre 4.

Revues internationales avec comité de lecture

2. *A comparison of two sequencing techniques to perform a vision-based navigation task in a cluttered environment*, V. Cadenat, D. Folio, A. Durand Petiteville. Accepté dans Advanced Robotics.
3. *A Multi-Sensor-Based Control Strategy for Initiating and Maintaining Interaction Between a Robot and a Human*, N. Ouadah, V. Cadenat, F. Lerasle, M. Hamerlain, T. Germa, F. Boudjema. A paraître dans Advanced Robotics, Vol. 25, N° 09 – 10, Juin 2011.

4. *Vision and RFID Data Fusion for Tracking People in Crowds by a Mobile Robot*, T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah, V. Cadenat, Computer Vision and Image Understanding, Elsevier Science Inc., Vol. 114, N°6, pp 641–651, Juin 2010.
5. *Dealing with visual features loss during a vision-based task for a mobile robot*, D. Folio, V. Cadenat, International Journal of Optomechatronics, special issue on visual servoing, Vol.2, N°3, pp.185-204, Juillet 2008.
6. *A general approach for sensibility analysis in visual servoing*, M. Courdesses, V. Cadenat, Vol.21, N°7, pp.820-842, Avril 2007.
7. *A reactive path-following controller to guarantee obstacle avoidance during the transient phase*, V. Cadenat, P. Souères, T. Hamel, International Journal of Robotics and Automation, Vol.21, N°4, pp.256-265, 2006.
8. *Using system redundancy to perform a sensor-based navigation task amidst obstacles*, V. Cadenat, P. Souères and M. Courdesses, International Journal of Robotics & Automation, Vol.16, N°2, pp.61-73, 2001.

Conférences internationales avec actes et comités de lecture

9. *2D visual servoing for a long range navigation in a cluttered environment*, Adrien Durand Petiteville, Seth Hutchinson, Viviane Cadenat and Michel Courdesses, 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, December 12-15, 2011, Orlando, FL, USA.
10. *On-line estimation of the reference visual features. Application to a vision based long range navigation task*, A. Durand Petiteville, M. Courdesses, V. Cadenat, P. Baillion, Int. Conf. on Robots and Systems (IROS'10), Taipei, Taiwan, Octobre 2010.
11. *A new predictor/corrector pair to estimate the visual features depth during a vision-based navigation task in an unknown environment*, A. Durand Petiteville, M. Courdesses, V. Cadenat, Int. Conf. on Autonomous Vehicles (IAV 2010), Lecce, Italie, Septembre 2010.
12. *A Unified Initialization Phase to Improve Visual Servoing in an Unknown Environment*, A. Durand Petiteville, V. Cadenat, M. Courdesses, Int. Conf. on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2010), Madère, Portugal, Juin 2010.
13. *Vision and RFID-based Person Tracking in Crowds from a Mobile Robot*, T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah, V. Cadenat, M. Devy, Int. Conf. on Robots and Systems (IROS'09), Saint Louis, USA, Octobre 2009.
14. *Image based robust visual servoing on human face to improve human/robot interaction*, N. Ouadah, V. Cadenat, F. Boudjema, M. Hamerlain, European Conference on Mobile Robots (ECMR 2009), Dubrovnik/Mlini, Croatie, Septembre 2009.
15. *A sensor-based controller able to treat total image loss and to guarantee non-collision during a vision-based navigation task*, D. Folio, V. Cadenat, Int. Conf. on Robots and Systems (IROS'08), Nice, Septembre 2008.
16. *A new controller to perform safe vision-based navigation tasks amidst possibly occluding obstacles*, D. Folio and V. Cadenat, European Control Conference (ECC 2007), Juillet 2007, Kos, Grèce.
17. *Using simple numerical schemes to compute visual features whenever unavailable*, D. Folio and V. Cadenat, International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO 2007), Mai 2007, Angers, France.

18. *Incremental on-line topological map learning for a visual homing application*, E. Motard, B. Raducanu, V. Cadenat, J. Vitria, Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA 2007), Mai 2007, Rome, Italie.
19. *A redundancy-based scheme to perform safe vision-based tasks amidst obstacles*, D. Folio and V. Cadenat, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO'2006), Kunming, Chine, 17-20 Décembre 2006.
Papier finaliste pour le prix "T.J. Tarn Best Paper in Robotics".
20. *A controller to avoid both occlusions and obstacles during a vision-based navigation task in a cluttered environment*, D. Folio and V. Cadenat, 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference (CDC-ECC'05), Décembre 2005, Séville, Espagne.
21. *Using redundancy to avoid simultaneously occlusions and collisions while performing a vision-based task amidst obstacles*, D. Folio and V. Cadenat, European Conference on Mobile Robots (ECMR'05), Ancône, Italie, Septembre 2005.
22. *Dynamical sequence of multi-sensor based tasks for mobile robots navigation*, P. Souères, V. Cadenat, and M. Djeddou, 7th Symposium on Robot Control (SYROCO'03), Wroclaw, Pologne, Septembre 2003.

Conférences nationales avec actes et comités de lecture

23. *Fusion de données visuelles et RFID pour le suivi de personnes en environnement encombré depuis un robot mobile*, T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah, V. Cadenat, C. Lemaire, Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle (RFIA 2010), Caen, France, 18-22 Janvier 2010.

Workshops et conférences internationales avec actes à diffusion limitée

24. *A comparison of several approaches to perform a vision-based long range navigation*, Adrien Durand Petiteville, Viviane Cadenat, Michel Courdesses, François Delpech de Frayssinet and Aly Magassouba, IEEE Conference on Electronics, Control, Measurement and Signals, 1-3 Juin 2011, Liberec, Czech Republic.
25. *Reconstruction of the features depth to improve the execution of a vision-based task*, A. Durand Petiteville, M. Courdesses, V. Cadenat, 9th International Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals, Mondragon, Espagne, Juillet 2009.
26. *Dealing with visual features occlusions and collisions during a vision-based navigation task in cluttered environments*, D. Folio and V. Cadenat, 8th International Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals, Liberec, République Tchèque, Mai 2007.
27. *A method to safely perform a visually guided navigation task amidst occluding obstacles*, D. Folio and V. Cadenat, 7th International Workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals (ECMS'2005), Toulouse, France, Mai 2005.
28. *A controller for avoiding actuator saturation during a vision-based task*, V. Cadenat and M. Courdesses, 6th International Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals (ECMS'2003), Liberec, République Tchèque, Juin 2003.

II.4.2 Publications réalisées pendant mon doctorat

Revue internationale avec comité de lecture

29. *Controlling the execution of a visual servoing task*, R. Swain, M. Devy, V. Cadenat, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 25, Numéro 4, pp.357-369, Août 1999 & 6th Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS'98), pp.127-136, Edinburgh, Great Britain, 21-23 Juillet 1998.

Conférences internationales avec actes et comités de lecture

30. *Two multi-sensor-based control strategies for driving a robot amidst obstacles*, V. Cadenat, P. Souères, M. Courdesses, 39th IEEE Conference on Decision and Control (CDC'2000), pp. 827-832, Sydney, Australie, 12-15 Décembre 2000.
31. *Using redundancy to perform a vision-based task amidst obstacles*, V. Cadenat, P. Souères, M. Courdesses, 6th International IFAC Symposium on Robot Control (SYROCO'2000), pp.205-210, Vienne (Autriche), 21-23 Septembre 2000.
32. *Mixed camera-laser based control for mobile robot navigation*, D. Dedieu, V. Cadenat, P. Souères, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'2000), Vol.2, pp.1081-1086, Takamatsu (Japon), 31 Octobre - 5 Novembre 2000.
33. *An hybrid control for avoiding obstacles during a vision-based tracking task*, V. Cadenat, P. Souères, M. Courdesses, European Control Conference (ECC'99), Karlsruhe (Allemagne), 31 Août - 3 Septembre 1999 & 4th International Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals (ECMS'99), Liberec (République Tchèque), 31 Mai - 1er Juin 1999.
34. *A controller to perform a visually guided tracking task in a cluttered environment*, V. Cadenat, R. Swain, P. Souères, M. Devy, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS'99), pp. 775-780, Kyongju (Corée), 17-21 Octobre 1999.
35. *A path following controller for wheeled robots which allows to avoid obstacles during transition phase*, P. Souères, T. Hamel, V. Cadenat, IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA'98), pp.1269-1274, Louvain (Belgique), 16-21 Mai 1998.

Workshops et conférences internationales avec actes à diffusion limitée

36. *Visual navigation and obstacle avoidance for a service robot*, R. Swain, M. Devy, V. Cadenat, International Symposium on Robotics and Automation (ISRA'98), Saltillo (Mexique), 12-14 Décembre 1998.
37. *A reactive path following controller for mobile robots*, P. Souères, T. Hamel, V. Cadenat, A. Dzul, Advances in Vehicles Control and Safety conference (AVCS'98), Amiens, France, Juillet 1998.

Activités d'enseignement

Sommaire

III.1 Généralités	21
III.1.1 Activités menées avant mon recrutement	21
III.1.2 Activités menées après mon recrutement	22
III.2 Contenu des enseignements dispensés	23
III.2.1 A l'UPS	24
III.2.2 Hors de l'UPS	28
III.2.3 Bilan : Contributions pédagogiques spécifiques	28
III.3 Activités administratives au sein de l'université	28
III.3.1 Responsabilités pédagogiques	29
III.3.2 Fonctions d'intérêt général	30

Ce chapitre résume mes activités d'enseignement depuis le début de ma thèse. Quelques éléments d'ordre factuel sont d'abord proposés afin de présenter le contexte et de montrer comment mon service a évolué au fil des années et de mes implications dans la vie de l'université. Le contenu des enseignements dispensés est ensuite présenté avant de décrire les responsabilités administratives que j'ai été amenée à assumer.

III.1 Généralités

Depuis le début de ma thèse en 1996, j'interviens dans la section 61, section regroupant les domaines de l'automatique, l'informatique industrielle et le traitement du signal. J'ai dispensé ces enseignements en tant que vacataire (3 ans), ATER (1 an), puis maître de conférences (11 ans). Ces activités sont décrites et analysées ci-dessous.

III.1.1 Activités menées avant mon recrutement

Je suis d'abord intervenue en tant que vacataire à l'UPS et à l'ENSEEIH de 1996 à 1999, avant d'être recrutée en qualité d'ATER à l'UPS (demi-poste) pour l'année universitaire 1999 – 2000. Dans le cadre de ces activités, j'ai dispensé des enseignements dans les domaines de l'automatique et de la robotique à des publics de niveau bac + 3 à bac + 5. Comme le montre le tableau III.1 ci-dessous, je suis intervenue dans des filières universitaires ou des cursus ingénieur relevant (partiellement ou totalement) du domaine de l'EEA (licence et maîtrise EEA, IUP SI, DESS IRR, etc.) pour un volume horaire total de 284 heures équivalent TD. Ces activités ont constitué ma première expérience de l'enseignement universitaire et m'ont fait prendre conscience de mon intérêt pour la transmission des connaissances. Elles m'ont également permis de me familiariser avec les différentes formes d'enseignements, puisque j'ai encadré des séances de travaux dirigés (TD), de travaux pratiques (TP), et des projets de longue durée (ou bureaux d'études (BE)). J'ai de plus apporté mon aide à l'équipe pédagogique en participant

à la rédaction de certains énoncés de TP et à l'évaluation des étudiants (élaboration de sujets d'examen, surveillances des épreuves de TP et corrections des copies). Cette première expérience n'a fait que confirmer mon intérêt pour l'enseignement, me conduisant logiquement à présenter ma candidature à un poste d'enseignant chercheur.

Le tableau ci-dessous résume l'ensemble de ces activités. Le volume horaire indiqué pour chaque discipline est donné en équivalent TD et correspond au nombre total d'heures encadrées¹.

Cadre	Discipline	Public	Type	Volume
ATER 1999 – 2000	. Robotique	. DESS IRR (18 étudiants)	Bureaux d'études	41
	. Automatique	. IUP SI 3 ^{ème} année (20 étudiants)	Travaux pratiques	20
		. Maîtrise EEA (50 étudiants)	Travaux pratiques	20
		(actuel M1 AITR)	Travaux dirigés	15
Vacations 1996 – 1999	. Robotique	. DESS IRR	Bureaux d'études	50
		. ENSEEIHT (3 ^{ème} année et DEA automatique)	Travaux dirigés	24
			Bureaux d'études	16
	. Automatique	. Licence ingénierie électrique	Travaux pratiques	8
		. Maîtrise EEA	Travaux pratiques	70
		. IUP SI 3 ^{ème} année (actuel M1 SI)	Travaux pratiques	20

TABLE III.1 – Service d'enseignement effectué en tant que vacataire et ATER.

III.1.2 Activités menées après mon recrutement

J'ai été recrutée en qualité de maître de conférences à l'université P. Sabatier en 2000. Ce recrutement répondait au départ en mutation de Jean-Yves Fourquet, alors maître de conférences à l'UPS, dont le service d'enseignement était centré autour de la robotique et de l'automatique. Ayant repris une grande partie des heures qu'il effectuait, je suis intervenue dans ces mêmes disciplines pour des étudiants majoritairement issus des mêmes filières de niveau licence ou master. Mon service, d'un volume horaire moyen de 205 heures équivalent TD par an depuis mon recrutement, s'inscrit donc dans la continuité des activités menées en tant que vacataire et ATER. Cette continuité est illustrée très clairement sur les diagrammes III.1(a) et III.1(b) qui montrent la répartition de mes enseignements par matière et par niveau d'études. Ainsi, il est évident que le cœur de mes activités se situe autour de l'automatique et la robotique, la portion étiquetée « autres » correspondant à des heures attribuées au titre de responsabilités administratives, de suivis de stage ou d'encadrements de TER. Le diagramme III.1(b) met de plus en exergue que mes interventions s'adressent principalement à des étudiants de niveau master (74% de mon service), voire de L3 (17%). Ce constat est relativement logique puisque les deux premières années de licence visent surtout à donner un socle scientifique général solide sur lequel peuvent s'appuyer les cours spécialisés tels que l'automatique ou la robotique. Ainsi, de par la nature des enseignements effectués, il apparaît difficile d'intervenir en L1 et L2 avec un volume horaire important.

Il est également intéressant de noter la cohérence entre les disciplines que j'enseigne à l'université et ma thématique de recherche. Cependant, de mon point de vue, si cette dernière est pleinement respectée, le recouvrement reste encore partiel (... et perfectible!). En effet, si l'on analyse précisément

1. Les trois années universitaires sont comptabilisées pour les vacances.

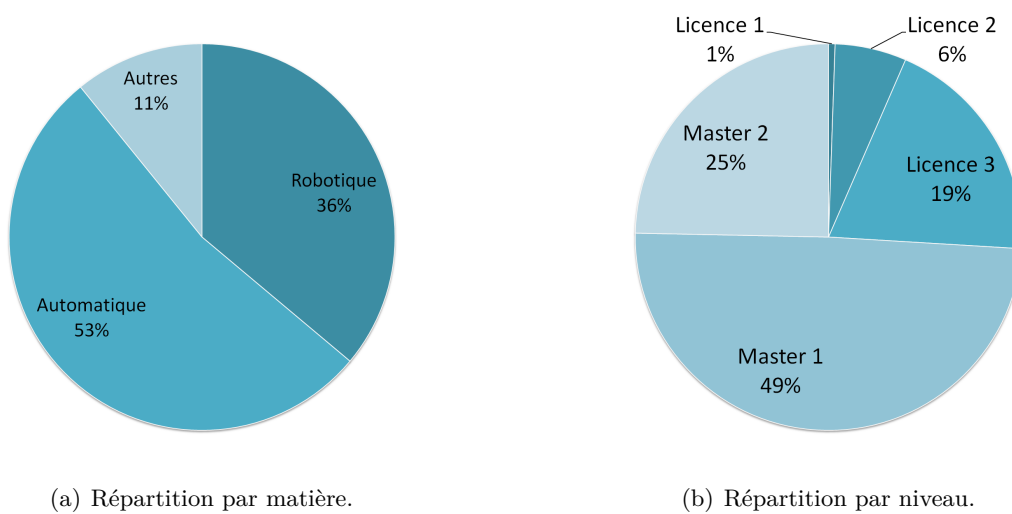


FIGURE III.1 – Répartition du service par matière et par niveau.

le contenu de mes interventions, seul le cours dédié à la commande référencée vision (environ 30h par an) s'inscrit totalement dans le cadre de mes activités de recherche. Différentes raisons peuvent être avancées. Tout d'abord, il s'agit de techniques très spécifiques qui ne peuvent être enseignées qu'à des étudiants ayant déjà des acquis solides en robotique et automatique. Ensuite, ayant atteint leur maturité dans les années 2000, leur enseignement dans les universités ou les écoles d'ingénieur est relativement récent. Quoi qu'il en soit, ce cours est l'occasion pour moi d'apprécier la dualité entre l'enseignement et la recherche, dualité qui est l'une des caractéristiques propres du métier d'enseignant-chercheur. Ainsi, le cours de commande référencée vision s'enrichit chaque année des résultats acquis dans le cadre de mes activités de recherche et des études bibliographiques effectuées. Réciproquement, la préparation, la réactualisation et la transmission de ce cours à un public « novice » nécessite de soigner l'aspect didactique et pédagogique, ce qui permet de mieux appréhender ces connaissances et d'acquérir de nouveaux points de vue sur ses propres travaux.

Un autre aspect important concernant mes activités d'enseignement réside dans l'évolution de mes interventions au fil des ans que l'on peut visualiser sur le diagramme III.2. Celui-ci montre que, dans les années qui ont immédiatement suivi mon recrutement, mon service était réparti équitablement entre l'IUP SI et les filières « classiques » de l'UPS (licence et maîtrise EEA, DESS IRR, ...). Cependant, j'ai progressivement abandonné ces filières au profit de l'IUP où j'effectue maintenant près des trois quarts de mon service. En effet, ayant pris la co-responsabilité du M1 SI (cf. section III.3), j'ai été amenée à m'impliquer de plus en plus fortement au sein de cette formation, à la fois en termes administratifs mais également en termes pédagogiques. J'ai ainsi par exemple pris en charge les enseignements d'automatique effectués en L2 et M1, ainsi qu'une partie des cours et BE de robotique du L3 et du M1. Naturellement, cet investissement ne pouvait se faire qu'en réduisant mes interventions dans les autres filières.

III.2 Contenu des enseignements dispensés

Dans le cadre de mes activités d'enseignement, je suis intervenue très majoritairement à l'UPS. Ci-dessous est proposée une brève description du contenu des enseignements que j'ai effectués depuis mon recrutement.

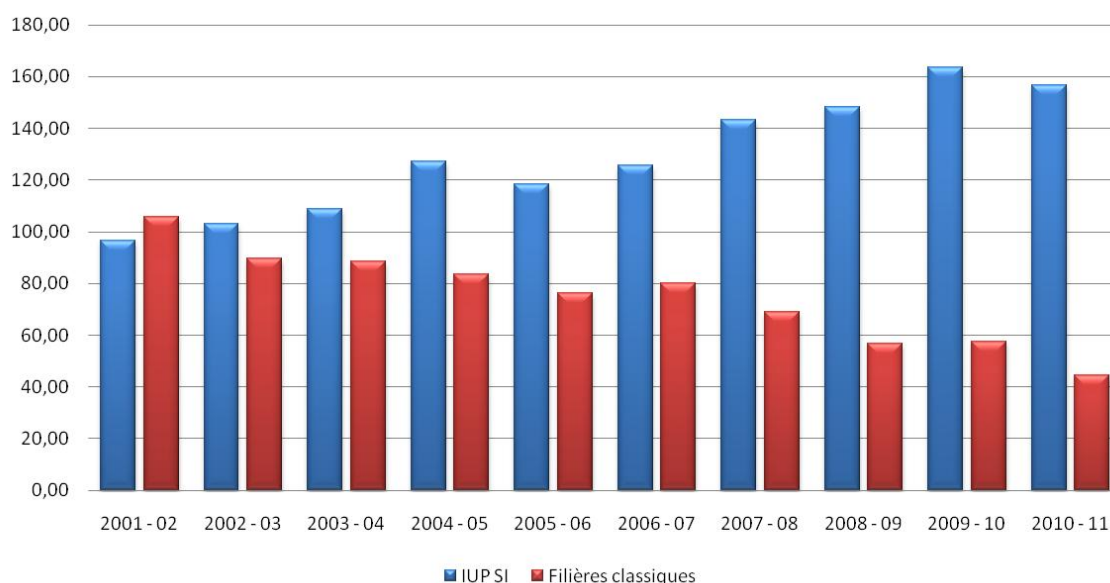


FIGURE III.2 – Répartition du service entre les filières « classiques » et IUP.

III.2.1 A l'UPS

Cette partie est consacrée aux enseignements effectués au sein de l'université P. Sabatier. Leur contenu est plus ou moins détaillé en fonction de mon implication.

III.2.1.1 Filières « classiques »

Licence 1 CIMP TP de robotique :

Je suis intervenue en 2001 au premier semestre du L1 CIMP (Chimie, Informatique, Mécanique, Physique). Il s'agit d'un semestre général permettant d'initier les étudiants intégrant l'université aux principales matières scientifiques afin de faciliter leur orientation future. Dans ce contexte, l'équipe pédagogique de la section 61 a proposé les TP de robotique dans lesquels je suis intervenue en 2001. Ces TP avaient pour but d'illustrer les concepts basiques de l'automatique dans le contexte attractif de la robotique. Les manipulations étaient réalisées sur le robot Peeke I développé par la société Wany Robotics.

Licence 3 EEA TP d'automatique :

Dès mon recrutement, je suis intervenue en L3 EEA où j'ai encadré des séances de TP d'automatique. J'ai également participé à l'évaluation des étudiants, en surveillant les examens, en corrigeant les copies, et en faisant passer des oraux. Ces TP étaient centrés autour de l'analyse et la synthèse fréquentielle pour des systèmes linéaires à temps continu et permettaient d'illustrer les concepts de base de l'automatique : stabilité, précision, rapidité, etc. J'ai cessé d'intervenir dans ces TP lors de la mise en place de l'habilitation de 2007, afin de pouvoir m'investir davantage au sein de l'IUP SI.

Master 1 AITR (ex-maîtrise EEA) TD et TP d'automatique et d'identification :

Dans le prolongement de mes activités d'enseignement en tant qu'ATER, je suis d'abord intervenue en TD et TP d'automatique avant de prendre en charge les TP d'identification et filtrage en collaboration avec M. Courdresses et C. Jauberthie, respectivement professeur et maître de conférences

à l'université P. Sabatier. Nous avons ainsi monté ensemble trois manipulations consacrées respectivement à l'identification d'un système linéaire continu, à la localisation d'un robot mobile à l'arrêt dans un environnement et aux moindres carrés discrets.

Master 2 IRR et PISI Cours, TD, TP et BE de robotique :

J'interviens dans ces formations depuis le début de ma thèse sur des aspects liés à la robotique de manipulation. Avec mon recrutement, mon implication s'est accrue et s'est concrétisée par la reprise du cours de modélisation géométrique et cinématique des bras ainsi que la mise en place d'un nouvel enseignement centré sur la commande référencée capteur. Le premier est commun aux M2 IRR et PISI qui forment respectivement des spécialistes de la robotique et des cadres dans le secteur de la production automatisée. Le deuxième cours n'est dispensé qu'aux M2 IRR et a été créé intégralement à partir des connaissances acquises dans le cadre de mes activités de recherche. Il s'agit d'initier les étudiants à la commande référencée capteur et plus spécifiquement à l'asservissement visuel. Ce cours met en évidence les potentialités de cette approche, en montrant quelques exemples d'application tirés de mes propres travaux et de la littérature. Ce petit tour d'horizon est d'ailleurs l'occasion d'échanges scientifiques intéressants avec les étudiants qui s'ouvrent à un nouveau domaine. Ensuite, il se focalise sur l'asservissement visuel et devient plus technique. Ces concepts théoriques sont ensuite illustrés dans le cadre d'un TD puis d'un TP.

III.2.1.2 IUP SI

Cette partie regroupe mes interventions au sein de l'IUP SI où je suis particulièrement impliquée puisque j'assume une co-responsabilité d'année.

Licence 2 Cours et TD d'automatique

Dès mon recrutement, je suis intervenue en L2 SI où j'ai pris en charge les enseignements d'automatique en 2004. L'objectif est ici d'initier les étudiants à l'automatique et à ses concepts de base de manière à ce qu'ils puissent aborder les cours dispensés en L3 et master dans les meilleures conditions. Les étudiants recrutés étant issus de filières à dominante automatique ou informatique, il était nécessaire d'être très vigilant quant à la pédagogie et la manière de transmettre une matière totalement inconnue pour environ la moitié de la promotion. J'ai conçu les cours, TD et TP à partir de l'expérience acquise dans l'encadrement des TP de licence EEA et de licence ingénierie électrique. Ces enseignements couvraient l'essentiel de l'analyse des systèmes (les aspects commande étant détaillés en L3). J'ai cessé d'intervenir en L2 SI lors de sa fermeture en 2007.

Licence 3 Cours et TD d'automatique et de robotique

J'interviens en L3 SI depuis mon recrutement pour dispenser des enseignements en automatique et en robotique.

TD d'automatique : Ces TD abordent les fondements de l'analyse et la synthèse fréquentielle des systèmes linéaires continus. Si à l'origine ces TD étaient identiques à ceux dispensés en licence EEA, je les ai progressivement modifiés de manière à mieux les adapter à la formation SI. En effet, les étudiants issus de cet IUP n'ont pas vocation à être de « vrais automaticiens » contrairement à ceux de la filière EEA. Il s'agit donc plutôt de donner aux élèves les capacités nécessaires pour appréhender les composantes essentielles des systèmes dits « intelligents » dont l'automatique fait partie. A ce titre, ils doivent acquérir des bases solides dans cette discipline pendant leur formation à l'IUP. C'est donc

dans cette optique que j'ai modifié les sujets d'origine en proposant des exercices liant plus étroitement la robotique et l'automatique.

Cours, TD de robotique : Je suis intervenue dès mon recrutement dans les enseignements de robotique dispensés en L3 que je partage avec M. Taix, maître de conférences à l'université P. Sabatier. Pour ma part, j'assure (ou ai assuré) des cours portant sur les modèles géométriques et cinématiques des bras manipulateurs. Le contenu de ces enseignements est donc relativement proche de celui proposé au sein du cours commun M2 IRR et PISI. La différence majeure réside dans l'approche pédagogique qui ne saurait être la même pour des étudiants de L3 et de M2. En particulier, un volant d'heures de TD supplémentaires permet de traiter quelques exemples et d'illustrer les aspects théoriques de manière détaillée.

Master 1 : Cours, TD, TP d'automatique et de robotique

Etant co-responsable du M1 SI, j'ai choisi d'intervenir dans cette formation de manière de plus en plus significative au fil des années. Je peux ainsi avoir un regard plus proche sur la vie de la promotion, ce qui me permet de détecter la plupart des problèmes potentiels relativement tôt. C'est aussi une manière de me rendre disponible vis-à-vis des étudiants pour les aider, répondre à leurs questions relatives au déroulement de l'année ou leur recherche de stage, etc. Depuis mon recrutement, j'ai effectué en moyenne environ 52 heures équivalent TD en M1 SI². Mon implication a significativement évolué puisque si j'intervenais pour seulement 32h équivalent TD en 2001, en 2007, mon service en M1 SI est passé à 75h équivalent TD réparties sur les deux semestres. Aujourd'hui, j'effectue environ une centaine d'heures au sein de cette formation. Leur contenu est détaillé ci-après.

TD et TP de commande numérique : Il s'agit ici de mes premières interventions au sein du M1 SI. J'ai ainsi assuré les TD de commande numérique pendant 7 ans (2000 – 2007), date à laquelle je les ai abandonnés au profit de F. Gouaisbaut, maître de conférences à l'université P. Sabatier, dont les activités de recherche sont orientées vers l'automatique. Ce choix répondait à un besoin d'évolution des enseignements de commande numérique. Nous avons travaillé ensemble afin de modifier les TD en profondeur et de bonifier leur contenu, notamment en introduisant la commande RST qui n'était pas abordée jusque-là. Nous avons également fait évoluer les TP d'automatique d'une quinzaine d'heures que nous co-encadrons. Ces TP illustrent maintenant trois techniques de commande numérique différentes : la synthèse numérique directe, la discrétisation de correcteurs continus, et le RST. Dans le futur, nous espérons pouvoir progressivement transformer ces TP en bureaux d'études, de manière à ce que les étudiants soient amenés à traiter un problème de bout en bout : analyse du cahier des charges, choix d'un correcteur adapté au problème, simulation sous matlab puis validation expérimentale.

En marge de ces enseignements, la collaboration que j'entretiens avec F. Gouaisbaut nous a conduit à mener une réflexion commune sur les enseignements d'automatique dispensés au sein de SI et des filières EEA. Suite à cette réflexion, nous avons élaboré ensemble une charte des TP précisant les modalités des séances, le contenu souhaité d'un compte-rendu, l'évaluation du travail par les encadrants, etc. Mise en place en 2010, cette charte a été plutôt bien perçue par les étudiants et a conduit à des comptes-rendus plus complets et à de vrais échanges scientifiques au cours des séances. Cela s'est également concrétisé par de meilleurs résultats en termes de notes. Le bilan est donc globalement positif. Une version « allégée » sera à terme élaborée pour les étudiants du L3 SI et du L3 EEA.

2. Ce volume horaire ne comprend que les cours effectués devant les étudiants, et n'incluent pas les heures attribuées au titre de la responsabilité pédagogique et du suivi des stages.

Enfin, en tant que responsable d'année, je suis en charge de l'organisation des enseignements d'automatique du M1 SI et de l'UE associée. A ce titre, je gère le déroulement des séances de TP, la répartition des groupes, le planning et les modalités des examens.

Cours, TD, TP d'espace d'état : Je suis en charge de ces enseignements depuis 2007. Il s'agit ici de donner aux étudiants de M1 SI un aperçu de l'analyse et la commande des systèmes linéaires à temps continu et discret dans l'espace d'état. J'ai élaboré les sujets de TD et de TP à partir de sujets existants que je fais évoluer progressivement pour les adapter au mieux à la finalité de la formation. Ainsi, à terme, il est prévu d'établir un lien plus étroit entre les enseignements d'espace d'état et le cours de robotique mobile. En effet, ce dernier aborde (entre autres) les problèmes de suivi de chemin ou de trajectoire qui peuvent se poser en termes de régulation à zéro d'une représentation d'état linéarisée. Enfin, j'ai conçu une fiche récapitulant l'essentiel du cours que je distribue aux étudiants.

TP de robotique mobile : Comme pour l'espace d'état, j'interviens en TP de robotique mobile depuis 2007. L'objectif est triple. Tout d'abord, il s'agit d'illustrer les cours de robotique mobile et d'estimation dispensés en M1 SI. Cela permet de mettre en évidence les interconnexions existant entre les différentes disciplines enseignées et donc la cohérence de la formation. Ensuite, ces BE sont conçus pour donner la possibilité aux étudiants de développer des **solutions théoriques personnelles** aux différents problèmes posés. En d'autres termes, il n'y a pas de solution stéréotypée et aucune équipe (les étudiants travaillent en quadrinomes) ne propose exactement la même. Cela complique légèrement la tâche de l'encadrant qui doit être capable d'apprécier rapidement les idées proposées par les étudiants. Un certain recul est donc nécessaire pour les guider au mieux et ne pas les laisser s'enliser dans des approches stériles. Enfin, les solutions proposées sont testées expérimentalement sur les robots à disposition. De cette manière, les étudiants sont confrontés également aux problèmes classiques de la mise en œuvre : saturation des actionneurs, imprécision des capteurs, de l'odométrie, Enfin, j'ai présenté ces TP lors d'une journée « Robotique et Enseignement » organisée par le GDR Robotique.

Cours, TD, TP de commande référencée capteur : Ce cours est dispensé aux étudiants de M1 depuis 2007. Le contenu étant très similaire à celui du M2 IRR, je ne détaillerai pas davantage.

Master 1 international « Engineering of Interactive Systems » (EIS) Ce master a ouvert ses portes en septembre 2009. Il s'agit de l'un des aboutissements d'une coopération riche entre l'université P. Sabatier et l'université technique de Liberec (République Tchèque). Cette coopération existe depuis de nombreuses années, matérialisée jusqu'ici par des séjours de chercheurs invités ou le workshop ECMS mentionné plus haut.

Dans le cadre de ce master, j'ai pris en charge une partie des cours et TD de robotique en collaboration avec M. Taix et P. Danès, tous deux maîtres de conférences à l'université P. Sabatier. Le contenu concerne principalement la modélisation géométrique et cinématique des bras manipulateurs, ainsi que la commande référencée vision. Les enseignements étant dispensés en Anglais, j'ai bâti, à partir de l'existant en Français, un ensemble de transparents vidéoprojetés. Un support compilant l'essentiel du contenu est distribué au préalable aux étudiants. Le détail de ces contributions pédagogiques est donné dans la partie III.2.3.

Master 2 Cours, TD, TP de robotique

Je suis intervenue en M2 SI entre 2004 et 2007 pour dispenser le cours de commande référencée vision évoqué plus haut. Je ne détaillerai donc pas davantage cette partie.

III.2.2 Hors de l'UPS

Je suis également intervenue pour Polytech Montpellier. En effet, depuis plus de 10 ans, cette école d'ingénieur envoie ses étudiants de troisième année automatique à Toulouse pour y effectuer un stage en robotique mobile. Ce stage, d'une durée d'une semaine (environ 28h), se déroule au sein de l'AIP-PRIMECA de Toulouse et est consacré à la localisation et la navigation d'un robot dans un environnement partiellement connu. Le sujet proposé est similaire à celui qui est traité en M1 SI, à la différence près que les étudiants peuvent aller plus loin, compte tenu d'un nombre d'heures alloué très supérieur.

III.2.3 Bilan : Contributions pédagogiques spécifiques

Cette dernière partie effectue un bilan de mes activités pédagogiques en termes d'élaboration de supports de cours et de mise en place de TP. Elle résume donc les contributions pédagogiques mentionnées plus haut.

III.2.3.1 Elaboration de supports de cours

- Cours et TD de robotique de manipulation (L3 SI, M2 IRR et PISI). 150 transparents (cours et TD confondus) élaborés sous powerpoint.
- Cours de commande référencée vision (M1 et M2 SI, M2 IRR). 86 transparents élaborés sous powerpoint.
- Adaptation des TD d'automatique originellement dispensés en L3 EEA en L3 SI. 8 sujets de TD ont ainsi été repris et modifiés.
- Elaboration des cours d'initiation à l'automatique (L2 SI) et du cours d'espace d'état (M1 SI). Pas de support distribué aux étudiants, excepté la fiche récapitulative du cours d'espace d'état mentionnée plus haut.
- Supports de cours en Anglais (M1 Intelligent Systems) :
 - Cours et TD de robotique de manipulation. 154 transparents au total élaborés sous powerpoint.
 - Cours et TP de commande référencée vision. 64 transparents développés sous powerpoint.

III.2.3.2 Mise en place de TP

- TP d'identification et filtrage (M1 AITR) en collaboration avec Michel Courdresses et Carine Jauberthie.
- TP d'initiation à l'automatique (L2 SI) en collaboration avec D. Folio, alors ATER à l'université P. Sabatier.
- TP d'automatique numérique (M1 SI) en collaboration avec F. Gouaisbaut.
- TP d'espace d'état (M1 SI) en collaboration avec A. Durand Petiteville et S. Durola, tous deux moniteurs à l'université P. Sabatier.
- BE de commande référencée vision (M1 et M2 SI, M2 IRR).
- TP de robotique mobile pour le M1 SI et Polytech Montpellier en collaboration avec P. Baillion et M. Taix.

III.3 Activités administratives au sein de l'université

Dès le début de ma carrière, je me suis impliquée dans la vie de l'université en assumant des responsabilités pédagogiques mais aussi des fonctions d'intérêt général présentées ci-après.

III.3.1 Responsabilités pédagogiques

A ce jour, j'assume la responsabilité de deux diplômes : la première année de master de l'IUP Systèmes Intelligents (SI) et le parcours IRR du M2 ISTR. Ces deux charges sont détaillées dans les sous-sections suivantes.

III.3.1.1 Responsabilité du master 1 SI

Je suis co-responsable du master 1 de l'IUP Systèmes Intelligents (SI) depuis 2001 avec Isabelle Ferrané, maître de conférences à l'UPS (section 27).

Historique : L'IUP SI a vu le jour en 1992 et propose une formation pluridisciplinaire orientée vers les systèmes intelligents, c'est-à-dire des systèmes autonomes dotés de capacités de décision, de perception et d'action. Cette formation se situe à l'intersection de l'automatique, l'informatique industrielle et l'informatique pure. Elle permet à l'étudiant d'acquérir des compétences scientifiques à la fois générales (mathématiques, automatique, informatique) et spécialisées (intelligence artificielle, interface homme-machine, robotique, vision). De plus, de par son caractère professionnalisant, elle cherche aussi à transmettre une culture de l'entreprise matérialisée par des cours centrés autour de la gestion, de l'organisation, et de la conduite de projets. Ces aspects trouvent leur aboutissement au sein du Projet Grande Envergure (ou PGE). Le PGE est un projet impliquant toute la promotion du M2 SI (entre vingt et trente étudiants) et mobilisant l'ensemble des compétences acquises à l'IUP. Depuis quelques années, le sujet est proposé par un client issu d'un laboratoire de recherche comme le laboratoire LAPMA³ en 2006 – 2007 ou du tissu industriel comme Rockwell Collins en 2009 – 2010 ou encore Magellium en 2010 – 2011. Ainsi que le montre le PGE, l'IUP SI s'appuie sur des collaborations fortes avec les laboratoires de recherche et le secteur industriel. Les professionnels interviennent également au niveau du pilotage de la formation (via le conseil de perfectionnement), du recrutement (via la participation aux jurys d'audition), et des enseignements (via des intervenants issus du monde de l'entreprise).

Fonctionnement : Le fonctionnement de l'IUP a beaucoup évolué depuis sa création. Initialement sur trois ans, l'IUP recrutait à bac + 1 ou bac + 2 pour délivrer un titre d'ingénieur-maître à bac + 4. L'évolution des technologies et des schémas de formation a conduit à la création du DESS Systèmes Intelligents en 1999 puis à l'intégration de l'IUP au sein du schéma européen du LMD en 2003. Plus récemment, en 2007, la première année de l'IUP (L2 SI) a été supprimée. Actuellement, le cursus se fait sur trois ans : dernière année de licence (L3 SI) suivie par les deux ans de master (M1 et M2 SI)⁴. Les deux années de master sont conclues par un stage industriel d'une durée minimale de 4 mois pour le M1 et 5 mois pour le M2. La formation recrute sur dossiers puis entretiens des étudiants de niveau bac+2, issus de l'université (L2), de classes préparatoires (CPGE) ou bien titulaires d'un DUT ou d'un BTS.

Rôle du responsable d'année : Depuis 2001, je suis co-responsable du M1 avec I. Ferrané, la direction de l'IUP étant assumée depuis 2000 par M. Taix. Il s'agit ici de gérer une trentaine d'enseignants dont environ 20 permanents, 5 moniteurs et 4 industriels (dont deux PAST), et une promotion comprenant entre trente et quarante étudiants. Le rôle du responsable est fondamental dans le fonctionnement de l'année qui lui est confiée. Sa mission première concerne l'organisation pédagogique en

3. Laboratoire d'Adaptation Perceptivo Motrice et Apprentissage.

4. Les étudiants ont aussi la possibilité de quitter l'IUP à l'issue de leur M1 pour aller effectuer un M2 autre que SI ou intégrer une école d'ingénieur.

collaboration avec M.L. Sitbon qui assure le secrétariat de la formation. Il doit s'acquitter de tâches diverses et variées concernant le déroulement de l'année, les TER, les stages et les intervenants. En complément à ces activités, le responsable doit également s'impliquer activement à la vie de l'IUP, depuis le recrutement jusqu'à la définition des grandes orientations (habilitations, participation au conseil de perfectionnement, etc.)

Je partage donc la responsabilité du M1 SI avec Isabelle Ferrané depuis une dizaine d'années maintenant. Je suis plus particulièrement en charge des enseignements relevant de la section 61, Isabelle gérant ceux qui sont liés à la section 27. Cependant, nous intervenons ensemble sur l'organisation pédagogique de l'année, ce qui présente l'avantage de ne jamais laisser la direction du M1 vacante.

III.3.1.2 Responsabilité du parcours IRR du M2 ISTR

En complément à ces activités, j'ai accepté en mai 2011 la responsabilité du parcours Intelligence Artificielle, Reconnaissance des formes et Robotique (IRR) du master 2 Ingénierie des Systèmes Temps Réel (ISTR). Cette responsabilité sera effective à compter de septembre 2011 et sera partagée avec Régine André-Obrecht, professeur à l'université P. Sabatier (section 27). Les missions sont très similaires à celles du responsable du M1 SI : gestion des recrutements, des emplois du temps⁵, des intervenants, des examens et des jurys, ainsi que des stages. Je ne reviendrai donc pas en détail sur tous ces points. Il est néanmoins à noter que cette année est une année charnière puisqu'il s'agira de mettre en place une nouvelle habilitation.

III.3.2 Fonctions d'intérêt général

Parallèlement à ces activités qui constituent ma principale charge administrative, j'ai également assumé des fonctions d'intérêt général pour l'université P. Sabatier et d'autres établissements. Ces activités sont brièvement décrites ci-dessous.

III.3.2.1 Responsabilité d'une salle de TP

En 2005 et 2006, j'ai assuré la co-responsabilité d'une salle de TP dédiée à l'automatique et au traitement du signal avec F. Gouaisbaut. Il s'agit d'une salle où passent de nombreux intervenants, permanents et non permanents, et de nombreux étudiants issus de formations variées. Dans ce contexte, le responsable doit assurer différentes missions : garantir un bon fonctionnement du matériel, renouveler ce dernier lorsque nécessaire, participer à la commission des TP, gérer le budget de la salle, etc.

J'ai mené à bien l'ensemble de ces missions en 2005 et 2006, en collaboration avec F. Gouaisbaut. J'ai partiellement renouvelé le matériel informatique (achat de plusieurs PC et d'imprimantes réseau) et investi pour l'achat de deux nouveaux procédés de lévitation magnétique. A l'issue de ces deux années, j'ai choisi de passer la main à Y. Labit, actuel co-responsable de la salle.

III.3.2.2 Participation au recrutement de personnels enseignants et non enseignants

Je me suis aussi impliquée au sein des instances de recrutement. J'ai ainsi participé à la commission de spécialistes de la 61^{ème} section de l'Université Paul Sabatier Toulouse 3 en tant que membre élu suppléant (de 2001 à 2004) puis titulaire (de 2004 à 2008). J'ai de plus été sollicitée pour participer à des comités de sélection (61^{ème} section également) en tant que membre extérieur pour les universités

5. Ici, ils doivent être mis en place en collaboration avec les responsables des deux autres parcours ISIL (Ingénierie Système et Informatique pour la Logistique) et ASTR (Automatique des Systèmes Temps Réel).

de Perpignan (en 2009) et d'Evry Val d'Essonne (en 2010). J'ai également fait partie d'un jury de recrutement d'un ingénieur de recherche pour l'Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieur de Limoges en 2006 (concours externe). De même, j'ai été sollicitée en 2010 pour être membre d'un jury de recrutement pour un poste d'assistant ingénieur (BAP C) à l'université P. Sabatier (concours interne).

III.3.2.3 Participation à différents conseils de perfectionnement

Depuis 2001, je participe au conseil de perfectionnement de l'IUP SI en tant que membre nommé. Ce conseil, composé à parité d'universitaires et d'industriels, se réunit régulièrement afin de définir la politique générale de l'IUP. Cette instance délivrait aussi le titre d'ingénieur-maître au niveau maîtrise (bac + 4), sur proposition d'un jury d'enseignants.

En 2009, 2010, et 2011, j'ai également participé au conseil de perfectionnement du département GEII de l'IUT « A » Paul Sabatier de Toulouse, ainsi qu'au jury de délivrance du DUT. Il s'agissait ici, en ma qualité de responsable du M1 SI, de représenter M. Taix, directeur de l'IUP et membre extérieur de ce conseil de perfectionnement, qui ne pouvait être présent.

Deuxième partie

Projet scientifique

Avant-propos

Mes activités de recherche ont débuté au sein du groupe RIA du LAAS-CNRS durant la préparation de mon doctorat [Cadenat 1999] (1996 – 1999) sous la direction de Philippe Souères, aujourd’hui directeur de recherches au CNRS. En 2006, le groupe RIA a été scindé en trois équipes distinctes : RIS (Robotique, Interaction et Systèmes), RAP (Robotique, Action et Perception) et GEPETTO : le mouvement humanoïde. J’appartiens aujourd’hui au groupe RAP dont les activités de recherche sont orientées autour de quatre axes : la perception visio-auditive pour la reconnaissance d’activités humaines, la perception pour l’exécution de tâches sur un robot, la modélisation et la commande de systèmes robotiques complexes, et enfin les capteurs intégrés communicants. Mes travaux de recherche s’inscrivent au sein du troisième axe et s’intéressent à l’utilisation de l’asservissement visuel pour la réalisation de tâches de navigation complexes de manière autonome. Nous présentons tout d’abord la problématique abordée puis détaillons nos contributions. Enfin, nous terminons en proposant quelques pistes de recherche qui nous semblent pertinentes.

Problématique

Sommaire

IV.1 Approches globales	37
IV.2 Approches locales	39
IV.3 Analyse des deux types d'approches	41

La problématique de la navigation autonome est un sujet largement étudié dans la communauté robotique. Le problème consiste – grossièrement – à amener un robot mobile d'un point de départ à un point d'arrivée [Choset *et al.* 2005]. Pour répondre à ce problème de manière autonome, le robot doit [Remazeilles 2004] :

- posséder des capteurs lui fournissant des données sur l'environnement qui l'entoure,
- disposer d'une représentation de cet environnement et pouvoir s'y localiser,
- être capable de décider des actions à effectuer pour atteindre le but,
- être capable de réaliser ces actions en contrôlant correctement ses mouvements.

Différents capteurs peuvent être envisagés pour réaliser des tâches de navigation : GPS [Cordesses *et al.* 2000, Katsura *et al.* 2003], laser [Thrun *et al.* 2000, Victorino & Rives 2004], etc. Parmi eux, la vision apparaît comme un capteur privilégié. On parle alors de « navigation visuelle ou navigation basée/référencée vision ». Les caméras offrent en effet un signal très riche permettant d'appréhender des environnements variés [Remazeilles 2004]. En outre, elles peuvent être utilisés sur tous les types de robots mobiles, des plus classiques (robots à roues ou manipulateurs mobiles) aux plus récents (drones, sous-marins, humanoïdes, etc.). La gamme des missions réalisables est ainsi considérablement élargie [Bonin-Font *et al.* 2008]. C'est pourquoi, les contributions dans ce domaine n'ont cessé de croître depuis de nombreuses années et sont aujourd'hui extrêmement nombreuses et variées. Le lecteur intéressé trouvera une bonne synthèse des différentes approches proposées entre 2000 et 2008 pour la navigation visuelle dans [Bonin-Font *et al.* 2008]. Un survol moins récent couvrant les années 80 et 90 est également disponible dans [De Souza & Kak 2002].

Les stratégies de navigation ont généralement pour objectif de donner au robot les capacités de perception, décision et action nécessaires pour la réalisation de la tâche. Ces stratégies sont généralement réparties en deux grandes classes, selon que l'on cherche à résoudre le problème localement ou bien globalement.

IV.1 Approches globales

Dans le cas des approches globales, on suppose que l'on dispose d'une connaissance a priori plus ou moins importante de l'environnement. Cette connaissance peut prendre la forme de cartes qui doivent être fournies au robot préalablement à la navigation (soit directement, soit à l'issue d'une phase préliminaire d'exploration). Le choix du type de carte est essentiel car il va conditionner la manière dont sera modélisée la position du robot et, par là-même, les techniques de localisation, de planification et de commande utilisées [Siegwart & Nourbakhsh 2004].

Une première manière de caractériser l'environnement consiste à bâtir un modèle 3D de ce dernier. Le robot dispose ainsi d'une description des limites de l'espace libre, ce qui lui permet de pouvoir se localiser avec une certaine précision [Victorino & Rives 2004]. Différents types de représentations continues ou bien discrètes sont alors possibles. Les premières sont réputées pour leur grande fidélité à l'environnement, mais se trouvent souvent limitées par le coût de calcul [Siegwart & Nourbakhsh 2004]. Les secondes sont moins sensibles à cette limitation mais, étant obtenues en décomposant l'environnement en cellules, offrent une représentation de ce dernier moins fidèle [Siegwart & Nourbakhsh 2004]. De plus, selon la technique de décomposition choisie, certaines cartes telles que la grille d'occupation par exemple nécessitent une grande place mémoire. Les cartes évoquées plus haut sont des cartes dites métriques, c'est-à-dire qu'elles reposent sur des informations géométriques de positionnement (du robot et des obstacles) vis-à-vis d'un repère donné. Ces informations sont généralement obtenues à partir de mesures de distances entre le robot et les obstacles fournies par des capteurs télémétriques ou stéréoscopiques [Victorino & Rives 2004] par exemple. Cependant, ces données ne sont pas forcément le seul moyen de caractériser un environnement. Dans ce contexte, un autre type de carte discrète, plus compacte que les précédentes, peut apparaître intéressant. Il s'agit des cartes dites topologiques. En effet, dans ce cas, on « oublie » les aspects géométriques pour caractériser l'environnement par les informations les mieux adaptées et les plus pertinentes. Une carte topologique est ainsi un graphe composé de nœuds et d'arcs. Le principe général est le suivant : si deux nœuds sont reliés par un arc alors cela signifie que le robot peut aller d'un nœud vers l'autre. La carte topologique capture donc la propriété d'adjacence de la scène. Elle offre clairement une certaine souplesse par rapport aux cartes évoquées plus haut puisque les nœuds peuvent être définis en fonction des caractéristiques de l'environnement les plus pertinentes pour la tâche de navigation. Ces caractéristiques peuvent naturellement rester géométriques, mais il devient possible de considérer d'autres types de données telles que des informations visuelles par exemple. Les nœuds sont donc généralement définis par des zones de l'environnement correspondant à une modalité sensorielle discriminante [Siegwart & Nourbakhsh 2004]. La carte topologique peut ainsi s'adapter aux capteurs disponibles sur le robot. Il est à noter que la littérature propose également des représentations hybrides de l'environnement couplant des cartes métriques et topologiques pour naviguer de manière robuste et précise [Victorino & Rives 2004, Royer *et al.* 2007, Segvic *et al.* 2009].

Une fois le type de représentation choisi, il est d'abord nécessaire de localiser le robot afin de savoir où il se situe dans la carte [Remazeilles 2004]. Ensuite, connaissant le but, il s'agit de planifier un chemin ou une trajectoire permettant d'atteindre ce dernier depuis la position initiale préalablement déterminée. Il ne reste plus alors qu'à synthétiser une loi de commande permettant de suivre le chemin ou la trajectoire ainsi planifiés. Ainsi, le problème de la navigation est traité en deux temps : la planification d'une part et la commande d'autre part [Laumond 2001].

Comme nous l'avons vu, selon la carte considérée, les données sur lesquelles seront bâties la planification et la commande seront de nature différente. Si la carte considérée est de type métrique, le chemin ou la trajectoire seront plutôt exprimés dans l'espace des configurations du robot. Le lecteur intéressé trouvera dans [Mansard 2006] une présentation synthétique des principales méthodes de planification pour les cartes métriques. Ces techniques permettent de répondre au problème, mais sont souvent coûteuses en temps de calcul. De plus, elles introduisent une certaine rigidité, puisqu'il est difficile de pouvoir prendre en compte facilement les modifications imprévues de l'environnement, même si des techniques basées sur la replanification en ligne [Podsedkowski 1998, Koenig & Likhachev 2002, Koenig & Likhachev 2005] ou bien sur la déformation locale de la trajectoire [Quinlan 1994, Khatib *et al.* 1997, Lamiraux *et al.* 2004] existent dans la littérature. En outre, reposant sur une carte métrique, des problèmes d'imprécision ou d'incertitude dans la modélisation ou la localisation peuvent apparaître [Victorino & Rives 2004]. Il peut donc arri-

ver que la trajectoire calculée ne soit pas valide et que le robot ne puisse atteindre son objectif à cause d’une erreur de trajectoire [Mansard 2006]. Une bonne synthèse de cette problématique est proposée dans [Lamiraux *et al.* 2004]. De même, les lois de commande développées seront de type retour d’état¹. Cela signifie que l’asservissement du robot est effectué sur les informations de position et d’orientation du robot. Il est donc nécessaire de localiser le robot par rapport à un repère global lié à la scène à chaque instant afin de pouvoir calculer la loi de commande. Les mêmes inconvénients d’imprécision et d’incertitude évoqués plus haut pour la planification peuvent donc apparaître au niveau du contrôle du mouvement.

Dans le cas d’une représentation topologique de l’environnement, la planification s’appuie généralement sur des algorithmes issus de la théorie des graphes tels que le A^* [Hart *et al.* 1968] ou bien l’algorithme de Dijkstra [Dijkstra 1971]. On extrait alors un chemin donnant la séquence de nœuds reliant les points de départ et d’arrivée, ceux-ci pouvant s’exprimer en termes métriques (dans ce cas, nous sommes ramenés au cas précédent) ou bien de données sensorielles caractéristiques. Selon le cas, les lois de commande permettant au robot de suivre le chemin spécifié seront soit de type retour d’état, soit de type retour de sortie, c’est-à-dire référencées capteur². Ce type de représentation permet donc de travailler directement dans l’espace capteur et de bénéficier des propriétés de simplicité, de robustesse vis-à-vis des bruits de mesure et des différentes erreurs, ainsi que de réactivité propres à ce type d’approche [Chesi & Hashimoto 2003, Mansard 2006]. De plus, dans ce cas, une localisation métrique du robot dans la carte n’est plus nécessaire ; une localisation « topologique », dite qualitative dans [Remazeilles 2004, Victorino & Rives 2004], suffit. Il s’agit alors, non plus de calculer à chaque instant la position précise du robot par rapport à un repère donné, mais plutôt de déterminer son avancement le long du chemin planifié. Ainsi, par exemple, dans le cas où le chemin est exprimé comme une série d’images à atteindre successivement, la localisation est généralement effectuée en calculant un score de similarité entre l’image courante et les différentes images du chemin [Remazeilles & Chaumette 2007].

L’intérêt majeur de l’approche globale se situe dans la capacité à pouvoir réaliser de grands déplacements. De par la quantité importante d’informations disponibles sur l’environnement, les processus de décision et d’action apparaissent découplés : planification d’une part et exécution d’autre part. Si ce type d’approche permet de prendre en compte de nombreuses contraintes et d’avoir une vue « globale » de la tâche, elle souffre néanmoins d’une lourdeur plus ou moins grande au niveau de la mise en œuvre et offre difficilement au robot la réactivité nécessaire vis-à-vis d’éventuels événements imprévus (présence d’obstacles inattendus, modification de l’environnement (e.g., fermeture d’une porte, etc.)). De plus, si l’on utilise des cartes métriques, ce type d’approche apparaît sensible aux différentes erreurs et incertitudes inhérentes à la représentation du monde adoptée. Enfin, un grand nombre d’information sur l’environnement est nécessaire à sa mise en place. Il est néanmoins possible de s’affranchir d’une partie de ces inconvénients en considérant des cartes topologiques qui, capturant la propriété d’adjacence de l’environnement, apparaissent plus légères en termes de réalisation et offrent davantage de possibilité d’adaptation.

IV.2 Approches locales

Dans le cas des approches locales, on suppose qu’aucune connaissance globale n’est disponible a priori sur l’environnement. Le robot va donc évoluer et décider de ses mouvements en fonction

1. Dans ce manuscrit, nous entendons par retour d’état toute loi de commande exprimée en fonction de la configuration ou de la pose du robot.

2. Nous entendons par retour de sortie ou asservissement référencé capteur toute loi de commande exprimée directement en termes de données sensorielles. Ces structures de commande n’incluent donc aucun dispositif permettant de reconstruire l’état du robot à partir des mesures.

du but à atteindre et des données sensorielles perçues au fur et à mesure qu'il évolue dans la scène [Bonin-Font *et al.* 2008]. Seules les informations sur l'environnement proche du robot sont utilisées dans les processus de décision et de contrôle. La tâche à réaliser peut être exprimée soit en termes géométriques (par exemple, avancer d'une distance donnée à partir d'une position initiale), soit directement dans l'espace capteur (aller vers une cible donnée repérable visuellement, rester à telle distance d'un mur, etc.). Selon le cas, la loi de commande synthétisée pour répondre au problème sera de type retour d'état ou bien retour de sortie (i.e., référencée capteur). La première classe de loi de commande nécessite une localisation relative du robot, source d'erreur et d'imprécision. L'asservissement visuel 3D peut être vu comme un exemple de ce type de loi. En effet, comme nous le rappelons dans le panorama proposé dans l'annexe A, cette structure de commande est basée sur des informations de position (ou de situation) extraites de l'image, et est connue pour sa grande sensibilité aux erreurs de modèle et de calibration [Chaumette & Hutchinson 2006, Gans *et al.* 2003]. Le second type de loi s'exprime directement en termes des données sensorielles pertinentes pour sa réalisation. Indépendantes de la configuration ou de la position du robot, elles permettent de s'affranchir de l'étape de localisation et donc de gagner en temps de calcul, en robustesse et en précision. De la même manière que précédemment, l'asservissement visuel 2D peut relever de ce type d'approche, puisqu'il ne repose que sur les indices visuels directement extraits de l'image [Chaumette & Hutchinson 2006, Gans *et al.* 2003].

La plupart des techniques d'évitement d'obstacles telles que celles mentionnées dans [Siegwart & Nourbakhsh 2004] ont un caractère intrinsèquement local. On peut également citer la méthode des champs de potentiel [Khatib 1986] qui est l'une des méthodes les plus courantes pour effectuer des tâches de navigation. Elle consiste à créer un champ de potentiel dans lequel le robot va évoluer : le but sera modélisé par un potentiel attractif, les obstacles par des potentiels répulsifs. Le champ de potentiel peut être exprimé dans l'espace des configurations [Khatib 1986, Siegwart & Nourbakhsh 2004, Shimoda *et al.* 2005] ou bien dans l'espace capteur [Khatib 1996, Cadenat 1999, Mezouar & Chaumette 2002, Cowan *et al.* 2002, Folio 2007, Cherubini & Chaumette 2009, Cherubini & Chaumette 2010].

La grande force des approches locales réside dans la flexibilité qu'elles offrent au robot. Celui-ci n'étant pas contraint à suivre un chemin ou une trajectoire pré-planifiée, il est plus simple de prendre en compte les événements imprévus susceptibles de remettre en cause la réalisation de la tâche. Cependant, elles souffrent de différents inconvénients. Tout d'abord, elles sont réputées pour être sensibles aux minima locaux, remettant en cause la complétude. La convergence vers le but n'est donc jamais totalement garantie. Les méthodes de navigation reposant sur les champs de potentiel sont ainsi réputées pour leur sensibilité plus ou moins grande à ce phénomène [Koditschek 1987, Siegwart & Nourbakhsh 2004]. De même, l'asservissement visuel 2D souffre d'une limitation similaire [Gans *et al.* 2003] et ne dispose que d'un domaine de convergence local [Chaumette 1998, Mansard 2006]. De plus, ces techniques étant généralement basées sur des mesures, elles se trouvent limitées par la portée du ou des capteur(s) considéré(s). Celui-ci ne peut fournir des données sensorielles exploitables que jusqu'à une distance donnée. Lorsque l'on souhaite réaliser une tâche de navigation nécessitant un grand déplacement, les positions initiales et finales du robot sont très différentes. Il se peut donc que les données sensorielles permettant de caractériser le point d'arrivée ne soient pas disponibles dès le début de la tâche. Le robot n'a alors aucune information lui permettant de décider quel mouvement effectuer pour réaliser la tâche. Ainsi, en est-il des techniques d'asservissement visuel basiques qui nécessitent de percevoir l'amer d'intérêt à chaque instant [Chaumette & Hutchinson 2006, Folio 2007]. De plus, toujours en considérant une tâche définie en termes de données capteurs plutôt que de données géométriques, les informations sensorielles seront forcément très différentes entre les points de départ et d'arrivée. Il sera donc complexe de les mettre directement en relation [Remazeilles 2004].

IV.3 Analyse des deux types d'approches

Les méthodes relevant de l'approche globale sont particulièrement bien adaptées pour effectuer des navigations au long cours³. En effet, disposant d'une information riche sur l'environnement, il est possible de raisonner globalement et de pouvoir produire des chemins ou des trajectoires permettant d'atteindre un but éloigné. Cependant, leur inconvénient majeur se situe au niveau de la lourdeur de la mise en œuvre, de leur manque de flexibilité lorsque des événements imprévus viennent perturber l'exécution de la tâche, ainsi que d'une certaine sensibilité aux erreurs et incertitudes lorsque des données métriques sont considérées.

A l'opposé, les approches locales ne s'appuient que sur un minimum d'information sur l'environnement (il faut au moins une description du but). Ne nécessitant aucune planification, elles apparaissent simples et peu coûteuses en termes de réalisation. L'aspect décisionnel n'étant plus traité au niveau de la planification, les choix sont réalisés en ligne, sur la base de ce qui est perçu par le robot. La perception, la décision et l'action apparaissent ici étroitement liées, conférant au robot une grande réactivité. Ces approches offrent donc une grande flexibilité qui peut facilement être exploitée pour traiter des événements imprévus (obstacles inattendus, occultation, etc.). En contrepartie, pour les raisons évoquées plus haut, elles apparaissent très mal adaptées pour réaliser de longs déplacements.

C'est pourquoi, les solutions proposées dans la littérature cherchent de plus en plus à combiner approches globales et approches locales. Dans ce contexte, l'exploitation de la carte topologique apparaît intéressante. En effet, moins contraignante que la carte métrique en termes de réactivité et de réalisation, elle peut permettre de travailler aussi bien avec des données métriques que sensorielles, selon ce qui est le mieux adapté à la tâche considérée. En suivant ce raisonnement, deux grands types de solutions ont progressivement émergé dans la littérature consacrée à la navigation visuelle [Remazeilles 2004]. Elles ont été classées dans les approches locales dans [Bonin-Font *et al.* 2008], mais commencent à inclure des informations globales sans lesquelles il est illusoire de pouvoir réaliser de longs déplacements. Ainsi, l'une d'entre elles s'appuie sur des informations plutôt géométriques puisqu'il s'agit de définir les positions intermédiaires que doit successivement atteindre le système robotique [Argyros *et al.* 2001, Blanc *et al.* 2004]. Dans ce cas, naturellement, les positions successives fournies doivent être très précises. Le second type d'approche requiert une phase d'apprentissage où la trajectoire des primitives visuelles est enregistrée [Matsumoto *et al.* 1996, Gaspar *et al.* 2000, Burschka & Hager 2001, Mezouar *et al.* 2002, Remazeilles 2004, Blanc *et al.* 2005, Kralnik & Přeučil 2008, Courbon *et al.* 2009, Cherubini & Chaumette 2009, Cherubini & Chaumette 2010, Cherubini *et al.* 2011]. Le chemin est alors caractérisé par la séquence d'images appelée route visuelle qui doit être rejouée ensuite. Modélisé sous la forme d'un graphe dont les nœuds sont définis par des « images-clés », il peut être vu comme une première carte topologique de l'environnement, démontrant l'intérêt d'exploiter ce type de représentation dans le cadre de la navigation visuelle.

A la lumière de la discussion précédente, il semble particulièrement intéressant de coupler une carte topologique aux structures de commandes référencées capteurs afin d'allier les informations globales nécessaires pour réaliser de longs déplacements aux avantages des lois de commande référencées capteurs. C'est cette intuition-là, actuellement en pleine expansion dans la communauté asservissement visuel, que nous avons suivie dans nos travaux.

3. Dans ce manuscrit, nous entendons par « tâche de navigation au long cours » toute tâche nécessitant de grands déplacements.

Contribution à la navigation d'un robot mobile par commande référencée multicapteurs

Sommaire

V.1 Approche retenue	43
V.1.1 Objectifs et contraintes	43
V.1.2 Modélisation du problème	44
V.1.3 Principe générique des stratégies de commande synthétisées	49
V.2 Premiers travaux : des obstacles non occultants aux obstacles occultants	54
V.2.1 Navigation par asservissement visuel en présence d'obstacles statiques non occultants	54
V.2.2 Navigation par asservissement visuel en présence d'obstacles statiques occultants	67
V.2.3 Conclusion	82
V.3 Travaux actuels : vers la réalisation de grands déplacements dans des environnements « humains » peu connus	83
V.3.1 Extension des algorithmes en présence d'incertitudes	83
V.3.2 Réalisation de longs déplacements	88
V.3.3 Navigation par asservissement visuel en présence de l'homme	93
V.4 Conclusion	99

Avant de détailler nos contributions, nous présentons tout d'abord les objectifs et les contraintes que nous avons considérés afin de justifier le bien-fondé de l'approche adoptée. Dans un second temps, nous rentrons dans des aspects plus techniques et nous intéressons à la modélisation du problème. Sur cette base, nous revenons sur les techniques d'asservissement visuel et montrons comment leur domaine d'application peut être étendu du local vers le global.

V.1 Approche retenue

V.1.1 Objectifs et contraintes

Notre objectif est d'effectuer des tâches de navigation référencées vision au long cours dans des environnements d'intérieur structurés *peu connus, possiblement évolutifs et où l'homme peut être présent*. Cela signifie donc que nous chercherons autant que possible à réduire la connaissance a priori fournie au robot préalablement à la tâche de navigation. Ainsi, peu d'informations seront disponibles sur les obstacles (position dans la scène, mouvement, et caractère occultant éventuels inconnus), ainsi que sur le ou les amers d'intérêt présents dans l'environnement (pas de modèle 3D disponible). De plus, l'homme étant susceptible de se trouver dans un voisinage proche du robot, les aspects sécurité seront essentiels.

Les tâches de navigation considérées ici consistent essentiellement à atteindre un but donné. Ce but sera défini soit par un amer artificiel, soit par une personne d'intérêt. Leur position dans la scène est inconnue, mais ils peuvent être détectés par la vision (lorsqu'ils sont dans le champ de vue naturellement !). Nous reviendrons sur ce point dans la partie V.1.2.

La description des tâches de navigation envisagées et des contraintes sur l'environnement évoquées montre bien qu'il est nécessaire de donner au robot des compétences relevant à la fois des approches globales et locales. En effet, le but à atteindre étant exprimé en termes de données visuelles, il semble intéressant d'exploiter les techniques d'asservissement visuel pour réaliser la tâche souhaitée (du moins tant que le but peut être perçu depuis la position initiale). En effet, aller vers le but par asservissement visuel va permettre de bénéficier de la robustesse, de la simplicité et de la flexibilité propres à ce type d'approche. Cette flexibilité permettra d'ailleurs de prendre en compte plus facilement les obstacles et les occultations, phénomènes qui ne peuvent être prévus à l'avance. Par contre, il apparaît tout aussi clairement que, si le but n'est pas visible depuis la position initiale du robot, ces techniques ne permettront plus de réaliser la tâche. Il faudra donc les compléter en introduisant des informations globales. Nous exploiterons ici une carte topologique qui permettra de raisonner assez facilement dans l'espace capteur tout en respectant les contraintes sur la quantité d'informations à disposition.

En gardant à l'esprit ce raisonnement, nous rentrons maintenant dans des aspects plus techniques consacrés à la modélisation du problème.

V.1.2 Modélisation du problème

Dans cette partie, nous présentons d'abord les systèmes robotiques et les caméras que nous avons considérés et établissons leur modèle. Ensuite, nous revenons sur la caractérisation des amers permettant de guider le mouvement du robot. Enfin, nous terminons en introduisant la notion d'interaction, notion essentielle dans le domaine de l'asservissement visuel.

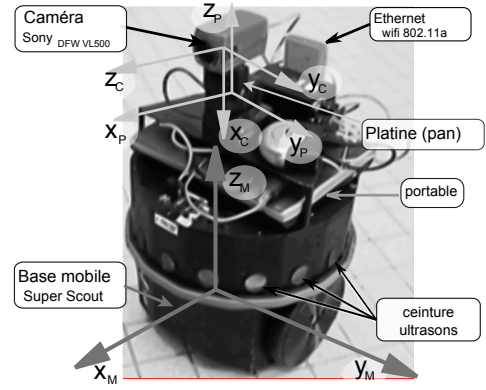
Systèmes robotiques considérés Les robots considérés ici sont des véhicules non holonomes équipés d'une caméra commandable en lacet et de capteurs de proximité permettant respectivement de percevoir le ou les amers d'intérêt et de détecter les obstacles rencontrés. Plusieurs robots utilisés actuellement ou par le passé au LAAS correspondent à cette description : le super-scout II, Rackham et Peeke II (cf. figure V.1). Ces robots ont été utilisés pour la validation expérimentale de nos travaux. Ils ont été équipés de différents modèles de caméras couleur ainsi que de dispositifs permettant de détecter les obstacles. Ainsi, le super scout II est doté d'une caméra Sony DFW-VL 500 [Sony 2001], numérique couleur supportant la norme IEEE 1394, ainsi que d'une ceinture de seize capteurs ultrasonores. Le Peeke II est quant à lui muni d'une caméra réseau Axis 214 PTZ mobile en pan et tilt¹ et offrant des fonctionnalités de zoom [Axis 2008]. Il est de plus équipé d'un laser Hokuyo URG-04LX permettant de mesurer des distances comprises entre 2 cm et 5.6 m avec un débattement angulaire de 240 degrés. Enfin, Rackham est doté de plusieurs dispositifs de vision dont une caméra digitale montée sur une platine pan/tilt développée par Directed Perception. Il est aussi muni de capteurs ultrasonores, d'un laser ainsi que de capteurs RFID qui seront utilisés dans le cadre de nos activités en relation avec la perception de l'homme. De plus amples informations sur ces systèmes sont disponibles dans l'annexe B.

Ces robots peuvent être contrôlés à l'aide de trois vitesses : les vitesses linéaire et angulaire de la base notées (v, ω) , ainsi que la vitesse angulaire de la platine ϖ . Afin de pouvoir commander nos robots, il est nécessaire de déterminer leur modèle cinématique. Ces robots ayant la même structure,

1. Seul le degré de liberté en lacet a été utilisé dans nos travaux.



(a) Robot Rackham (iRobot).



(b) Robot Super Scout II (Nomadic Technologies).



(c) Robot Peeke II (Wany robotics).

FIGURE V.1 – Les différents systèmes robotiques utilisés.

ils partagent le même modèle. Celui-ci peut être établi en exploitant les principes de la mécanique du solide. Pour cela, nous introduisons trois repères (cf. figure V.1(b)) :

- le repère $\mathcal{R}_0$ lié à la scène,
- le repère $\mathcal{R}_M$ lié à la base mobile,
- le repère $\mathcal{R}_P$ lié à la platine,
- le repère $\mathcal{R}_C$ lié à la caméra.

Ainsi, le mouvement de la caméra par rapport au repère de la scène peut s'exprimer comme suit [Pissard-Gibollet 1993, Cadenat 1999] :

$$T_{C/\mathcal{R}_0}^{\mathcal{R}_C} = T_c = J\dot{q} \quad (\text{V.1})$$

où $\dot{q} = (v \ \omega \ \varpi)^T$ est le vecteur de commande considéré ici, J représente la jacobienne du robot² et $T_c = T_{C/\mathcal{R}_0}^{\mathcal{R}_C}$ représente le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère lié à la scène. Ce torseur sera exprimé dans le repère $\mathcal{R}_C$. Il est à noter que, compte tenu de la géométrie du robot, la caméra ne dispose que de trois degrés de liberté : deux en translation selon les axes $\vec{x}_C$ et $\vec{z}_C$, ainsi qu'un en rotation autour de $\vec{x}_C$. Le torseur cinématique évoqué dans l'équation précédente est réduit aux trois vitesses correspondantes, les trois autres étant par construction strictement nulles puisque les mouvements correspondants sont impossibles. De ce fait, la jacobienne est carrée et il est possible de montrer que son déterminant est non nul quelle que soit la configuration. Elle est donc

2. Son expression est disponible dans l'annexe B, les calculs étant détaillés dans [Pissard-Gibollet 1993, Cadenat 1999].

toujours inversible. De plus amples détails sur la modélisation de ce type de robot sont disponibles dans l'annexe B et dans [Pissard-Gibollet 1993, Cadenat 1999].

Ainsi, suite à cette brève description de nos robots, nous pouvons noter que :

- Deux types d'informations sensorielles sont à disposition pour la réalisation de la tâche de navigation souhaitée : les informations visuelles d'une part et les données de proximité³ d'autre part. Elles permettront de caractériser respectivement l'amer d'intérêt et les obstacles rencontrés. Ces informations seront utilisées à la fois au niveau perception et au niveau commande pour détecter les événements imprévus et réagir en conséquence. Nous serons donc amenés à développer des stratégies de commande référencées multi-capteurs.
- La caméra dispose de peu de degrés de liberté (trois seulement, comme nous l'avons montré plus haut). Il sera donc délicat de pouvoir bénéficier de redondance dans la réalisation des tâches.

Dispositifs de vision considérés Les caméras embarquées sur ces robots peuvent être caractérisées par le modèle dit sténopé ou « trou d'épingle », présenté sur la figure V.2. Ce modèle est le plus

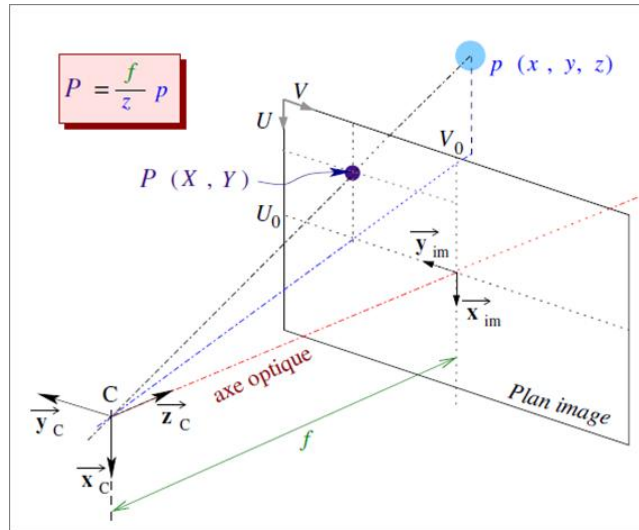


FIGURE V.2 – Modèle sténopé de la caméra.

couramment utilisé en vision par ordinateur, car il permet de modéliser finement la plupart des capteurs projectifs et de simplifier les équations mises en jeu [Horaud & Monga 1995]. D'autant plus acceptable que l'on utilise des focales de faible dimension, le modèle sténopé prend pour hypothèse que tous les rayons passent par un seul point : le centre optique C. De ce fait, les points sont projetés sur le plan image par une projection perspective. Ainsi, un point p de la scène, de coordonnées $\underline{x}_p = (x \ y \ z)^T$, exprimé dans le repère caméra $\mathcal{R}_C$, est projeté sur le plan image en un point P, de coordonnées métriques $\underline{X}_P = (X, Y)^T$, selon la relation suivante :

$$\underline{X}_P = \frac{f}{z} \underline{x}_p \quad (\text{V.2})$$

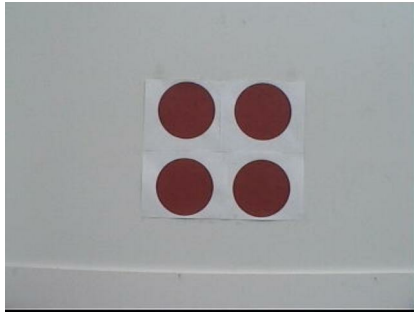
3. Ces données permettront de déterminer la distance et l'orientation relative robot/obstacle.

où f représente la distance focale de la caméra. En introduisant la matrice des paramètres intrinsèques, il est possible d'exprimer ses coordonnées pixels (U, V) de la manière suivante :

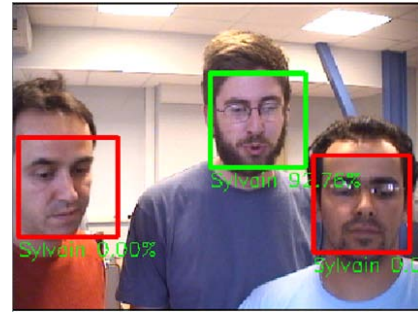
$$\begin{pmatrix} U \\ V \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} \alpha_u & 0 & U_0 \\ 0 & -\alpha_v & V_0 \end{pmatrix}}_{\text{Matrice des paramètres intrinsèques}} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{V.3})$$

où U_0 et V_0 correspondent aux coordonnées pixels de la projection orthogonale du centre optique C dans le plan image. Les termes $\alpha_u = \frac{f}{d_x}$ et $\alpha_v = \frac{f}{d_y}$ où d_x et d_y représentent respectivement la taille des pixels selon les lignes et les colonnes. Les paramètres $(U_0, V_0, \alpha_u, \alpha_v)$, appelés paramètres intrinsèques de la caméra, sont obtenus après calibrage de cette dernière et ne dépendent que du capteur optique proprement dit.

Caractérisation des amers d'intérêt Rappelons que notre objectif est de positionner le robot relativement à un amer artificiel ou une personne d'intérêt. Leur position dans la scène est inconnue, mais il est possible de les détecter à l'aide de la vision. Afin de faciliter le processus d'extraction, l'amer considéré est constitué d'une cible composée de N points généralement d'une couleur particulière (cf. figure V.3(a)). La personne d'intérêt quant à elle est repérée par un tracker dédié développé au LAAS par F. Lerasle et T. Germa [Germa *et al.* 2010a]. Ce tracker retourne les sommets du rectangle englobant sa tête (cf. figure V.3(b)). Les indices visuels utilisés dans nos travaux seront essentiellement de type point.



(a) Amer artificiel.



(b) Résultats du tracker.

FIGURE V.3 – Un exemple d'amer artificiel et de résultats renvoyés par le tracker.

Interaction caméra/environnement Comme nous l'avons mentionné dans la partie V.1.1, nous cherchons à rejoindre le but par asservissement visuel. Afin de pouvoir commander un robot à partir de ce que la caméra perçoit, il est nécessaire de déterminer la manière dont l'information visuelle évolue lorsque la caméra se déplace. Pour cela, nous introduisons la notion de matrice d'interaction [Samson *et al.* 1991, Espiau *et al.* 1992]. Celle-ci relie la variation du signal capteur, noté ici $s(q(t), t)$, au torseur cinématique de la caméra T_c exprimé dans son propre repère. Les informations visuelles caractérisent les mesures effectuées au moyen de la caméra et dépendent dans le cas général de la configuration $q(t)$ du robot et du temps t pris en tant que paramètre explicite [Chaumette 2002]. Ainsi, nous considérons que seul le mouvement de la caméra, et éventuellement celui de l'amer d'intérêt (homme ou cible), sont susceptibles de faire varier la valeur du signal sensoriel. En différentiant $s(q, t)$ par rapport au temps, il vient [Chaumette 2002] :

$$\dot{s}(q, t) = \mathcal{L}(s, z) T_c + \frac{\partial s}{\partial t} = \mathcal{L}(s, z) J \dot{q} + \frac{\partial s}{\partial t} \quad (\text{V.4})$$

où $\mathcal{L}(s, z)$ représente la matrice d'interaction et le terme $\frac{\partial s}{\partial t}$ est dû au mouvement propre de l'amer ou de la personne d'intérêt.

Remarque 1 *Ce terme est nul si l'environnement considéré est statique, ce qui sera notre cas dans la suite de ce manuscrit (sauf mention contraire explicite de notre part). Les solutions que nous avons proposées jusqu'ici restent donc restreintes à des scènes fixes. Bien que nous ayons déjà commencé à travailler sur la prise en compte des mouvements des amers et/ou des obstacles, les résultats obtenus sont encore trop partiels pour être présentés comme des contributions. Nous reviendrons en détail sur ce point dans le chapitre suivant consacré aux travaux à venir.*

La matrice d'interaction $\mathcal{L}$ dépend non seulement des indices visuels considérés (points, droites, moments, ...) mais aussi de l'information de profondeur. Le calcul de cette matrice peut se faire hors ligne par des techniques d'apprentissage ou bien en ligne lors de l'asservissement [Chaumette 2002]. Il est aussi possible de déterminer analytiquement cette matrice. C'est l'approche proposée dans [Chaumette 1990, Chaumette 2004, Collewet & Marchand 2011] où le lecteur intéressé trouvera l'expression des matrices d'interaction associées respectivement à des primitives géométriques classiques (points, droites, cylindres, sphères, etc.), aux moments de l'image et à l'intensité d'un pixel.

Comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent, nous considérerons essentiellement dans ces travaux des indices visuels de type point. Dans le cas d'un point 3D p de coordonnées dans $\mathcal{R}_C$ $(x_p \ y_p \ z_p)^T$ qui se projette sur le plan image en un point P, de coordonnées métriques $(X_P, Y_P)^T$, la matrice d'interaction est donnée par [Chaumette 1990, Espiau *et al.* 1992] :

$$\mathcal{L}_P = \begin{cases} \begin{pmatrix} -\frac{f}{z_p} & 0 & \frac{X_P}{z_p} & \frac{X_P Y_P}{f} & -(f + \frac{X_P^2}{z_p}) & Y_P \\ 0 & -\frac{f}{z_p} & \frac{Y_P}{z_p} & f + \frac{Y_P^2}{z_p} & -\frac{X_P Y_P}{f} & -X_P \end{pmatrix} & \text{pour une caméra à six degrés de liberté.} \\ \begin{pmatrix} 0 & \frac{X_P}{z_p} & \frac{X_P Y_P}{f} \\ -\frac{f}{z_p} & \frac{Y_P}{z_p} & f + \frac{Y_P^2}{z_p} \end{pmatrix} & \text{pour notre système robotique.} \end{cases} \quad (\text{V.5})$$

Remarque 2 *Traditionnellement, la matrice d'interaction est de dimension $(k, 6)$, k étant le nombre d'indices visuels considérés et 6 le nombre de mouvements possibles pour la caméra dans le cas général. Or, ici, compte tenu de la géométrie du robot sur lequel elle est embarquée, elle ne dispose que de trois degrés de liberté. Son torseur cinématique est donc de dimension $(3, 1)$. Afin que les dimensions des différents termes soient compatibles, la matrice ne comporte alors que les trois colonnes correspondant aux trois mouvements permis.*

Le résultat proposé dans la relation (V.5) peut naturellement être généralisé au cas de N points. Le vecteur des indices visuels correspondant est alors donné par $s = (X_{P_1}, Y_{P_1}, \dots, X_{P_j}, Y_{P_j}, \dots, X_{P_N}, Y_{P_N})^T$ où les couples (X_{P_j}, Y_{P_j}) représentent les coordonnées métriques du $j^{\text{ème}}$ point P_j de l'amer projeté dans le plan image de la caméra. La matrice d'interaction résultante $\mathcal{L}_s$ s'obtient alors en concaténant les matrices d'interaction $\mathcal{L}_{P_j}$ associées à chaque point P_j . Nous avons donc au final :

$$\mathcal{L}_s = \begin{pmatrix} \mathcal{L}_{P_1}^T & \dots & \mathcal{L}_{P_N}^T \end{pmatrix}^T \quad (\text{V.6})$$

où les lignes $\mathcal{L}_{P_j}^T$ sont obtenues en appliquant la relation (V.5) à chaque point P_j .

Ayant posé notre problème et établi les modèles nécessaires aux développements ultérieurs, nous nous intéressons aux aspects liés à la commande.

V.1.3 Principe générique des stratégies de commande synthétisées

Comme nous l'avons mentionné plus haut, notre objectif est de réaliser des tâches de navigation possiblement au long cours dans des environnements d'intérieur structurés peu connus où l'homme peut être présent. L'aspect évolutif n'a été que partiellement abordé à ce jour, et sera exposé dans la prospective de nos activités de recherche (cf. remarque 1).

Pour répondre à ce problème, nous avons montré l'intérêt d'opter pour une structure incluant à la fois des informations globales regroupées sous la forme d'une carte topologique et des stratégies de commande référencées capteurs pour effectuer les mouvements locaux. Nous nous focalisons ici sur ce dernier aspect et nous intéressons à la synthèse de ces stratégies de commande. Pour les raisons indiquées plus haut, nous souhaitons nous appuyer sur l'asservissement visuel pour permettre au robot de converger vers l'amer ou la personne d'intérêt (lorsqu'ils sont dans le champ de vision de la caméra). Cependant, il est clair que d'autres contraintes telles que les risques éventuels de collision et d'occultation, par nature imprévisibles, devront être pris en compte dans les stratégies de commande développées. Nous nous concentrons ici sur ces deux points essentiels, qui ont un caractère intrinsèquement local, de notre solution. Nous rappelons d'abord les principes de base de l'asservissement visuel. Nous montrons ensuite comment nous avons étendu son rayon d'action en intégrant les contraintes susmentionnées.

V.1.3.1 Asservissement visuel

Les structures de commande de type asservissement visuel sont généralement classées en trois catégories distinctes [Gans *et al.* 2003, Chaumette & Hutchinson 2006] : les asservissements visuels 3D (ou position-based), 2D (ou image-based) et 2D1/2 (cf. annexe A). Leur dénominateur commun réside en l'utilisation de la vision pour contrôler le robot. La différence se situe au niveau du traitement de l'information. Selon le cas, des informations de type 3D, 2D ou bien les deux sont utilisées pour bâtir la loi de commande. Nos travaux reposent sur l'asservissement visuel 2D. Nous avons opté pour cette structure de commande pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la tâche n'est plus décrite en termes métriques (comme dans l'asservissement visuel 3D par exemple), mais par un motif visuel de référence. La commande est alors synthétisée sur la seule base des indices visuels extraits de l'image. Il s'agit donc d'un véritable retour de sortie, ce qui permet d'éviter les inconvénients inhérents à la reconstruction d'information 3D (sensibilité aux erreurs, temps de calcul plus important, etc.). De plus, elle nécessite peu d'informations (le modèle 3D et la position de l'amer d'intérêt ne sont pas requis) pour sa mise en œuvre, ce qui présente l'avantage de réduire les informations à fournir au robot sur l'environnement. Enfin, comme nous l'avons déjà vu, de par sa nature réactive, elle donne une certaine flexibilité au robot, ce qui permettra de prendre en compte assez aisément des événements imprévus. La littérature propose différentes approches issues de la communauté robotique ou automatique pour synthétiser des asservissements visuels 2D [Danès & Bellot 2006]. Pour notre part, nous nous sommes focalisés sur le formalisme des fonctions de tâche [Samson *et al.* 1991]. Nous revenons dans la suite sur ce formalisme et rappelons comment l'utiliser pour synthétiser un asservissement visuel 2D.

Formalisme des fonctions de tâche Le formalisme des fonctions de tâche a été initialement développé dans [Samson *et al.* 1991] pour définir un cadre global à la commande des robots manipulateurs holonomes. Il a ensuite été exploité pour asservir visuellement des bases mobiles non holonomes [Pissard-Gibollet 1993]. Cette approche consiste à modéliser la tâche considérée sous la forme d'une *fonction de tâche* telle que sa régulation à zéro conduit à l'exécution correcte de la mission. La fonction de tâche est une fonction de sortie particulière, généralement notée $e(q(t), t)$, dépendant de la configuration $q(t)$ du robot et éventuellement du temps t pris en tant que paramètre explicite. Elle

prend ses valeurs dans $\mathbb{R}^n$ où n représente la dimension du vecteur q . Elle peut s'exprimer en termes de données proprioceptives ou extéroceptives selon l'application considérée et les capteurs disponibles sur le robot. Dans le cadre de nos travaux, seules des fonctions de tâche dépendant de q seront considérées puisque, dans la plupart des cas, nous avons travaillé dans des environnements statiques. Elles seront exprimées directement en fonction des informations visuelles renvoyées par la caméra.

L'exploitation de ce formalisme requiert deux étapes : d'abord, il est nécessaire de définir une fonction de tâche e telle que si $e = 0$ alors la mission est correctement réalisée ; ensuite, il faut synthétiser une loi de commande permettant de réguler e à 0. Ainsi, le problème de commande correspondant à la réalisation d'une application robotique peut généralement être ramené à la régulation à zéro d'une fonction de tâche sur un certain intervalle de temps $[0, T]$. De ce fait, le robot est contrôlé par une loi de commande exprimée non plus dans l'espace d'état, mais dans l'espace de sortie (ou encore l'espace du capteur). D'où le terme de commande référencée capteur. Néanmoins, pour que ce problème de commande soit bien posé, on comprend qu'il est nécessaire d'assurer un lien régulier entre l'espace d'état et l'espace de sortie de telle sorte qu'une petite variation autour de la trajectoire de référence dans le premier se traduise par une petite variation autour de zéro dans le second. Une condition suffisante pour garantir cette propriété est que la fonction de tâche soit admissible [Samson et al. 1991]. Cette notion étant relativement bien connue, nous ne la détaillons pas : nous rappelons simplement que l'admissibilité de la fonction de tâche repose essentiellement sur la régularité de sa matrice jacobienne $J_e = \frac{\partial e}{\partial q}$, bien que d'autres conditions moins restrictives soient aussi nécessaires. Nous renvoyons le lecteur intéressé à [Cadenat 1999] pour une synthèse plus détaillée que dans ce document et à [Samson et al. 1991] pour la description complète de cette notion. Afin d'assurer l'admissibilité de la fonction de tâche, il suffit donc de la choisir de manière à contraindre autant de degrés de liberté que d'actionneurs disponibles. L'obtention de cette propriété est purement un problème de modélisation de la tâche à réaliser. Cependant, certaines applications ne nécessitent pas l'utilisation de tous les degrés de liberté disponibles, et donc toute tâche robotique ne satisfait pas la propriété d'admissibilité. La fonction de tâche est alors dans ce cas redondante.

Formalisme des tâches redondantes Une tâche redondante est une tâche qui ne contraint pas tous les degrés de liberté du robot. La jacobienne de la fonction de tâche n'est donc pas carrée et cette dernière n'est pas admissible. Dans un tel cas, le problème est sous-contraint et il existe une infinité de solutions pour réaliser la tâche considérée. Aussi, est-il nécessaire de la modifier de telle sorte qu'elle satisfasse cette propriété. Pour cela, il suffit d'introduire l'information manquante sous la forme d'une tâche supplémentaire à exécuter. Une première solution peut consister à modéliser cette deuxième tâche sous la forme d'une fonction de tâche contraignant les degrés de liberté restants. Il suffit alors de la concaténer à la première pour définir une fonction de tâche bien conditionnée. Cependant, une telle solution suppose l'indépendance et la compatibilité des deux tâches considérées, celles-ci devant pouvoir être *parfaitement réalisées simultanément*. Il n'est donc pas toujours simple de définir une fonction de tâche admissible avec une telle méthode. Le formalisme des tâches redondantes permet de satisfaire ces deux propriétés « par construction ». L'idée est d'exploiter la redondance pour effectuer au mieux des objectifs secondaires. Dans le formalisme des tâches redondantes, ces objectifs secondaires sont modélisés sous la forme d'un critère h à minimiser sous la contrainte que la tâche principale e_1 soit parfaitement réalisée. Ce problème d'optimisation est ramené à la régulation à zéro de la fonction de tâche suivante [Samson et al. 1991] :

$$e = W^+ e_1 + \beta(I - W^+ W)g \quad (\text{V.7})$$

où $g = \frac{\partial h}{\partial q}$ est le gradient du critère, $W^+ = W^T(WW^T)^{-1}$ la pseudo-inverse à droite de W et β un réel non nul. I définit la matrice identité de dimension n . W est une matrice telle que $\text{Ker}(W) = \text{Ker}(J_1)$

où $J_1 = \frac{\partial e_1}{\partial q}$ est la jacobienne de la tâche e_1 . Le terme $(I - W^+W)$ représente alors l'opérateur de projection sur le noyau de J_1 qui caractérise l'espace des mouvements laissés libres par la réalisation de la tâche e_1 . Ainsi, un déplacement sur cet espace laisse e_1 invariante et égale à zéro, et permet donc de réaliser une tâche secondaire tout en garantissant la parfaite exécution de e_1 . On comprend dès lors que la tâche secondaire caractérisée par le critère h ne pourra être réalisée qu'au mieux, compte tenu des degrés de liberté laissés vacants par la tâche primaire e_1 . Des approches similaires basées sur la redondance permettent de réaliser plusieurs tâches simultanément [Nakamura 1990, Siciliano & Slotine 1991, Mansard 2006, Marey & Chaumette 2010a, Kanoun *et al.* 2011].

Remarque 3 *Si, en plus des conditions évoquées plus haut, le rang de J_1 est plein, la matrice W vérifie $J_1 W^T > 0$, le hessien du critère est défini positif et $\beta > 0$ est choisi suffisamment petit au sens défini dans [Samson *et al.* 1991], alors on peut montrer que J_e est définie positive. L'admissibilité de la fonction de tâche e peut alors être établie.*

Synthèse de la commande : application à l'asservissement visuel 2D Rappelons que notre objectif de commande est de réguler à zéro la fonction de tâche e . Cette régulation peut être réalisée par le biais de lois de commande dynamiques comme dans [Samson *et al.* 1991]. Dans le cadre de nos travaux, nous imposerons simplement une décroissance exponentielle de la forme $\dot{e} = -\lambda e$ où λ est un gain définissant la vitesse de la décroissance exponentielle de la fonction de tâche. Il peut être un scalaire positif ou bien une matrice définie positive. Sous l'hypothèse que e est admissible et rappelant que $\dot{e} = J_e \dot{q}$ dans un environnement statique, la loi de commande correspondante s'écrit :

$$\dot{q} = -J_e^{-1} \lambda e \quad (\text{V.8})$$

Si e est admissible, sa jacobienne est inversible et cette condition est suffisante pour garantir l'unicité de la commande calculée. On notera bien sûr que le calcul de la commande nécessite de déterminer J_e , ce qui n'est pas forcément simple. Ce problème se pose lorsque e est de la forme (V.7). Dans ce cas, si la jacobienne J_e est positive (i.e., les conditions rappelées dans la remarque 3 sont vérifiées), alors on peut montrer que la loi de commande ci-après suffit pour garantir la régulation de e à zéro [Espiau *et al.* 1992] :

$$\dot{q} = -\lambda e \quad (\text{V.9})$$

Appliquons maintenant ce résultat pour réaliser une tâche de positionnement par asservissement visuel 2D. L'amer ou la personne d'intérêt étant caractérisée par N points, le vecteur des indices visuels courants s s'écrit $s = (X_1, Y_1, \dots, X_j, Y_j, \dots, X_N, Y_N)^T$. La fonction de tâche permettant de réaliser ce type de mission s'écrit généralement sous la forme suivante [Chaumette & Hutchinson 2006] :

$$e_{\text{pos}}(q(t)) = C(s(q(t)) - s^*) \quad (\text{V.10})$$

où s^* désigne le vecteur des indices visuels de référence. La matrice C est appelée matrice de combinaison et permet de considérer un nombre d'informations capteur supérieur au nombre de degrés de liberté disponibles. Afin que la propriété d'admissibilité soit garantie, elle doit être de rang plein et telle que $C \mathcal{L}_s J$ soit de rang plein également. Cette matrice est souvent définie par la pseudo-inverse à gauche de $\mathcal{L}_s$. De plus amples détails sur le choix et le calcul de C peuvent être trouvés dans [Chaumette & Hutchinson 2006]. En appliquant le résultat obtenu dans (V.8), la loi de commande permettant de réaliser un asservissement visuel 2D s'écrit :

$$\dot{q} = \dot{q}_{\text{av}} = -(C \mathcal{L}_s J)^{-1} \lambda_{\text{av}} e_{\text{pos}} = -J^{-1} \lambda_{\text{av}} e_{\text{pos}} \text{ si } C = \mathcal{L}_s^+ \quad (\text{V.11})$$

Ce correcteur sera à la base de la plupart des déplacements du robot vers l'amer ou la personne d'intérêt. Cependant, il ne peut conduire à la réalisation de la tâche que si :

1. l'environnement devant le robot est libre (i.e., pas d'obstacle gênant),
2. l'amer ou la personne d'intérêt est perçu pendant toute l'exécution de la tâche (i.e., le motif visuel ne doit jamais être perdu quelle qu'en soit la raison : sortie du champ de vision, occultation, but trop éloigné du robot, etc.)

Bien entendu, ces conditions ne respectent pas les contraintes et le cadre de travail évoqués plus haut. L'asservissement visuel 2D à lui seul ne permet donc pas de répondre au problème posé. Afin d'atteindre les objectifs fixés, il est nécessaire d'élargir le champ d'action de cette technique. Pour cela, il faut pouvoir prendre en compte les contraintes supplémentaires de collision et de perte du signal visuel générées par la présence des obstacles et les longs déplacements. Les premières ont un caractère typiquement local et seront donc traitées par des techniques du même type ; les secondes, dues à la réalisation de tâches de navigation au long cours, seront gérées à l'aide de méthodes globales. Dans la suite, nous nous intéressons d'abord aux solutions locales développées pour répondre au problème des collisions et des occultations. Nous présentons le principe général de raisonnement. Nous montrerons plus loin que, moyennant quelques améliorations, ce principe nous permettra de prendre en compte les contraintes dues aux longs déplacements.

V.1.3.2 Première extension du champ d'application de l'asservissement visuel : intégration des contraintes locales dues aux collisions et aux occultations

Les collisions et les occultations peuvent être vues comme des contraintes qu'il faut prendre en compte pendant l'exécution de l'asservissement visuel. La littérature propose une grande variété d'approches permettant de répondre (au moins partiellement) à ce problème (cf. panorama proposé dans l'annexe A). Les solutions apportées se situent soit au niveau de la vision avec le développement d'indices visuels mieux adaptés, soit au niveau de la commande avec l'exploitation de la redondance ou de techniques de contrôle avancé, soit à un niveau intermédiaire entre la perception et l'action puisqu'il s'agit alors de coupler des méthodes de planification à l'asservissement visuel [Allibert *et al.* 2010].

Nos travaux s'inscrivent pleinement dans le second type d'approche. Les contraintes sont alors prises en compte directement au niveau de la commande. Différentes solutions ont été proposées dans la littérature : elles peuvent relever des techniques de commande optimales telles que les LMIs [Danès & Coutinho 2006, Durola *et al.* 2009] ou la commande prédictive [Allibert *et al.* 2010] par exemple. Elles nécessitent alors d'exprimer les contraintes en termes d'équations ou d'inéquations dépendant de l'état du système ou de ses sorties de manière à les intégrer dans la synthèse de commande. La formulation et la résolution du problème peuvent donc parfois s'avérer relativement complexe. C'est notamment le cas des techniques basées sur les LMIs qui conduisent souvent à des solutions conservatives. D'autres approches proposent de s'appuyer sur la redondance. Celle-ci ne peut s'utiliser que dans la mesure où la tâche principale (dans notre cas, l'asservissement visuel) ne contraint pas tous les degrés de liberté. Elle permet localement de déformer la trajectoire effectuée afin de satisfaire les contraintes. Ce type d'approche a ainsi été exploité pour éviter les butées articulaires et les singularités [Marchand *et al.* 1996, Chaumette & Marchand 2001]. Cependant, elle peut être limitée si le nombre de degrés de liberté laissés libres par la tâche principale n'est pas suffisant [Mansard 2006]. Une dernière solution proposée dans la littérature consiste à modifier le schéma de contrôle lorsque cela s'avère nécessaire. C'est cette approche-là que nous avons choisie.

Ce type de solution consiste à activer ou désactiver des tâches ou des correcteurs élémentaires en fonction des événements détectés (risque de collision ou d'occultation, proximité des butées articulaires ou des bornes de l'image, etc.)⁴. On peut alors basculer d'un correcteur à un autre mieux adapté à la

4. On notera que certains auteurs proposent aussi de modifier les informations sensorielles considérées dans la commande en fonction des besoins [Garcia-Aracil *et al.* 2006, Mansard *et al.* 2009, Kermorgant & Chaumette 2011a].

situation rencontrée par le robot et – in fine – réaliser la tâche souhaitée. Un processus garantissant la continuité de la loi de commande globale appliquée au robot doit généralement être mis en place. Afin de pouvoir appliquer ce principe, il est tout de même nécessaire de garder une « trace » du but à atteindre⁵ à chaque fois que l'on modifie la loi de commande, sous peine de ne pouvoir revenir à l'exécution de la tâche principale. Ces approches sont généralement mises en œuvre en enchainant différentes tâches ou correcteurs [Pissard-Gibollet 1993, Swain 1999, Cadenat 1999, Souères & Cadenat 2003, Chesi *et al.* 2004, Deng *et al.* 2005, Mansard 2006, Folio 2007, Marey & Chaumette 2010b] ou bien encore en s'appuyant sur la théorie des systèmes hybrides [Gans *et al.* 2003, Gans & Hutchinson 2007]. Ces approches présentent l'avantage de donner au robot une certaine flexibilité, la commutation pouvant être réalisée en ligne. Cependant, dans la plupart des cas, il est difficile de prouver la stabilité globale [Cadenat 1999, Gans & Hutchinson 2007]. Une autre difficulté consistera en le choix des paramètres gérant le basculement. Nous reviendrons sur ces différents points en présentant nos propres contributions. Ces approches « commutatives » ont été utilisées dans divers cadres. Elles ont notamment permis d'élargir le domaine de convergence des asservissements visuels 2D et 3D en basculant entre ces deux types d'asservissement visuel en fonction de différents paramètres [Gans *et al.* 2003, Deng *et al.* 2005, Gans & Hutchinson 2007]. Elles ont aussi été exploitées pour prendre en compte les contraintes de visibilité en commutant entre des asservissements visuels 2D et différents correcteurs destinés à conserver les indices visuels dans l'image [Chesi *et al.* 2004]. Elles ont de plus été utilisées pour gérer la proximité aux butées articulaires [Marey & Chaumette 2010b] ainsi que pour réaliser des tâches complexes [Pissard-Gibollet 1993, Swain 1999, Cadenat 1999, Souères & Cadenat 2003, Mansard 2006, Folio 2007, Cadenat *et al.* 2012]. Il est aussi possible de combiner ces approches avec la redondance [Mansard 2006, Marey & Chaumette 2010b].

Pour notre part, compte tenu du faible nombre de degrés de liberté à disposition (cf. partie V.1.2), la redondance est très limitée et ne peut être que difficilement exploitée. C'est pourquoi, nos solutions se sont focalisées sur les techniques à base d'enchainement. La démarche que nous avons suivie s'inspire directement des résultats obtenus dans nos travaux de doctorat [Cadenat 1999]. En effet, à l'issue de ces travaux, nous avons montré qu'une tâche de navigation complexe ne pouvait être réalisée par la régulation à zéro d'une seule fonction de tâche définissant un difféomorphisme global entre l'espace des configurations et l'espace capteur. En effet, la propriété d'admissibilité ne peut être obtenue que localement et le domaine de validité de la tâche est caractérisé par l'inversibilité de la jacobienne [Cadenat 1999]. De plus, toutes les informations perçues par le robot ne sont pas forcément pertinentes au même moment. La définition de la tâche à réaliser dépend donc de la position du robot dans l'environnement (présence d'obstacle ou pas, risque d'occultation ou pas, etc.). Il semblait donc assez naturel de définir une application robotique évoluée comme la succession de tâches élémentaires nécessaires à sa réalisation. Chacune d'entre elles peut alors être caractérisée par une fonction de tâche admissible, un difféomorphisme local et un domaine de validité correspondant [Cadenat 1999]. En suivant ce raisonnement, nous avons divisé la tâche de navigation considérée en trois grandes sous-tâches⁶ :

- la tâche de navigation référencée vision nominale, i.e., dans l'espace libre,
- la gestion des collisions afin de garantir la sécurité des biens et des personnes,
- la gestion de la perte temporaire du signal visuel due à la présence d'obstacles occultants dans la scène.

Il s'agit ensuite de synthétiser un correcteur permettant de réaliser chaque sous-tâche de manière

5. La méthode de conservation diffère selon la méthode considérée. Dans notre cas, il s'agira de conserver la caméra orientée vers le but. Nous reviendrons sur ce point plus loin.

6. Ce découpage sera ensuite complété pour pouvoir prendre en compte les aspects globaux liés à la réalisation de navigation au long cours.

indépendante puis de basculer continûment entre ces différents correcteurs en fonction des événements. Le correcteur concernant la première sous-tâche est directement obtenu par asservissement visuel 2D. Il est donc donné par l'équation (V.11). Il reste à définir les méthodes permettant de traiter les problèmes d'occultation et de collision liés à la présence des obstacles. C'est précisément à ces problèmes que nous nous intéressons dans la section suivante.

V.2 Premiers travaux : des obstacles non occultants aux obstacles occultants

Dans cette partie, nous nous intéressons à la gestion des collisions et des occultations pendant l'exécution d'une tâche référencée vision dans un environnement statique encombré. Nous rappelons que la mission considérée n'inclut pas de longs déplacements. Seuls des aspects locaux sont donc considérés ici, notre objectif étant simplement de donner au robot la capacité de réagir efficacement face à des obstacles immobiles imprévus. Pour cela, nous avons développé, d'abord dans le cadre de notre thèse puis de nos activités de recherche ultérieures, des stratégies de commande évoluées capables de traiter les problèmes de collision et d'occultation. Nous nous sommes appuyés sur les deux modalités sensorielles à disposition sur nos robots : la vision et les capteurs de proximité. La première sera utilisée pour réaliser la tâche souhaitée et pour gérer les occultations. Les données renvoyées par les seconds permettront de garantir la non collision. Ces deux types d'informations seront utilisés à trois niveaux différents :

- *Perception* : détection et reconnaissance du but ou des obstacles, extraction des données sensorielles nécessaires,
- *Décision* : évaluation du risque de collision et d'occultation, choix des mouvements à effectuer en fonction de ces risques (i.e., gestion du basculement entre les différents correcteurs (cf. dernier item)),
- *Action* : réalisation de ces mouvements par le biais de correcteurs dédiés reposant sur les données sensorielles adéquates.

Les stratégies de commande que nous avons développées sont donc des stratégies référencées multicapteurs, au sens où elles incluent des données sensorielles de nature différente. Comme nous l'avons vu plus haut, elles reposent sur l'enchaînement de différents correcteurs. Cet enchaînement est réalisé de manière automatique en fonction des informations collectées par les capteurs extéroceptifs. *L'ordre des correcteurs appliqués n'est ainsi pas fixé a priori mais dépend de l'environnement immédiat autour du robot.*

Nous détaillons maintenant les différentes stratégies mises en place. Nous avons travaillé progressivement, en proposant d'abord des solutions au problème de l'évitement d'obstacles statiques non occultants [Cadenat 1999], avant de nous intéresser à la prise en compte des occultations totales ou partielles du motif visuel d'intérêt [Folio 2007].

V.2.1 Navigation par asservissement visuel en présence d'obstacles statiques non occultants

La plupart des travaux présentés ici s'inscrivent dans le cadre de notre doctorat effectué entre 1996 et 1999 [Cadenat 1999]. Les références bibliographiques permettront de distinguer aisément les contributions liées à notre thèse de celles obtenues ultérieurement. Nous présentons d'abord la stratégie de commande envisagée et expliquons comment nous détectons le risque de collision. Ensuite, nous donnons quelques éléments sur les différentes techniques d'enchaînement que nous avons utilisées ainsi

que sur les méthodes considérées pour réaliser l'évitement d'obstacles. Enfin, nous terminons par quelques résultats de simulation et expérimentaux.

V.2.1.1 Détection du risque de collision et stratégie de commande considérée

Dans cette partie, nous nous intéressons à la navigation par asservissement visuel en présence d'obstacles statiques non occultants. Un seul type d'événement imprévu doit donc être pris en compte : le risque de collision. Ce risque sera évalué à partir des données renvoyées par les capteurs de proximité dont dispose le robot (laser, ultra-sons, infra-rouges). Pour cela, il est nécessaire de traiter ces données pour extraire les informations de distance et d'orientation relative entre le robot et l'obstacle. Ces informations, notées respectivement d_{coll} et α (cf. figure V.4), sont définies par :

- la distance entre le centre M du robot et le point B le plus proche appartenant à la surface de l'obstacle,
- l'orientation α entre la tangente $\vec{T}$ à l'obstacle et la direction $\vec{x}_M$ du véhicule.

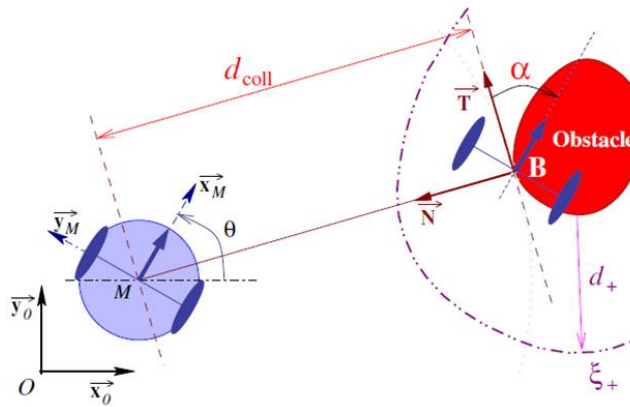


FIGURE V.4 – Détection du risque de collision.

Remarque 4 *Il est à noter ici que la détermination de d_{coll} et α peut s'avérer délicate lorsque les capteurs utilisés manquent de précision. Ainsi, par exemple, dans le cas du super-scout II qui était équipé d'une ceinture de seize capteurs ultrasonores répartis régulièrement autour de sa circonférence, le calcul de ces données était entaché d'une erreur assez importante. Cependant, ces erreurs n'ont pas remis en cause les expérimentations de nos stratégies réalisées sur ce robot. Une analyse de ce problème et de ses conséquences est présentée dans [Cadenat et al. 2006].*

Afin de déterminer le risque de collision, nous introduisons l'enveloppe ξ_+ . Cette enveloppe, située à une distance d_+ de l'obstacle, représente la zone à partir de laquelle l'obstacle est pris en considération et correspond à la limite de sa zone d'influence. Il devient ainsi possible de définir mathématiquement la notion de « près d'un obstacle » et « loin d'un obstacle », c'est-à-dire le risque de collision. Celui-ci peut dès lors être caractérisé par un paramètre μ_{coll} variant entre 0 et 1 en fonction de la distance d_{coll} . Ainsi, lorsqu'il n'y a pas de risque de collision (i.e., le robot est hors de la zone d'influence ξ_+ de l'obstacle), μ_{coll} est fixé à 0. Inversement, si le robot est à proximité d'un obstacle, μ_{coll} passe à 1 de manière à garantir la non collision. En suivant ce raisonnement, la stratégie adoptée apparaît clairement. Elle consiste à réaliser la tâche référencée vision tant que $\mu_{\text{coll}} = 0$ et à basculer sur l'évitement d'obstacle dès que la valeur de ce paramètre évolue. Cela conduit à la loi de commande référencée multi-capteurs suivante [Cadenat 1999] :

$$\dot{q} = (1 - \mu_{\text{coll}})\dot{q}_{\text{av}} + \mu_{\text{coll}}\dot{q}_{\text{coll}} \quad (\text{V.12})$$

où $\dot{q} = (v \ \omega \ \varpi)^T$ représente la commande envoyée au robot. $\dot{q}_{av} = (v_{av} \ \omega_{av} \ \varpi_{av})^T$ désigne la commande permettant de réaliser la tâche de navigation référencée vision désirée. Elle est donnée par l'asservissement visuel 2D (V.11). $\dot{q}_{coll} = (v_{coll} \ \omega_{coll} \ \varpi_{coll})^T$ correspond à la commande assurant l'évitement d'obstacles. Nous proposerons dans la partie V.2.1.3 quelques lois de commande possibles. Comme nous l'avons vu, μ_{coll} permet de basculer d'un correcteur à l'autre en fonction du risque de collision. Différents choix sont envisageables pour définir la manière dont ce paramètre évolue. Il est ainsi possible de considérer une variation continue [Pissard-Gibollet 1993, Cadenat 1999, Folio 2007] ou bien binaire [Souères & Cadenat 2003, Durand Petiteville *et al.* 2011b] selon le type d'enchaînement considéré. Nous abordons ce point important dans le paragraphe ci-après.

V.2.1.2 Techniques d'enchaînement

L'application de la loi de commande (V.12) requiert de pouvoir :

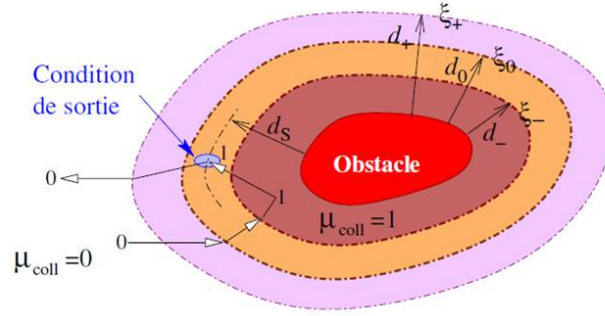
- sélectionner « le bon correcteur » au « bon moment » : cela passera par une définition adéquate du paramètre μ_{coll} ;
- garantir la continuité de la commande envoyée au robot à l'instant de basculement.

Nous nous focalisons ici sur le deuxième point, car la caractérisation du risque de collision (i.e., la définition de μ_{coll}) est intimement liée à la technique permettant d'assurer la continuité. La littérature propose deux approches garantissant cette propriété : l'enchaînement par combinaison convexe d'une part et l'enchaînement dynamique d'autre part. Nous les détaillons ci-après puis proposons une petite analyse comparative de leur fonctionnement.

Enchaînement par combinaison convexe Dans ce cas, les correcteurs $\dot{q}_{av}$ et $\dot{q}_{coll}$ sont synthétisés indépendamment et fusionnés en utilisant une simple combinaison convexe. Le paramètre μ_{coll} va donc évoluer continûment entre 0 et 1. Il est possible d'effectuer cette évolution en fonction du temps comme dans [Pissard-Gibollet 1993, Pissard-Gibollet & Rives 1995]. Cependant, cela implique que l'on choisisse l'instant de basculement (soit en ligne, soit a priori). Or, pour notre application, il apparaît clairement que changer de correcteur explicitement en fonction du temps n'est pas judicieux, puisque la condition de commutation est liée à la présence (ou l'absence) d'obstacles dans l'environnement proche du robot. C'est pourquoi, comme nous l'avons mentionné plus haut, le paramètre μ_{coll} caractérisant le risque de collision est exprimé directement en fonction de la distance à l'obstacle d_{coll} . Il évolue pour l'instant de manière binaire puisque ce paramètre est fixé à 0 si $d > d_+$ et à 1 sinon. Il est clair que cette définition ne permet pas de définir une combinaison convexe. Afin de l'enrichir, nous introduisons deux nouvelles enveloppes ξ_- et ξ_0 situées respectivement à des distances d_- et d_0 de l'obstacle (cf. figure V.5). La première définit la région où celui-ci est considéré comme réellement dangereux ; la seconde représente l'enveloppe de sécurité que le robot doit emprunter pour contourner l'obstacle.

Afin que la stratégie fonctionne, μ_{coll} doit vérifier les propriétés suivantes :

- $\mu_{coll} = 0$ loin des obstacles (notamment au-delà de ξ_+),
- $\mu_{coll} = 1$ près des obstacles (notamment en-deçà de ξ_-),
- $\mu_{coll} \in]0, 1[$ entre ξ_+ et ξ_- ,
- μ_{coll} doit être maintenu à 1 jusqu'à ce que tout danger soit écarté. Cet événement se produit lorsque les tâches de navigation référencée vision et d'évitement deviennent compatibles [Cadenat 1999]. Il peut être caractérisé de différentes manières. Dans [Cadenat 1999], la phase de contournement prend fin lorsque les directions de la base mobile et de la platine deviennent parallèles à l'obstacle. Dans [Folio 2007], la condition de sortie est vérifiée dès que les correcteurs cessent d'être antagonistes, i.e., dès que $\text{sign}(\dot{q}_{av}) = \text{sign}(\dot{q}_{coll})$.

FIGURE V.5 – Evaluation du risque de collision et évolution de μ_{coll} .

Toute expression de μ_{coll} satisfaisant les conditions précédentes est acceptable. Une solution consiste à imposer une variation linéaire à ce paramètre [Cadenat 1999, Folio 2007]. Le lecteur intéressé trouvera d'autres pistes de choix dans [Cadenat 1999].

Enchaînement dynamique Dans ce cas, la synthèse de la loi de commande est réalisée de manière à ce que la continuité soit garantie à l'instant de basculement t_b . Les deux correcteurs $\dot{q}_{\text{av}}$ et $\dot{q}_{\text{coll}}$ à enchaîner doivent alors être déterminés de manière à ce qu'ils aient la même valeur à cet instant. Il est donc impossible de les calculer indépendamment l'un de l'autre. Par contre, la continuité étant maintenant assurée au niveau de la synthèse de la loi de commande, elle n'a plus à être gérée par le biais du paramètre μ_{coll} . Une définition binaire suffit donc ici.

Cette approche, développée initialement dans [Souères & Cadenat 2003], s'inscrit dans le prolongement de notre doctorat et s'appuie sur le formalisme des fonctions de tâche [Samson *et al.* 1991]. Comme nous l'avons rappelé plus haut, nos travaux de thèse ont montré qu'une application robotique évoluée pouvait être vue comme une succession de tâches élémentaires. Chacune de ces tâches peut être caractérisée par une fonction de tâche admissible, un difféomorphisme local et un domaine de validité correspondant [Cadenat 1999]. Afin que le basculement entre deux tâches successives soit possible, les domaines de validité correspondants doivent être en intersection, de telle sorte que les domaines de validité successifs recouvrent une composante connexe de l'espace libre contenant les configurations initiale et finale du robot. Ce recouvrement de l'espace libre peut être interprété comme un atlas différentiable si l'on considère que le difféomorphisme existant sur chacun des domaines définit en fait une carte locale à l'intérieur de laquelle la régulation de chaque fonction de tâche élémentaire est réalisée. Il semble donc que l'idée de conférer à l'espace libre une structure de variété différentielle puisse aider à modéliser le problème de navigation d'un robot mobile par enchaînement de tâches élémentaires référencées multi-capteurs. Le basculement entre ces différentes tâches peut alors être géré par les transformations différentielles existant entre chaque carte. C'est sur ce principe que s'appuie l'enchaînement dynamique. Nous ne décrivons ici que les aspects « pratiques » de ce type d'enchaînement, la théorie étant détaillée dans [Souères & Cadenat 2003].

Considérons deux tâches qui doivent être enchaînées. Ces deux tâches sont modélisées par deux fonctions de tâche supposées admissibles $e_1(q(t))$ et $e_2(q(t))$. Leurs matrices jacobienues sont données par $J_1 = J_1(q(t)) = \frac{\partial e_1}{\partial q}$ et $J_2 = J_2(q(t)) = \frac{\partial e_2}{\partial q}$. Ces deux matrices sont naturellement inversibles. Les correcteurs permettant de réguler e_1 et e_2 à zéro sont donnés par [Souères & Cadenat 2003] :

$$\dot{q} = J_1^{-1} \dot{e}_1^* \quad (\text{V.13a})$$

$$\dot{q} = J_2^{-1} \dot{e}_2^* \quad (\text{V.13b})$$

où $\dot{e}_1^*$ et $\dot{e}_2^*$ représentent respectivement les dynamiques choisies pour e_1 et e_2 . Donc, exécuter e_1 puis e_2 nécessitera de basculer entre les correcteurs (V.13a) et (V.13b). Comme la dynamique de e_1 a généralement été imposée au préalable, le seul paramètre sur lequel nous pouvons agir pour garantir la continuité est $\dot{e}_2^*$. L'idée centrale est alors de choisir ce dernier de manière à prendre en compte l'effet de l'exécution de la tâche e_1 sur la dynamique de e_2 à l'instant t_b . Celui-ci est donné par [Souères & Cadenat 2003] :

$$\dot{e}_2 = J_2 J_1^{-1} \dot{e}_1^* \quad (\text{V.14})$$

Cette relation permet d'exprimer l'impact de la réalisation de la tâche e_1 sur la dynamique de la tâche e_2 . Si $\dot{e}_2^*$ est choisie de manière que l'équation (V.14) soit vérifiée à l'instant t_b alors la continuité de la loi de commande sera garantie. En effet, les correcteurs (V.13a) et (V.13b) ont la même valeur à $t = t_b$. Il reste donc maintenant à choisir une dynamique convenable pour e_2 . Celle-ci devra remplir deux conditions, garantissant respectivement que la tâche sera correctement réalisée et que la continuité de la loi de commande sera préservée à $t = t_b$:

1. $\dot{e}_2^*$ doit garantir que la fonction de tâche e_2 sera effectivement régulée à zéro ;
2. $\dot{e}_2^*(q(t_b))$ doit vérifier la relation (V.14) à l'instant t_b .

Il est clair ici qu'une simple décroissance exponentielle ne permet plus de répondre au problème posé. Une autre solution proposée dans [Souères & Cadenat 2003] est d'imposer une dynamique du second ordre de la forme :

$$\ddot{e}_2 + k_1 \dot{e}_2 + k_2 e_2 = 0 \quad (\text{V.15})$$

où k_1 et k_2 sont les gains de commande. Bien que cette solution permette de répondre au problème, il est parfois difficile de choisir a priori ces deux gains. C'est pourquoi, N. Mansard a proposé d'utiliser une dynamique définie par une équation du premier ordre non homogène comme suit [Mansard 2006, Mansard & Chaumette 2007] :

$$\dot{e}_2^*(q(t)) = -\lambda_{\text{dyn}} e_2(q(t)) + \rho(t) \quad (\text{V.16})$$

où $\rho(t) = \kappa e^{-\tau(t-t_b)}$, κ étant donné par :

$$\kappa = \dot{e}_2(q(t_b)) + \lambda_{\text{dyn}} e_2(q(t_b)) = J_2(q(t_b)) J_1^{-1}(q(t_b)) \dot{e}_1^*(q(t_b)) + \lambda_{\text{dyn}} e_2(q(t_b)) \quad (\text{V.17})$$

$\lambda_{\text{dyn}} > 0$ et $\tau_{\text{dyn}} > 0$ représentent deux gains qui permettent de fixer **indépendamment** la vitesse de décroissance de l'erreur et le temps de basculement⁷. Il est important de noter que les deux dynamiques (V.15) et (V.16) sont strictement équivalentes si l'on choisit $k_1 = \lambda_{\text{dyn}} + \tau_{\text{dyn}}$ and $k_2 = \lambda_{\text{dyn}} \tau_{\text{dyn}}$.

Remarque 5 *Il est possible d'utiliser d'autres dynamiques que les deux solutions mentionnées. Il suffit en effet que les deux conditions évoquées plus haut soient vérifiées. Nous pouvons citer par exemple les travaux de B. Gao où une dynamique du troisième ordre a été définie [Gao 2006].*

Appliquons maintenant ce formalisme à notre cas. Comme nous l'avons vu, une commutation binaire suffit puisque la continuité est traitée au niveau de la synthèse de la loi de commande. Cependant, cette fois, les correcteurs $\dot{q}_{\text{av}}$ et $\dot{q}_{\text{coll}}$ ne peuvent plus être synthétisés indépendamment. Au contraire, leur détermination doit s'appuyer sur le formalisme des fonctions de tâche et plus précisément sur la définition d'une fonction de tâche admissible. Nous avons vu que la tâche e_{pos} qui définit l'asservissement visuel vérifie cette propriété. Cependant, le correcteur (V.11) synthétisé plus haut ne permet

7. Afin d'assurer un temps de basculement faible devant le temps de décroissance de l'erreur, il suffit d'imposer $\tau_{\text{dyn}} > \lambda_{\text{dyn}}$ [Mansard & Chaumette 2007].

pas d'imposer une dynamique vérifiant les deux conditions mentionnées plus haut. C'est pourquoi, dans les cas où la tâche sera réalisée par enchaînement dynamique, il sera remplacé par le correcteur suivant :

$$\dot{q} = \dot{q}_{\text{av}_{\text{dyn}}} = -(C\mathcal{L}_s J)^{-1} \dot{e}_{\text{pos}}^* = -J^{-1} \dot{e}_{\text{pos}}^* \text{ si } C = \mathcal{L}_s^+ \quad (\text{V.18})$$

où $\dot{e}_{\text{pos}}^*$ est la dynamique permettant de réguler la fonction de tâche e_{pos} à zéro. Elle vérifiera donc l'une des deux relations précédentes (V.15) ou (V.16).

Le même problème se posera pour l'évitement d'obstacles. Il faudra être capable de le caractériser par une fonction de tâche admissible. Le correcteur $\dot{q}_{\text{coll}}$ sera alors déterminé en respectant l'une des deux dynamiques proposées plus haut.

Brève analyse comparative des deux méthodes d'enchaînement Dans cette partie, nous proposons une analyse comparative des deux techniques de séquençement présentées plus haut. Cette analyse figure dans [Cadenat *et al.* 2012] dans le cas où trois correcteurs sont enchaînés.

Le séquençement par combinaison convexe présente l'avantage de la simplicité puisque l'on peut rapidement et aisément prototyper une stratégie de commande à base de correcteurs élémentaires. Ces correcteurs peuvent être synthétisés indépendamment en exploitant des techniques adaptées à chacun d'entre eux. Il suffit ensuite de définir correctement le paramètre μ_{coll} pour que l'enchaînement soit effectué dans de bonnes conditions. Cette technique donne de plus une certaine flexibilité au robot dans ses réactions vis-à-vis des événements qui interviennent pendant l'exécution de la tâche. Cette approche souffre néanmoins de plusieurs inconvénients. Tout d'abord, elle peut être sensible aux minima locaux, même si leur occurrence est réduite en limitant la période pendant laquelle plusieurs correcteurs antagonistes agissent sur le robot simultanément. Ensuite, la qualité de l'enchaînement dépend de plusieurs paramètres (valeurs des distances, seuils de déclenchement des indicateurs, type d'évolution retenue pour μ_{coll} (linéaire, autre, ...) qui sont fortement couplés. Ces paramètres influencent à la fois l'instant de basculement et la manière dont la loi de commande va varier à cet instant. Leur valeur est très souvent liée à la tâche à réaliser et à l'environnement (positions des obstacles et du but, configuration initiale du robot, etc.) Il est donc difficile de fixer ces paramètres a priori. Une petite expertise est nécessaire. Enfin, la mise en œuvre est d'autant plus complexe que le nombre de correcteurs à enchaîner est important.

Au contraire, le séquençement dynamique repose sur des fondements mathématiques plus solides mais nécessite d'exprimer toutes les tâches à exécuter sous la forme d'une fonction de tâche admissible, ce qui n'est pas forcément un problème simple. Il présente néanmoins plusieurs avantages. Il permet de garantir la continuité de la loi de commande de manière naturelle à l'instant de basculement⁸. En outre, sa mise en œuvre apparaît plus simple pour différentes raisons. Tout d'abord, la stratégie de commande dépend uniquement d'indicateurs binaires déclenchés en fonction des événements intervenant dans l'exécution de la tâche. S'ils sont correctement définis, seul le correcteur le plus pertinent est appliqué au robot, ce qui permet de supprimer les problèmes de minima locaux dus à l'enchaînement. Ensuite, cette technique repose sur un nombre de paramètres plus petit que la précédente, ces paramètres étant découplés. En effet, les indicateurs définissent l'instant de basculement t_b et les gains la dynamique du basculement. Le choix est donc facilité. En général, la dynamique est choisie en fonction des possibilités du robot. Il reste ensuite à imposer des distances respectant ces contraintes. Aucune expertise particulière n'est donc requise ici.

La table suivante résume les forces et faiblesses de chacune des approches mentionnées [Cadenat *et al.* 2012] :

8. La continuité est seulement garantie au premier ordre. Il faut donc choisir les gains (k_1, k_2) ou $(\lambda_{\text{dyn}}, \tau_{\text{dyn}})$ de manière à éviter que les actionneurs saturent en accélération.

Technique d'enchaînement	Combinaison convexe	Enchaînement dynamique
Avantages	– Prototypage simple. – Prise en compte plus aisée des contraintes en accélération.	– Continuité naturelle de la loi de commande. – Suppression des problèmes de minima locaux. – Paramètres peu nombreux et faciles à fixer a priori.
Inconvénients	– Sensibilité aux minima locaux plus importante. – Choix des paramètres a priori parfois délicat.	– Formulation du problème sous forme de fonctions de tâche admissibles. – Continuité au second ordre non garantie.

TABLE V.1 – Synthèse de l'analyse comparative.

V.2.1.3 Synthèse de la commande assurant l'évitement d'obstacles

Notre propos est ici de déterminer la commande $\dot{q}_{\text{coll}}$ à appliquer au robot pendant l'évitement. Celle-ci aura deux objectifs : tout d'abord, il s'agira de garantir la non collision avec l'obstacle détecté ; ensuite, il faudra assurer la conservation du but (amer ou personne d'intérêt) dans le champ de vision de la caméra. En effet, si la seconde condition n'était pas satisfaite, il serait impossible d'exécuter à nouveau l'asservissement visuel, une fois l'obstacle contourné car la cible aurait été perdue.

Nous rappelons ici que nous considérons pour l'instant des obstacles non occultants. Compte tenu de la géométrie des robots considérés, cela signifie que la hauteur des objets de l'environnement est inférieure à celle de la caméra embarquée [Cadenat 1999]. Nous supposons de plus que la distance entre deux obstacles reste supérieure à $2d_+$, ce qui permet de considérer à tout instant uniquement l'obstacle le plus proche [Cadenat 1999]. De plus, nous admettons qu'il n'y a pas d'obstacle dans le voisinage de la cible qui empêcherait la finalisation de la mission.

Les stratégies de commande dédiées à l'évitement que nous avons élaborées peuvent se décliner en deux grandes familles, selon que la platine et la base mobile sont commandées séparément ou bien conjointement. La première relevant de nos travaux de thèse [Cadenat 1999], nous ne la rappelons que très brièvement. Par contre, nous insisterons davantage sur la seconde qui est plus récente et qui peut être utilisée indifféremment avec l'une ou l'autre des techniques d'enchaînement évoquées ci-dessus.

Commande séparée de la base mobile et de la platine La première approche proposée dans [Cadenat 1999] consiste à désolidariser les mouvements de la base mobile et de la platine pendant l'évitement, l'idée étant de séparer les degrés de liberté correspondant à chacun de ces sous-systèmes. Elle s'appuie sur les travaux développés par D.P. Tsakiris [Tsakiris *et al.* 1996, Tsakiris *et al.* 1997, Tsakiris *et al.* 1998] où l'objectif était de stabiliser un robot mobile en une situation fixe tout en suivant un amer visuel d'intérêt à l'aide d'une caméra embarquée. Elle est également à rapprocher des approches relevant du « partitioned-based visual servoing » [Corke & Hutchinson 1999, Gans *et al.* 2003] (cf. annexe A). Nous nous intéressons d'abord à la commande de la base mobile puis à la commande de la platine.

Commande de la base mobile Il s'agit ici de contraindre le robot mobile à suivre l'enveloppe de sécurité ξ_0 afin de garantir la non collision. Pour cela, dans [Cadenat 1999], nous avons synthétisé deux stratégies d'évitement dont le principe est représenté sur la figure V.6.

La première est basée sur la définition d'un champ de potentiel répulsif rotatif (cf. figure V.6(a))

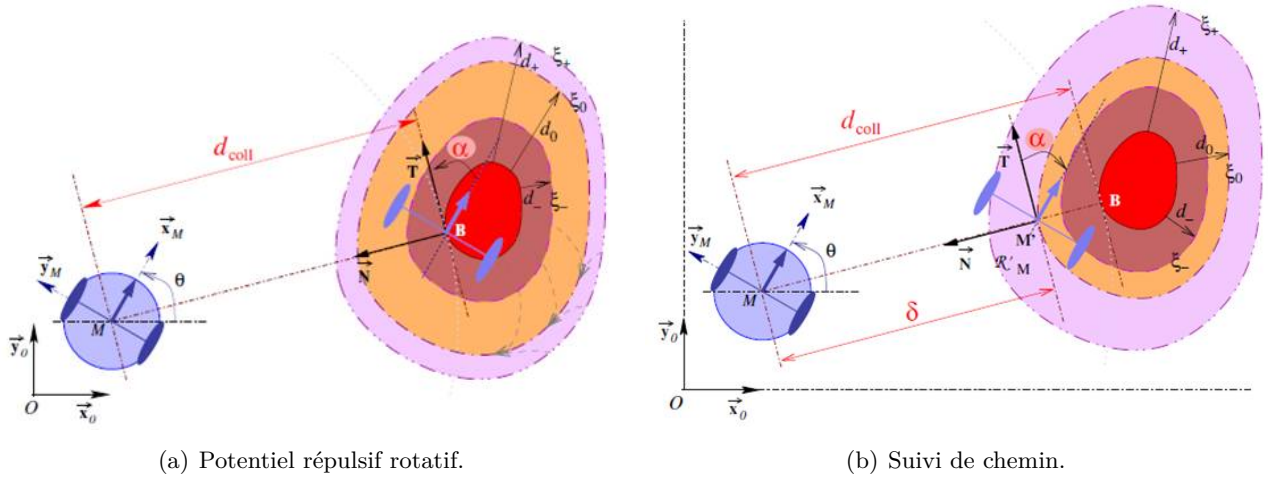


FIGURE V.6 – Evitement d'obstacle par potentiel répulsif rotatif et suivi de chemin.

offrant l'avantage de limiter les problèmes de minima locaux [Cadenat 1999]. La loi de commande correspondante est donnée par [Cadenat 1999, Cadenat *et al.* 1999b] :

$$v_{\text{coll}} = k_{v_{\text{coll}}} F \cos \beta \text{ avec } F = -\frac{\partial U_{\text{coll}}(d_{\text{coll}})}{\partial d_{\text{coll}}} \text{ et } \beta = \alpha - \frac{\pi}{2} \frac{d_{\text{coll}}}{d_0} + \frac{\pi}{2} \quad (\text{V.19a})$$

$$\omega_{\text{coll}} = k_{\omega_{\text{coll}}} \frac{F}{D_x} \sin \beta \quad (\text{V.19b})$$

où $k_{v_{\text{coll}}}$ et $k_{\omega_{\text{coll}}}$ sont des gains positifs permettant de fixer la dynamique du contournement, F désigne le module de la force répulsive calculé à partir du champ de potentiel répulsif $U_{\text{coll}}(d_{\text{coll}})$, β représentant la direction de cette force.

La seconde stratégie d'évitement exploite le formalisme du suivi de chemin développé dans [Samson 1992] pour contraindre le robot à suivre l'enveloppe de sécurité ξ_0 . Dans ce cas, il s'agit de stabiliser à zéro un système dynamique caractérisant l'évolution des erreurs de position $\delta = d_{\text{coll}} - d_0$ et d'orientation α du robot par rapport au repère de Frenet $(M', \vec{T}, \vec{N})$ (cf. figure V.6). Une loi de commande permettant d'atteindre cet objectif est donnée par [Cadenat 1999, Cadenat *et al.* 1999a] :

$$v_{\text{coll}} = v_0 \neq 0 \quad (\text{V.20a})$$

$$\omega_{\text{coll}} = -v_{\text{coll}}(k_{\omega_{\text{coll}}} \delta + \alpha + 2k_{\omega_{\text{coll}}} \sin \alpha - \bar{\chi} \cos \alpha) \quad (\text{V.20b})$$

où $k_{\omega_{\text{coll}}}$ est un gain positif, $\bar{\chi} = \frac{\sigma}{R}$ représente la courbure de l'obstacle et R son rayon de courbure. σ est le sens de contournement. La vitesse linéaire v_{coll} est fixée constante et égale à une valeur $v_0 \neq 0$ afin de garantir la commandabilité du système susmentionné. Une preuve de stabilité ainsi qu'une méthode permettant de choisir le gain $k_{\omega_{\text{coll}}}$ est proposée dans [Cadenat 1999].

Commande de la platine Etant capable de contourner l'obstacle en suivant l'enveloppe de sécurité ξ_0 , il reste maintenant à garantir que le but ne sera jamais perdu pendant toute la phase d'évitement. Pour cela, nous avons proposé de garder l'amer au centre de l'image tout en compensant le mouvement d'évitement de la base. Cela nous a conduit à réguler à zéro la fonction de tâche $e_{\text{pl}} = Y_{\text{cdg}}$ où Y_{cdg} est l'ordonnée du centre de gravité de l'amer considéré. En imposant une décroissance exponentielle et en partitionnant la jacobienne du robot de manière à séparer les termes relatifs à la

base notés J_{base} de ceux relatifs à la platine notés J_{pl} (soit $J = [J_{\text{base}} \ J_{\text{pl}}]$), on peut montrer que la commande de la platine ϖ_{coll} s'écrit [Cadenat 1999] :

$$\varpi_{\text{coll}} = \frac{-1}{\mathcal{L}_Y J_{\text{pl}}} (\lambda_{\text{pl}} e_{\text{pl}} + \mathcal{L}_Y J_{\text{base}} \dot{q}_{\text{base}}) \quad (\text{V.21})$$

où $\mathcal{L}_Y$ est donné par la deuxième ligne de $\mathcal{L}_P$ (cf. relation (V.5)) et $\dot{q}_{\text{base}} = (v_{\text{coll}} \ \omega_{\text{coll}})^T$ est calculé à l'aide des lois de commande (V.19) ou (V.20) selon que le robot évite l'obstacle à l'aide du potentiel rotatif ou du suivi de chemin. Ainsi, la commande de la platine comprend deux termes : le premier garantit le suivi de la cible et le deuxième compense le mouvement de contournement du robot. De cette manière, l'amer d'intérêt ne sera jamais perdu pendant la phase d'évitement, permettant de reprendre la tâche référencée vision une fois l'obstacle dépassé.

Dans cette approche, la loi de commande d'évitement $\dot{q}_{\text{coll}}$ est obtenue en concaténant les correcteurs $\dot{q}_{\text{base}}$ et ϖ_{coll} obtenus précédemment. Cette structure ne pourra donc être utilisée que dans le cadre de l'enchaînement par combinaison convexe. Notons que, par construction, $\dot{q}_{\text{coll}}$ permet de séparer les effets attractif (dus à l'asservissement visuel) et répulsifs (créés par l'évitement) et donc de supprimer les minima locaux susceptibles de se produire pendant sa seule application. Seuls restent ceux induits par l'application simultanée de $\dot{q}_{\text{av}}$ et $\dot{q}_{\text{coll}}$ lorsque $\mu_{\text{coll}} \in]0, 1[$. Cependant, l'expérience montre que si les différentes enveloppes sont correctement choisies, ce problème est très limité (nous ne l'avons que très rarement rencontré en pratique).

Commande conjointe de la base mobile et de la platine : Afin de pouvoir exploiter l'enchaînement dynamique, nous avons cherché à exprimer la tâche d'évitement dans le cadre du formalisme des fonctions de tâche. Comme nous l'avons vu précédemment, il est possible de diviser cette tâche en deux sous-tâches, l'une consistant à contourner l'obstacle, l'autre à conserver les indices visuels dans le champ de vision de la caméra. Ne disposant pas d'un nombre de degrés de liberté suffisant pour exploiter la redondance avec profit dans le cadre de l'évitement, nous avons développé deux fonctions de tâche séparées dédiées à chacun de ces objectifs. Naturellement, pour que cette approche soit viable, il faut que ces deux fonctions de tâches soient indépendantes et compatibles. Nous proposons la fonction de tâche suivante [Souères & Cadenat 2003, Folio 2007] :

$$e_{\text{coll}} = \begin{pmatrix} e_{\text{ch}} \\ e_Y \end{pmatrix} \quad (\text{V.22})$$

où $e_Y = e_{\text{pl}} = Y_{\text{cdg}}$ permet de piloter la platine pour garder la cible dans le champ de vision de la caméra. e_{ch} est quant à elle déterminée pour assurer le contournement de l'obstacle par suivi de chemin. Sa détermination s'appuie sur les résultats obtenus dans [Souères *et al.* 1998]. Le suivi de chemin était alors réalisé par la régulation à zéro d'une variable de glissement $\gamma = \delta + \kappa\alpha$ où κ est un gain scalaire non nul permettant de déterminer la vitesse relative de convergence des erreurs de position et d'orientation. Celle-ci ne permettant que de définir la vitesse angulaire ω_{coll} , nous avons de plus imposé que le robot suive l'enveloppe avec une vitesse linéaire constante $v_0 \neq 0$ prédéfinie, ce qui nécessite de réguler à zéro $e_v = l - v_0 t$ où l est l'abscisse curviligne du centre M du robot et t le temps. Ce raisonnement conduit à la fonction de tâche suivante [Souères & Cadenat 2003, Folio 2007] :

$$e_{\text{ch}} = \begin{pmatrix} e_v \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l - v_0 t \\ \delta + \kappa\alpha \end{pmatrix} \quad (\text{V.23})$$

La fonction de tâche (V.22) permet donc d'assurer la non collision tout en préservant la visibilité de l'amer d'intérêt. Elle dépend à la fois des indices visuels nécessaires au tracking du but et des données de

proximité requises pour le contournement. Il s'agit donc d'une vraie tâche référencée multi-capteurs. De plus, les trois objectifs sont indépendants et compatibles puisqu'ils agissent séparément sur les trois commandes. Sa régulation à zéro conduira donc à un mouvement cohérent du robot. Enfin, il est possible de montrer que cette fonction de tâche est admissible, son jacobien J_{coll} étant toujours inversible [Souères & Cadenat 2003]. Les techniques d'enchaînement dynamique pourront donc être exploitées. Un correcteur permettant de réguler e_{coll} à zéro (et donc de réaliser la tâche d'évitement complète) est donné par [Souères & Cadenat 2003, Folio 2007] :

$$\dot{q}_{\text{coll}} = J_{\text{coll}}^{-1} (\dot{e}_{\text{coll}}^* - B) \quad (\text{V.24})$$

où $B = (-v_0 \ 0 \ 0)^T$ et $\dot{e}_{\text{coll}}^*$ désigne la dynamique souhaitée pour faire décroître e_{coll} à zéro. Cette dynamique dépendra de la technique d'enchaînement utilisée. Si le séquençage est basé sur la combinaison convexe, une décroissance exponentielle classique de la forme $\dot{e}_{\text{coll}}^* = -\lambda_{\text{coll}} e_{\text{coll}}$ suffit. S'il s'agit d'un enchaînement dynamique alors $\dot{e}_{\text{coll}}^*$ doit être donnée par les équations (V.15) ou (V.16) (ou toute autre dynamique vérifiant les conditions mentionnées dans V.2.1.2).

V.2.1.4 Résultats de simulation et d'expérimentation

Dans cette partie, nous présentons quelques résultats de simulation et d'expérimentation démontrant l'efficacité des stratégies de commande présentées plus haut. Nous nous sommes focalisés sur les travaux les plus récents concernant la définition de la tâche référencée multicapteurs (V.22) car ils offrent la possibilité d'utiliser aussi bien l'enchaînement dynamique que le séquençage par combinaison convexe. Nous proposons donc d'abord des simulations couvrant ces deux types d'enchaînement puis quelques résultats expérimentaux.

Simulation de la tâche (V.22) La tâche de navigation considérée consiste à positionner la caméra embarquée face à un amir dans un milieu encombré de quatre obstacles de hauteur inférieure à celle de la caméra. Le premier obstacle est un muret de 1.5 m de longueur pour 50 cm de large, les autres étant de forme cylindrique et ayant un diamètre de 50 cm. Nous avons ici utilisé les deux types d'enchaînement présentés plus haut et conservé les mêmes paramètres pour chaque simulation effectuée. Les résultats correspondants sont présentés respectivement sur les figures V.7 à V.9. Comme le montrent les trajectoires obtenues pour le robot (cf. figure V.7), la tâche est correctement réalisée dans les deux cas en dépit des obstacles gênants.

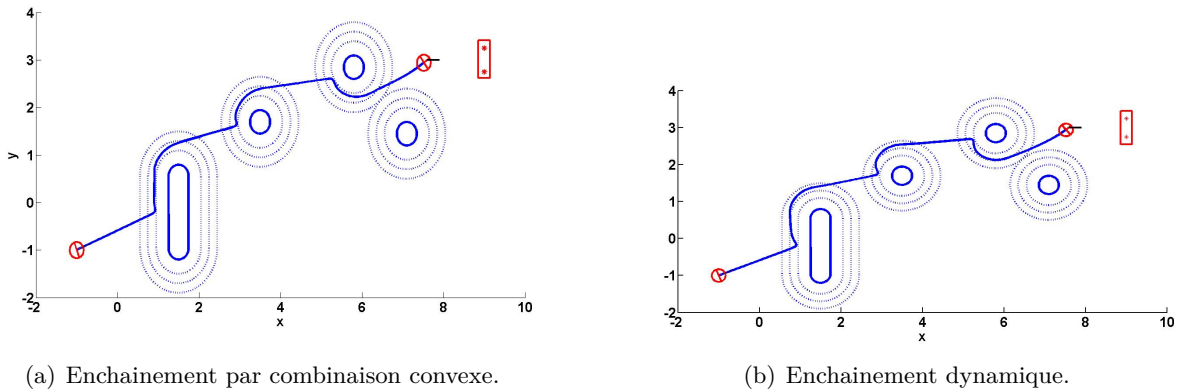


FIGURE V.7 – Trajectoire effectuée par le robot.

Initialement, le robot se trouve loin du muret. Il n'y a pas de risque de collision (le paramètre μ_{coll} est fixé à zéro) et seul l'asservissement visuel est appliqué au véhicule. Lorsque le risque de collision devient plus élevé, le paramètre μ_{coll} augmente progressivement et une combinaison convexe des deux correcteurs $\dot{q}_{\text{av}}$ et $\dot{q}_{\text{coll}}$ est appliquée au robot (cf. figure V.8). Celle-ci étant suffisante pour contourner l'obstacle, μ_{coll} n'atteint jamais la valeur 1. Une fois que le muret ne présente plus de danger, μ_{coll} diminue et l'asservissement visuel reprend à nouveau la main jusqu'au prochain obstacle rencontré ou jusqu'à ce que la tâche ait été correctement exécutée. Dans le cas de l'enchaînement dynamique, le raisonnement est très similaire, excepté que μ_{coll} varie de manière binaire, la continuité étant gérée directement au niveau du calcul de la commande suivante à appliquer. Les basculements entre les différents correcteurs peuvent facilement être visualisés sur la figure V.9.

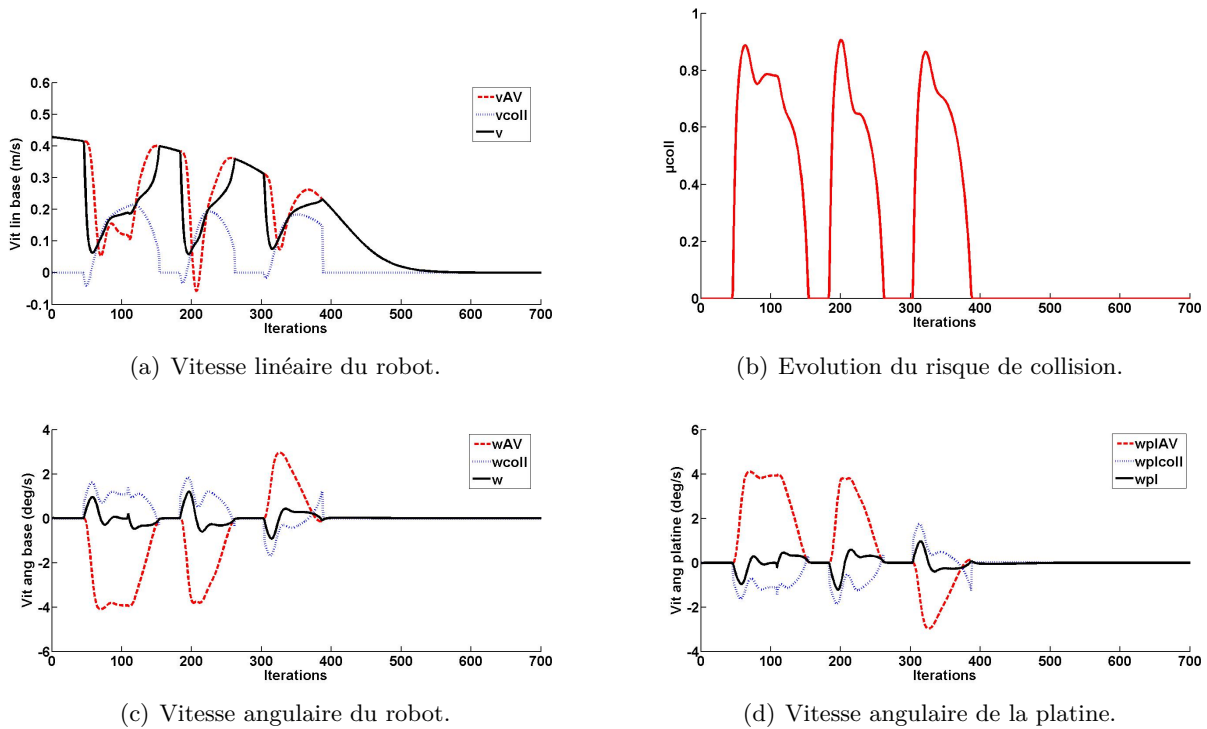


FIGURE V.8 – Evolution des commandes appliquées au robot et du risque de collision – Enchaînement par combinaison convexe.

Comparons maintenant plus précisément le comportement de chacune des techniques d'enchaînement. Pour cela, considérons les figures V.8 et V.9. Ces figures montrent que les commandes envoyées au robot restent toujours continues et acceptables pour le véhicule. On remarque, dans le cas d'un enchaînement dynamique, que l'évolution des vitesses au moment du basculement est plus abrupte que dans le cas de la combinaison convexe. Ce résultat est cohérent avec la théorie, puisque l'enchaînement dynamique ne garantit que la continuité au premier ordre et non au second. Au contraire, l'enchaînement par combinaison convexe mêlant les deux correcteurs, permet d'assurer des transitions un peu plus douces au niveau des accélérations. Ce phénomène se répercute sur les trajectoires effectuées par le robot. En effet, si l'on revient aux figures V.7(a) et V.7(b), nous pouvons constater que les rotations effectuées par le robot pour éviter l'obstacle apparaissent un peu plus violentes dans le cas de l'enchaînement dynamique. Les figures V.8 et V.9 montrant aussi à la fois les commandes calculées et les commandes appliquées, nous pouvons mieux percevoir la différence majeure entre les deux types de

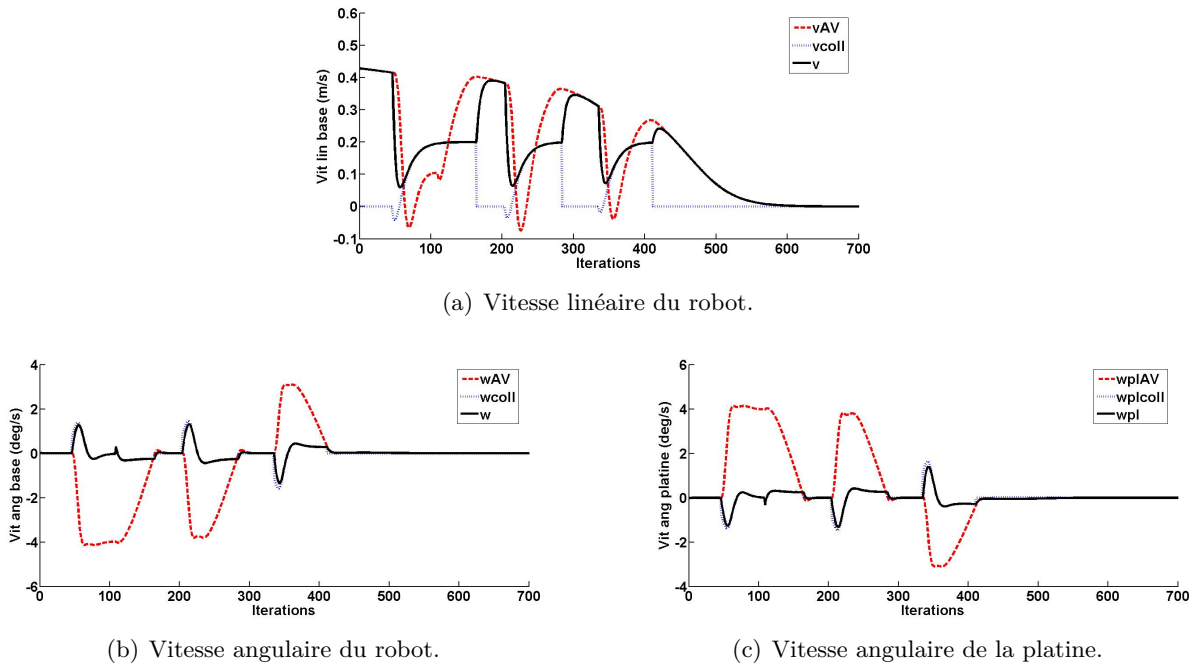


FIGURE V.9 – Evolution des vitesses angulaires de la base mobile et de la platine – Enchaînement dynamique.

séquencement. En effet, la force de l'enchaînement dynamique est de permettre d'appliquer rapidement le correcteur le mieux adapté. Nous pouvons constater qu'après un bref transitoire la vitesse appliquée au robot converge vers la valeur calculée de $\dot{q}_{av}$ ou $\dot{q}_{coll}$ selon le cas. En ce qui concerne l'autre type d'enchaînement, pendant les phases d'évitement, le paramètre μ_{coll} n'atteint jamais la valeur 1. Cela signifie qu'une combinaison convexe des deux correcteurs est appliquée pendant cette phase, ce qui peut accroître les risques de minima locaux dans certains cas.

Expérimentation Nous avons expérimenté une tâche de navigation référencée vision sur le robot Super Scout II [Folio 2003, Folio 2007]. L'objectif est de positionner la caméra face à une cible dans un environnement encombré d'un obstacle. Cet obstacle est de forme cylindrique de 25 cm de diamètre. Nous avons choisi ici d'effectuer le contournement à l'aide de la méthode des potentiels rotatifs. Le séquencement est effectué par combinaison convexe. La figure V.10 représente les trajectoires obtenues pour le robot et les indices visuels. Comme nous pouvons le constater, la tâche de navigation est correctement exécutée. De plus, l'évolution de la commande globale reste toujours continue en dépit des différents basculements effectués (cf. figure V.11). Enfin, les contraintes physiques du robot sont respectées [Folio 2007].

V.2.1.5 Conclusion

Dans cette partie, nous avons développé des lois de commande référencées multi-capteurs permettant de réaliser une tâche de navigation référencée vision dans un environnement encombré d'obstacles non occultants. Ces stratégies reposent sur le basculement entre deux correcteurs, l'un basé sur l'asservissement visuel 2D, l'autre sur des techniques de contournement d'obstacles. Nous avons proposé et brièvement comparé deux techniques garantissant la continuité des vitesses appliquées au robot au moment du basculement. Enfin, nous avons présenté des résultats de simulation et d'expérimentation

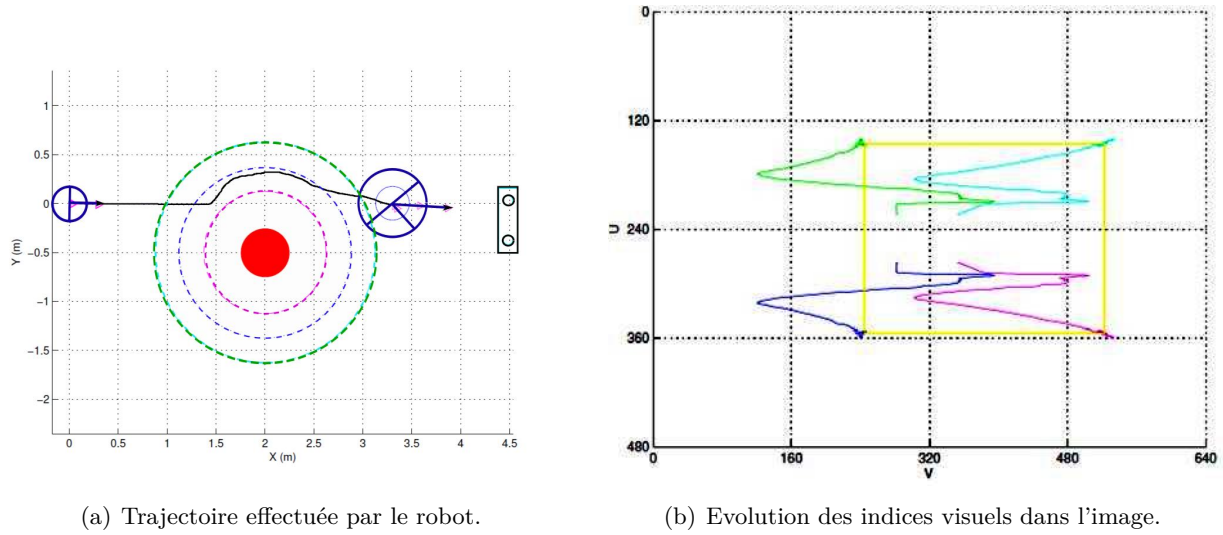


FIGURE V.10 – Asservissement visuel et évitement de collision par la méthode des potentiels rotatifs.

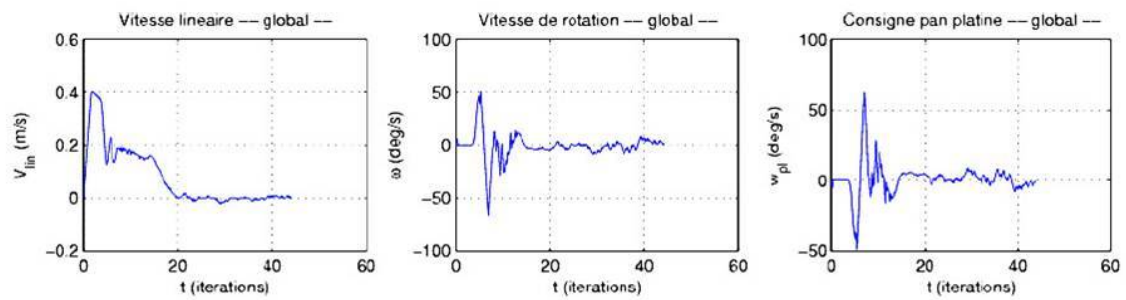


FIGURE V.11 – Evolution de la commande $\dot{q}$.

validant l'approche retenue.

Le séquençage des correcteurs permet d'étendre le domaine d'action de l'asservissement visuel 2D. Cependant, les techniques présentées sont restreintes au cas d'obstacles non occultants. Elles sont ainsi incapables de gérer une éventuelle perte du signal visuel pendant l'exécution de la mission. Nous avons aussi abordé ce problème dans le cadre de nos activités de recherche (doctorat de David Folio [Folio 2007]). Nous présentons ci-dessous les résultats obtenus.

V.2.2 Navigation par asservissement visuel en présence d'obstacles statiques occultants

Notre objectif est maintenant de prendre en compte les problèmes d'occultations susceptibles de se produire pendant la réalisation d'une tâche de navigation référencée vision dans un environnement encombré. Classiquement, *l'occultation* est vue comme un phénomène de recouvrement d'un objet par un autre. Dans le contexte de l'asservissement visuel, cela signifie qu'un objet (dans un voisinage proche ou non du robot) entre dans le champ de vision de la caméra pour venir perturber l'extraction des indices visuels. Pour notre part, nous souhaitons élargir cette définition en considérant que *toute perte du signal visuel (quelle qu'en soit sa cause) est une occultation*. Ainsi, par exemple, le fait que l'amer visuel puisse sortir du champ de vision de la caméra sera assimilé à une occultation.

De premières ébauches de gestion des occultations ont été menées principalement dans le cadre de la robotique de manipulation où, en général, le nombre de degrés de liberté est important. Par exemple, certains auteurs utilisent des techniques issues du tracking, tels que [Wunsch & Hirzinger 1997] qui proposent une méthode permettant de suivre visuellement un objet 3D tandis que les phénomènes d'occultations sont prédits et évités ; on peut également citer les travaux de A. Comport et al. qui ont développé un algorithme robuste aux changements de luminosité, aux occultations et à la perte du motif visuel [Comport et al. 2004]. Dans [Marchand & Hager 1998, Mansard & Chaumette 2005], les auteurs ont choisi d'exploiter la redondance des bras manipulateurs pour réaliser une tâche référencée vision tout en évitant les occultations. Les travaux menés dans [Mezouar & Chaumette 2002] utilisent la planification de trajectoire des indices visuels dans l'image pour à la fois éviter les occultations dues aux mouvements du bras manipulateur, et maintenir le motif dans le champ de vision de la caméra. Dans la même lignée, [Schramm & Morel 2006] ont proposé une solution analytique à la planification dans l'image du motif visuel indépendant des paramètres de calibration. [Chesi et al. 2004] proposent de basculer entre différents correcteurs pour garantir la conservation de l'amer d'intérêt dans l'image. D'autres auteurs [Malis et al. 1999, Corke & Hutchinson 2001, Kyrki et al. 2004] préservent la visibilité du motif visuel en agissant sur certains degrés de liberté, ou en contrôlant le zoom [Benhimane & Malis 2003]. Dans [Garcia-Aracil et al. 2006, Mansard et al. 2009], les auteurs modifient la tâche référencée vision nominale de manière à éliminer ou ajouter des éléments au vecteur des informations visuelles s , permettant ainsi d'enlever les données occultées de ce vecteur. [Remazeilles et al. 2006] proposent une approche dérivée de l'asservissement visuel classique : l'asservissement visuel qualitatif. La caractéristique de la loi de commande proposée réside dans le fait qu'elle conduit à faire converger les mesures visuelles non pas vers une valeur désirée s^* , mais plutôt vers un intervalle de confiance tout en tenant compte de contraintes, telles que la visibilité des informations sensorielles. Très récemment, une nouvelle approche, basée sur l'introduction progressive d'informations 2D dans un asservissement visuel 3D, a été proposée dans [Kermorgant & Chaumette 2011b] et permet de préserver la visibilité de l'amer d'intérêt.

Nos travaux se situent aux confluent de la vision et de la commande. En effet, après avoir modélisé l'occultation, nous avons développé des stratégies de commande basées sur la redondance et l'enchai-

nement de correcteur pour *éviter à la fois* les collisions et les pertes du signal visuel. Ces stratégies s'avérant trop limitées dans certains environnements hautement encombrés, nous avons proposé un algorithme de reconstruction des indices visuels. Nous avons ensuite couplé ce dernier avec les stratégies de commande déjà synthétisées. Enfin, nous avons validé ces différentes solutions en simulation et expérimentalement sur nos robots. Nous présentons l'ensemble de ces points ci-après.

V.2.2.1 Détection et modélisation de l'occultation

Dans cette partie, nous nous focalisons sur la détection et l'évaluation du risque d'occultation. Pour cela, nous nous intéressons d'abord à la projection de l'objet occultant dans l'image notée $\mathcal{O}_{occ}$. Considérons la figure V.12(a) où les vecteurs $(\vec{x}_{im}, \vec{y}_{im})$ représentent les axes du repère attaché au centre du plan image et (X_{min}, Y_{min}) et (X_{max}, Y_{max}) les bornes minimales et maximales de cette dernière.

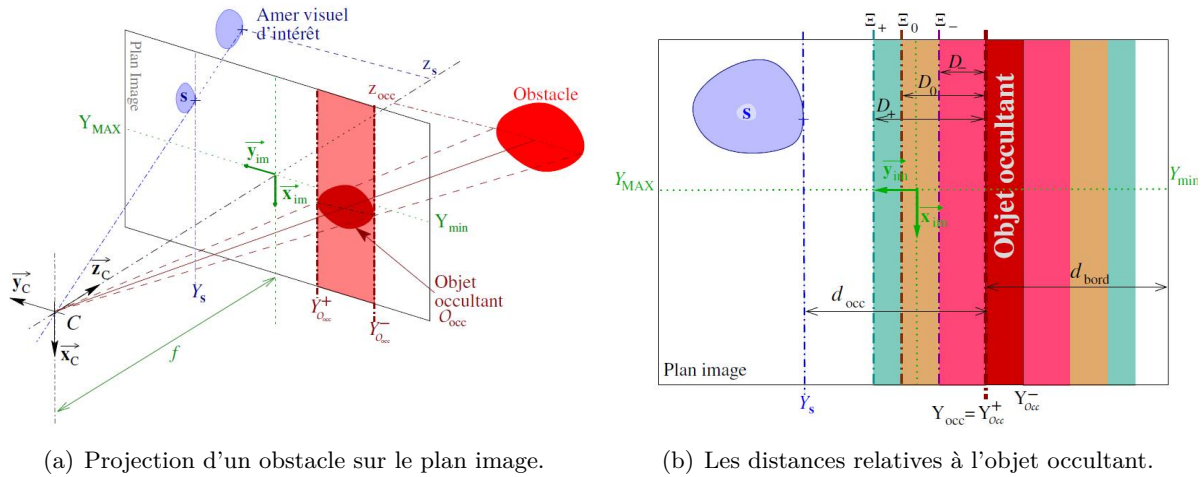


FIGURE V.12 – Caractérisation du risque d'occultation.

Nous proposons de bâtir la détection du risque d'occultation sur les mesures des quantités Y_{obs}^+ et Y_{obs}^- qui caractérisent les ordonnées des bords gauche et droit de l'objet occultant $\mathcal{O}_{occ}$. Ce choix peut apparaître dans un premier temps conservatif. Cependant, il permet d'interdire au motif visuel de passer au-dessus ou en-dessous de $\mathcal{O}_{occ}$ et donc de créer des situations de blocage similaires à des minima locaux pendant la mission [Folio 2007]. De plus, ce choix correspond bien à la structure mécanique de notre robot qui contraint la caméra à effectuer seulement des mouvements plans.

Considérons maintenant la figure V.12(b). Nous définissons par Y_{occ} le bord de l'objet occultant le plus proche du motif visuel d'intérêt (ici, $Y_{occ} = Y_{obs}^+$)⁹. Afin d'évaluer le risque d'occultation, nous suivons un raisonnement similaire à celui que nous avons mené pour la caractérisation de la collision. Nous introduisons trois enveloppes : Ξ_+ , Ξ_0 et Ξ_- . La première, située à une distance D_+ de l'objet occultant, définit la zone d'influence de ce dernier. Les deux suivantes, positionnées respectivement à des distances D_0 et D_- de ce même objet, caractérisent les zones où le risque d'occultation est important. Nous définissons de plus la distance avant occultation notée $d_{occ} = |Y_{occ} - Y_s|$ où Y_s est l'ordonnée de la composante du motif visuel s la plus proche de l'objet occultant. Enfin, nous prenons aussi en compte la distance $d_{bord} = |Y_{occ} - Y_{bord}|$ qui sépare l'objet occultant du bord de l'image. A partir de ces différentes distances, il est possible de caractériser le risque d'occultation qui est d'autant

9. S'il n'y a pas d'objet occultant dans l'image, alors Y_{occ} est fixé par rapport à l'ordonnée Y_{obs}^- ou Y_{obs}^+ du bord de l'image le plus proche de s . De cette manière, la perte du motif visuel peut également être traitée comme une occultation.

plus élevé que la distance d_{occ} est faible. Comme pour la collision, ce risque sera défini par un paramètre μ_{occ} dépendant de cette distance et variant entre 0 (risque nul : $\mathcal{O}_{occ}$ se situe hors de l'enveloppe Ξ_0) et 1 (risque élevé : $\mathcal{O}_{occ}$ a franchi Ξ_0). Nous revenons sur ce point ci-dessous.

V.2.2.2 Stratégies de commande pour l'évitement conjoint d'occultations et de collisions

Nous avons développé différentes stratégies de commande. La première approche proposée dans [Folio & Cadenat 2005b] consistait à basculer entre deux correcteurs, l'un réalisant l'asservissement visuel et l'autre gérant **simultanément** les problèmes de collision et d'occultation. Ce dernier a été bâti en exploitant la redondance, bien que peu de degrés de liberté soient disponibles sur notre système robotique. L'évitement d'occultation a ainsi été défini comme une tâche principale et le contournement des obstacles comme une tâche secondaire. Cependant, avec cette solution, il est clair que la non collision ne peut être réalisée qu'au mieux, ce qui n'est pas acceptable d'un point de vue sécurité. De plus, elle ne permet de traiter qu'un risque d'occultation survenant pendant une phase d'évitement, alors que ce n'est pas forcément toujours le cas. En effet, deux possibilités existent [Folio 2007] :

- ▷ Un risque d'occultation peut se produire seul : en effet, un obstacle peut être détecté dans l'image bien avant de devenir dangereux pour la base mobile. La présence d'un objet occultant dans l'image n'implique donc pas forcément qu'un risque de collision se présente (cf. figure V.13(c)).
- ▷ Un risque d'occultation peut survenir en même temps qu'un danger de collision. Cependant, le robot peut rencontrer deux situations différentes :
 - soit le même obstacle génère un danger de collision et d'occultation (cf. figure V.13(a)) ;
 - soit les risques de collision et d'occultation sont générés par deux obstacles distincts. Le phénomène d'occultation n'est par conséquent pas forcément lié à l'obstacle que le robot est en train de contourner (cf. figure V.13(b))

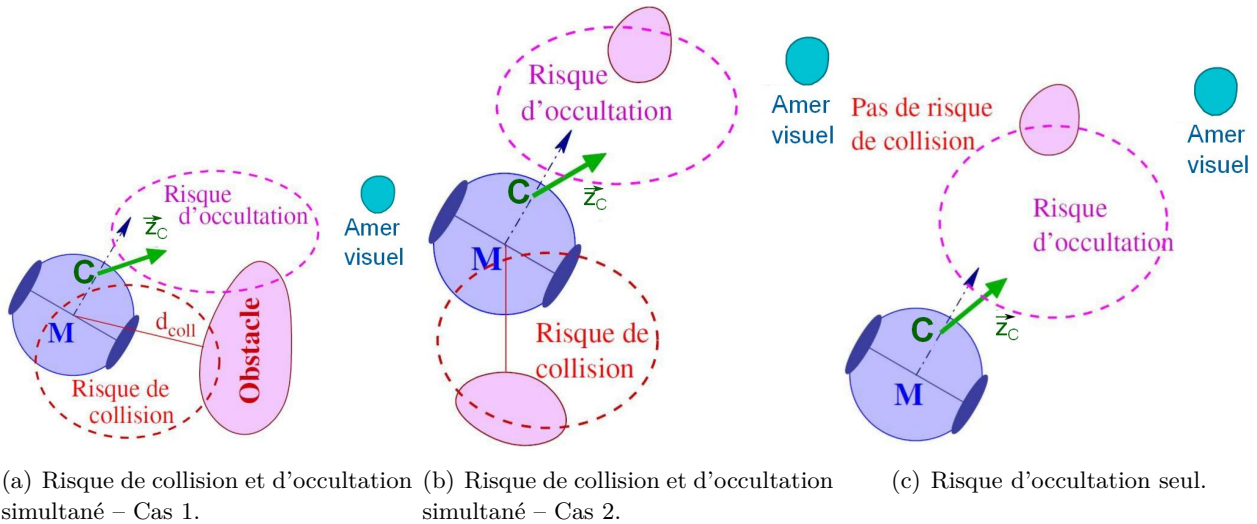


FIGURE V.13 – Différents risques d'occultation.

Dans ces conditions, il est clair que la première stratégie mentionnée ne répond que partiellement au problème posé. Nous avons donc proposé une seconde stratégie basée sur l'enchaînement de trois correcteurs dédiés respectivement à l'asservissement visuel seul $\dot{q}_{av}$, à l'évitement conjoint d'obstacle et d'occultation $\dot{q}_{co}$ et à l'évitement d'occultation seul $\dot{q}_{occ}$ [Folio & Cadenat 2005a, Folio & Cadenat 2006, Folio 2007]. Cette stratégie est ainsi capable de gérer les problèmes de collision

et d'occultation qui se produisent de manière simultanée ou bien indépendante. Elle a de plus été conçue pour donner la priorité à l'évitement de collision devant l'évitement d'occultation afin de garantir la sécurité des biens et des personnes. Ce raisonnement a conduit à la loi de commande suivante [Folio & Cadenat 2005a, Folio & Cadenat 2006, Folio 2007] :

$$\dot{q} = (1 - \mu_{\text{coll}}) ((1 - \mu_{\text{occ}})\dot{q}_{\text{av}} + \mu_{\text{occ}}\dot{q}_{\text{occ}}) + \mu_{\text{coll}}\dot{q}_{\text{co}} \quad (\text{V.25})$$

où μ_{coll} et μ_{occ} évoluent entre 0 et 1 soit de manière binaire, soit de manière continue selon la technique d'enchaînement considérée. Le lecteur intéressé trouvera dans [Folio 2007] différents choix possibles pour définir l'évolution de ce paramètre dans le second cas. Nous rappelons qu'une analyse comparative de ces deux méthodes de basculement a été réalisée précisément pour cette application dans [Cadenat *et al.* 2012]. Le lecteur intéressé est invité à se référer à la table V.1 pour un bref rappel des résultats de cette dernière.

Il reste maintenant à synthétiser les correcteurs $\dot{q}_{\text{occ}}$ et $\dot{q}_{\text{co}}$. Pour cela, nous avons exploité le formalisme des tâches redondantes [Samson *et al.* 1991] et défini deux fonctions de tâches e_{co} et e_{occ} . La première assure la gestion conjointe des occultations et des collisions dans le voisinage des obstacles, avec comme impératif de garantir la sécurité du robot. Le rôle de la seconde est de contrôler la non occultation du motif visuel lorsqu'il n'y a pas de risque de collision. Le lecteur intéressé trouvera les expressions de ces deux fonctions de tâche dans [Folio & Cadenat 2005a, Folio & Cadenat 2006, Folio 2007]. Afin de les annuler, nous avons proposé les lois de commande suivantes [Folio 2007, Cadenat *et al.* 2012] :

$$\dot{q}_{\text{co}} = \dot{e}_{\text{co}}^* \quad (\text{V.26a})$$

$$\dot{q}_{\text{occ}} = \dot{e}_{\text{occ}}^* \quad (\text{V.26b})$$

où $\dot{e}_{\text{co}}^*$ et $\dot{e}_{\text{occ}}^*$ sont les dynamiques choisies pour les réguler à zéro. Elles sont respectivement données par $-\lambda_{\text{co}}e_{\text{co}}$ et $-\lambda_{\text{occ}}e_{\text{occ}}$ pour un enchaînement par combinaison convexe. Pour un séquençement dynamique, elles sont déterminées par les relations (V.15) ou (V.16).

Nous présentons maintenant quelques résultats de simulation et d'expérimentation afin de valider l'approche proposée. Nous mettrons ensuite en évidence ses limites.

Résultats de simulation La tâche de navigation considérée consiste à positionner la caméra embarquée par rapport à un amers de l'environnement, en dépit de deux murs, l'un d'entre eux étant susceptible de générer une occultation. Nous avons ici utilisé les deux types d'enchaînement présentés plus haut et conservé les mêmes paramètres de simulation pour chaque simulation effectuée. Les résultats obtenus¹⁰ sont présentés sur les figures V.14 et V.15.

Comme nous pouvons le constater, dans les deux cas, la tâche est correctement réalisée, grâce aux basculements effectués entre les trois correcteurs en fonction des risques de collision et d'occultation μ_{coll} et μ_{occ} . Les commandes restent continues, démontrant l'efficacité des techniques d'enchaînement considérées. Nous retrouvons ici les avantages et inconvénients de chacune de ces techniques que nous avons déjà pointés lors de l'évitement d'obstacle simple.

Résultats expérimentaux Nous avons expérimenté la stratégie de commande (V.25) sur le robot Super-Scout II [Folio & Cadenat 2006]. L'objectif de la mission est de positionner la caméra face à une cible constituée de points. L'environnement est encombré de deux obstacles cylindriques : le premier n'occasionne qu'un danger de collision, le second générant essentiellement un risque d'occultation. Les résultats obtenus sont présentés sur les figures V.16 et V.17.

10. Afin de ne pas surcharger les résultats, nous nous contentons de proposer ici la trajectoire effectuée par le robot et l'évolution des vitesses linéaire et angulaire de la base mobile.

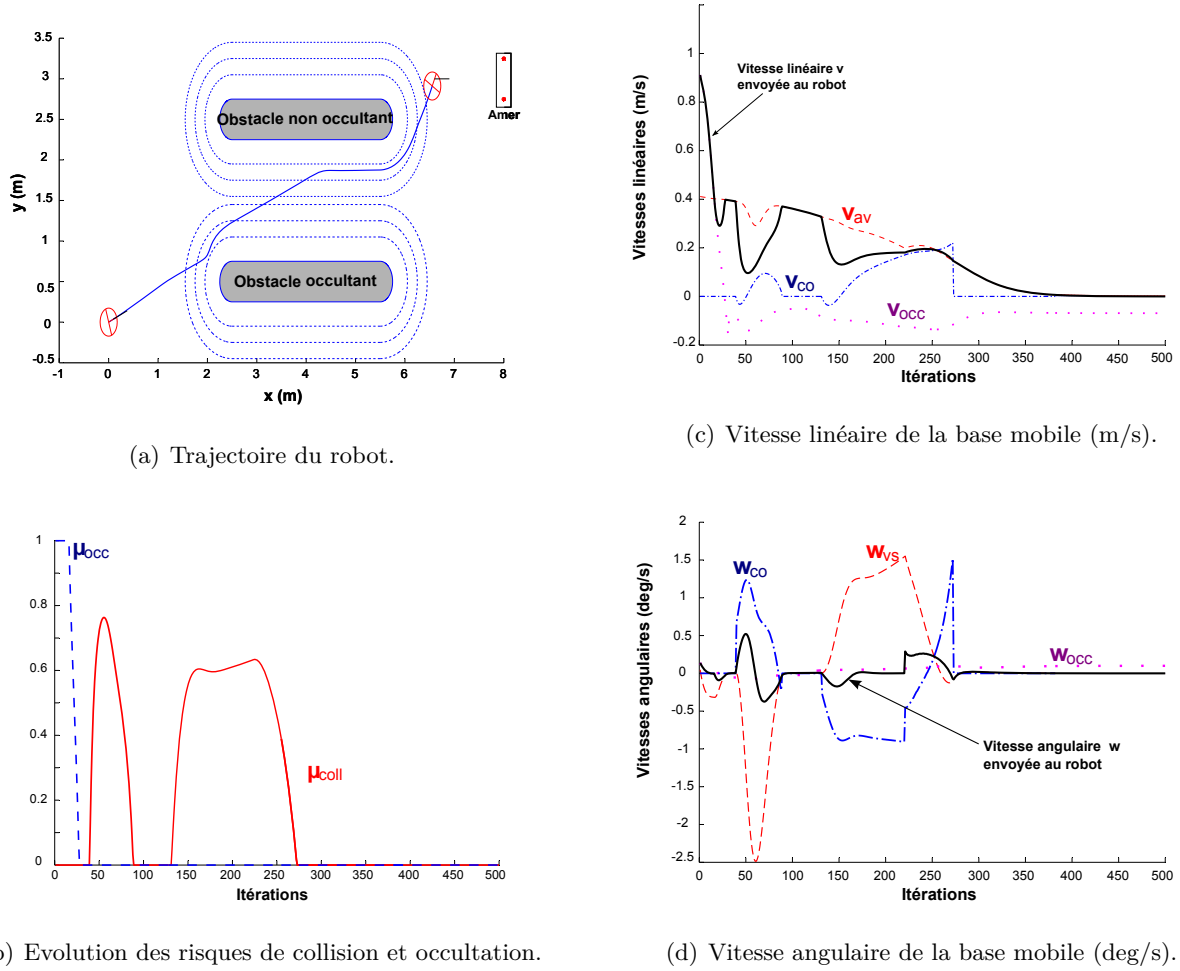
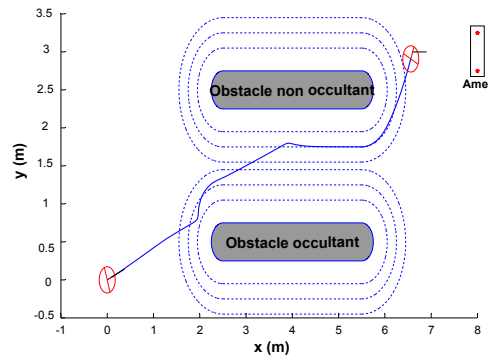


FIGURE V.14 – Enchainement par combinaison convexe.

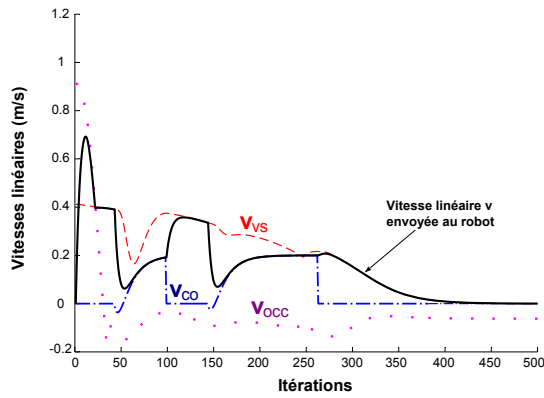
Comme nous pouvons le constater, la tâche est correctement réalisée en dépit des deux obstacles présents dans l'environnement. La position de ces derniers a été choisie de telle sorte que deux risques d'occultation successifs soient générés : l'un qui se produit pendant que le robot contourne l'obstacle, l'autre intervenant alors que tout danger de collision est écarté (cf. figures V.17(a) et V.17(b)). Il est ainsi possible de tester les trois correcteurs $\dot{q}_{av}$, $\dot{q}_{co}$ et $\dot{q}_{occ}$ et de vérifier que les basculements sont réalisés correctement.

Conclusion Dans cette partie, nous avons proposé une stratégie de commande référencée multi-capteurs permettant d'éviter les collisions et les occultations. Elle est basée sur la définition de trois correcteurs dédiés respectivement à l'asservissement visuel, la gestion simultanée de la perte du signal visuel et des obstacles et l'évitement d'occultation seul. Elle repose de plus sur deux techniques qui permettent d'enchaîner ces correcteurs en préservant la continuité de la commande appliquée au robot. Nous avons analysé et comparé ces deux techniques, mettant en évidence leurs avantages et inconvénients respectifs.

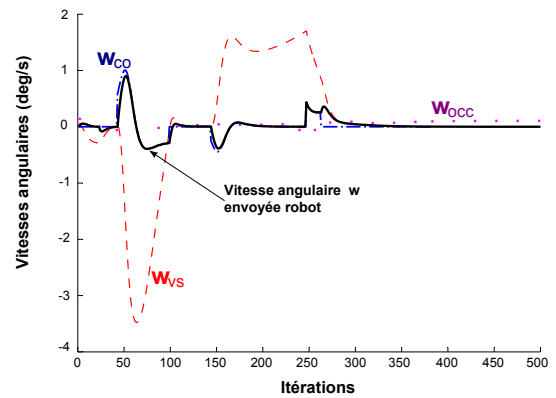
Cependant, quelle que soit la technique d'enchaînement adoptée, il apparaît clairement que chercher à éviter à tout prix les occultations **et** les collisions n'est pas forcément la stratégie la plus pertinente. En effet, l'ajout de l'évitement des occultations en plus des contraintes de sécurité sur-contraint la



(a) Trajectoire du robot.



(b) Vitesse linéaire de la base mobile (m/s).



(c) Vitesse angulaire de la base mobile (deg/s).

FIGURE V.15 – Enchainement dynamique.

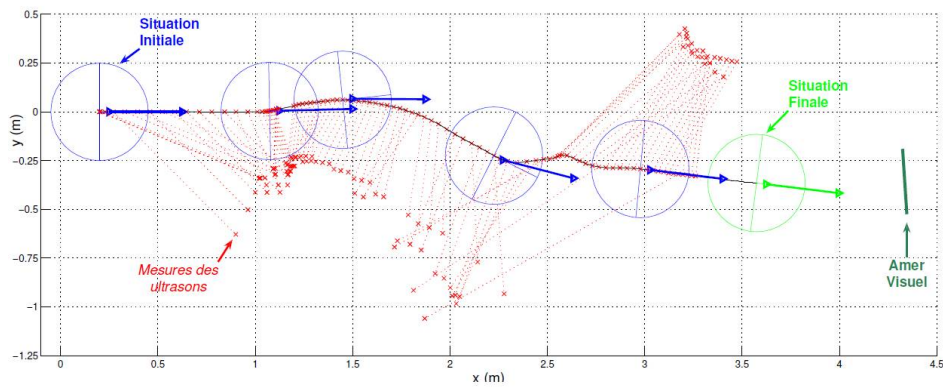


FIGURE V.16 – Trajectoire effectuée par le robot.

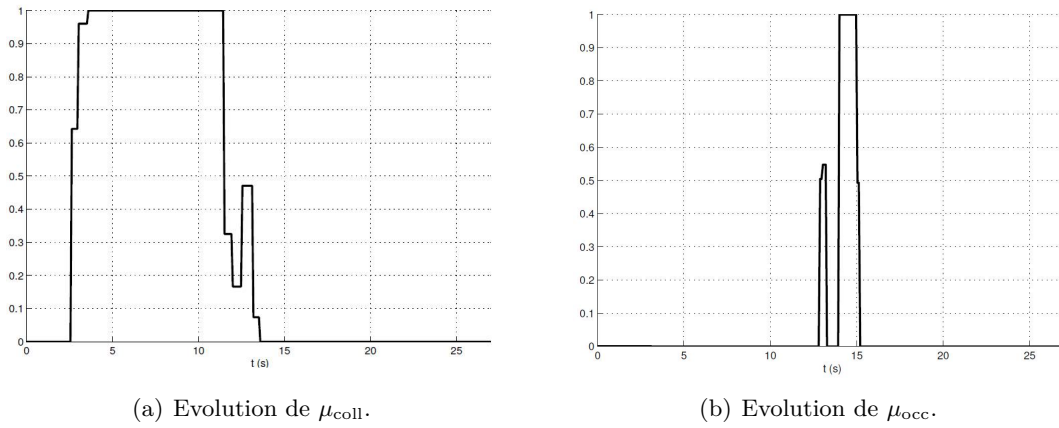


FIGURE V.17 – Evolution des risques de collision et d'occultation.

tâche robotique et réduit le nombre de trajectoires permettant d'atteindre le but. Ce phénomène est d'autant plus marqué que l'environnement est encombré ou que les positions de l'amer de référence, des obstacles occultants et non occultants limitent les solutions de navigation possibles. Considérons par exemple le cas représenté sur la figure V.18. Seuls deux obstacles sont présents dans la scène considérée, un muret de hauteur inférieure à celle de la caméra et un cylindre susceptible d'occulter le motif visuel. Bien que l'environnement ne soit pas excessivement contraint, nous pouvons constater que le robot ne parvient pas à réaliser la tâche de navigation. En effet, le contournement par le haut étant interdit, il n'existe pas de trajectoire évitant à la fois les collisions et les occultations. C'est ainsi que le véhicule s'arrête lorsque l'amer de référence est masqué par l'obstacle cylindrique. Ce type de stratégie apparaît donc clairement limité. Afin d'aller plus loin et d'élargir la gamme de missions réalisables, il est nécessaire de tolérer la perte de tout ou partie du motif visuel d'intérêt.

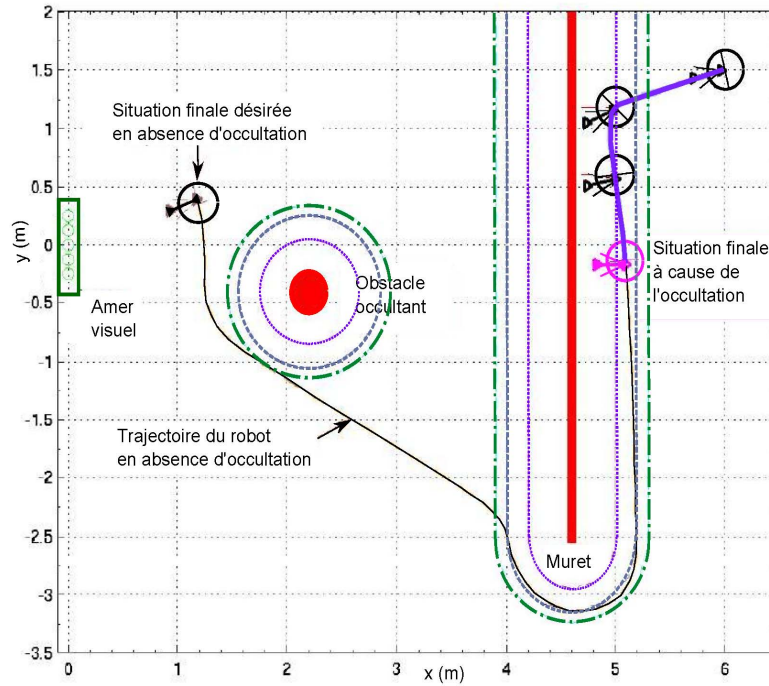


FIGURE V.18 – Cas d'échec : trajectoire effectuée par le robot.

V.2.2.3 Une solution pour la tolérance des occultations pendant la tâche référencée vision

Comme nous venons de le montrer, certaines tâches robotiques ne peuvent être réalisées qu'au prix d'une perte temporaire du signal visuel. C'est pourquoi, nous cherchons ici à développer des méthodes permettant de reconstruire les indices visuels lorsque ceux-ci sont indisponibles puis à les coupler avec nos stratégies de commande. De cette manière, il sera possible de réaliser une tâche de navigation référencée vision en tolérant les pertes partielles ou totales du motif d'intérêt.

Nous présentons d'abord les algorithmes de reconstruction que nous avons développés avant de montrer comment nous les avons couplés à nos stratégies de commande. Ensuite, nous proposons quelques résultats obtenus en simulation et lors d'expérimentations menées sur le Super Scout II.

Algorithmes de reconstruction des indices visuels Comme nous l'avons vu plus haut, nous cherchons à traiter des pertes partielles ou totales du motif visuel. Cela signifie donc que nous supposons qu'à un moment donné, l'image entière peut devenir temporairement inaccessible suite à une occultation ou toute autre raison (défiance du système de vision, utilisation de la caméra pour une autre tâche, etc.). Notre objectif sera ici de proposer un algorithme permettant de reconstruire les indices visuels manquants suffisamment rapidement pour pouvoir les utiliser dans la boucle de commande. Cette contrainte de temps étant forte, elle guidera les choix que nous avons effectués pour construire notre algorithme.

La littérature propose différentes approches. Il est possible d'utiliser des solutions issues du tracking qui cherchent à suivre un motif de manière robuste aux occultations totales [Favaro & Soatto 2003, Lepetit & Fua 2006]. Cependant, elles nécessitent des mesures prélevées dans l'image qui est considérée indisponible ici. Il est aussi envisageable d'utiliser un modèle 2D ou 3D de l'objet d'intérêt et d'exploiter la géométrie projective pour retrouver les données manquantes. Ce choix conduit cependant à localiser le robot par rapport à l'amer et requiert une connaissance a priori forte sur l'environnement, ce que nous ne souhaitons pas. C'est pourquoi, nous nous sommes orientés vers des solutions issues de l'automatique et plus particulièrement vers les approches permettant de reconstruire l'état d'un système. La littérature les classe généralement en deux grandes catégories orientées respectivement vers l'utilisation du modèle d'état si des conditions initiales sont disponibles, ou bien vers l'utilisation d'un observateur ou d'un filtre (Kalman, filtrage particulaire, etc.) dans le cas contraire. Pour notre part, nous avons opté pour la première solution : nous proposons ainsi d'intégrer le « lien vision/mouvement » défini par la matrice d'interaction $\mathcal{L}$ à partir d'un historique des indices visuels et des mouvements de la caméra définis par son torseur cinématique. Ainsi, nous utiliserons la dernière image obtenue avant occultation comme une condition initiale pour notre algorithme.

Avant de détailler notre approche, nous rappelons quelques hypothèses. Tout d'abord, nous considérons un amer fixe caractérisé par des indices visuels s de profondeur z . Ensuite, nous supposons que la caméra est embarquée sur le robot et que seul un mouvement de cette dernière T_c peut faire évoluer s . L'évolution des indices visuels peut alors être modélisée à l'aide du système dynamique $\dot{s} = \mathcal{L}(s, z)T_c$. Afin que notre algorithme puisse être utilisé, il est nécessaire de disposer de conditions initiales. Pour cela, l'image doit pouvoir être extraite au moins une fois au début de la tâche. Enfin, nous supposons dans cette partie que nous travaillons en contexte non bruité. Nous relâcherons cette hypothèse dans la partie V.3.1.

La modélisation du problème de reconstruction dans un cas général n'est pas aisée. En effet, elle dépend du type d'indice visuel considéré et du système robotique portant la caméra. Afin de proposer des solutions génériques à ce problème, nous nous sommes placés dans le cas d'indices visuels

quelconques et d'une caméra disposant de six degrés de liberté¹¹. Nous avons basé notre réflexion sur le lien vision/mouvement défini par la relation $\dot{s} = \mathcal{L}(s, z)T_c$. S'il est bien connu que le mouvement des indices visuels dans l'image est caractérisé par cette relation, l'intégration de ce système dynamique requiert de pouvoir calculer tous les paramètres intervenant dans la matrice d'interaction $\mathcal{L}(s, z)$ et en particulier la profondeur z des indices visuels. Différents cas peuvent se produire [Folio 2007] :

1. la profondeur z intervient explicitement dans $\mathcal{L}$ et il est possible d'exprimer $\dot{z}$ en fonction de T_c et des indices visuels considérés, soit une relation de la forme : $\dot{z} = \mathcal{L}_z(s, z)T_c$. Il suffit dès lors d'intégrer conjointement $\dot{s}$ et $\dot{z}$. C'est le cas des primitives de type point. En effet, pour un point 3D fixe p de coordonnées (x_p, y_p, z_p) dans $\mathcal{R}_C$ projeté dans l'image en un point 2D $P(X_P, Y_P)$, il est facile de montrer que $\mathcal{L}_z$ s'écrit [Chaumette 1990, Folio 2007] :

$$\mathcal{L}_z = \mathcal{L}_z(P, z_p) = \begin{cases} \begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -\frac{z_p Y_P}{f} & \frac{z_p X_P}{f} & 0 \end{pmatrix} & \text{pour une caméra à six degrés de liberté} \\ \begin{pmatrix} 0 & -1 & -\frac{z_p Y_P}{f} \end{pmatrix} & \text{pour notre système robotique} \end{cases} \quad (\text{V.27})$$

Ainsi, reconstruire les coordonnées d'un point reviendra à intégrer le système suivant [Folio 2007] :

$$\dot{\Psi}_P = \begin{pmatrix} \mathcal{L}_P \\ \mathcal{L}_z \end{pmatrix} T_c = \mathcal{L}_{\Psi_P} T_c \quad (\text{V.28})$$

où $\Psi_P = (X_P, Y_P, z_p)^T$ et $\mathcal{L}_P$ est donné par l'équation (V.5).

2. la profondeur z intervient implicitement dans $\mathcal{L}$ par le biais de paramètres que l'on notera ici A_{pq} [Folio 2007]. Nous devons alors intégrer le système $\dot{s} = \mathcal{L}(s, A_{pq})T_c$. La résolution de ce système dynamique requiert de déterminer ces paramètres. Comme il est difficile d'exprimer leur dérivée $\dot{A}_{pq}$, nous avons opté pour un algorithme de reconstruction en deux étapes [Folio 2007] :

- (a) Détermination des paramètres A_{pq} à partir de l points.
- (b) Résolution de $\dot{s} = \mathcal{L}(s, A_{pq})T_c$, une fois les paramètres A_{pq} calculés.

Ce cas regroupe toutes les primitives géométriques usuelles autres que le point (droites, etc.) [Folio 2007].

3. Il est parfois difficile de déterminer tous les paramètres intervenant dans la matrice d'interaction. C'est notamment le cas des moments de l'image [Folio 2007]. Nous proposons alors d'exploiter les résultats obtenus ci-dessus et de reconstruire les indices visuels considérés à partir de points (cas n° 1) ou éventuellement de primitives géométriques (cas n° 2).

Nous avons donc montré que la reconstruction des indices visuels peut se ramener à la résolution d'un système dynamique de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{\chi}(t) = \mathcal{L}_\chi T_c = F(\chi, t) \text{ avec } t_0 \leq t \leq t_{\text{fin}} \\ \chi_0 = \chi(t_0) \end{cases} \quad (\text{V.29})$$

où l'expression de χ dépend du cas considéré. t_0 et t_{fin} désignent les instants initial et final de la tâche considérée, χ_0 représentant les conditions initiales nécessaires à l'intégration. Cependant, la résolution directe de ce système entre t_0 et t_{fin} s'avère difficile dans un cas général. C'est pourquoi, nous avons choisi d'intégrer ces équations sur la période d'échantillonnage de l'asservissement T_e . Il s'agit donc pour nous de résoudre le système (V.29) pour tout t appartenant à l'intervalle $[t_k, t_{k+1}]$ avec

11. Le torseur cinématique T_c sera donc défini jusqu'à mention contraire par un vecteur de dimension 6.

$t_k = t_0 + kT_e$, en prenant comme conditions initiales $\chi_k = \chi(t_k)$. Nous considérons donc finalement le problème suivant :

$$\begin{cases} \dot{\chi}(t) = \mathcal{L}_\chi T_c = F(\chi, t) \text{ avec } t_k \leq t \leq t_{k+1} \\ \chi_k = \chi(t_k) \end{cases} \quad (\text{V.30})$$

Le vecteur χ_k est défini par le motif visuel $s_k = s(t_k)$ complété par les données nécessaires (la profondeur z_k ou les paramètres A_{pq} selon le cas considéré). Ces informations devront être disponibles à l'instant t_k afin que l'intégration puisse être réalisée. Le vecteur s_k sera ainsi extrait de l'image fournie par la caméra à t_k . La profondeur quant à elle est pour l'instant supposée connue. Nous relâcherons cette hypothèse dans la partie V.3.1.

Remarque 6 *Il est important de noter ici que la précision des conditions initiales aura une influence significative sur la qualité de la reconstruction du signal visuel. En effet, le processus de détermination des indices étant basé sur une intégration à partir d'un modèle et d'un historique de données, une erreur commise sur les conditions initiales ne pourra pas être compensée (du moins tant qu'aucune image ne sera disponible). Elle risque de se propager et de remettre en cause la qualité de la reconstruction. Il est donc important de fournir à nos algorithmes des conditions initiales correctes. De plus, pour cette même raison, les solutions proposées sont bien adaptées à des occultations de durée limitée, ce qui correspond bien à notre cas.*

Nous nous intéressons maintenant à la résolution du système dynamique (V.30). Ce système dépend de la nature des primitives visuelles considérées, des matrices d'interaction associées et de la structure mécanique du robot. Afin de conserver ce cadre général, nous avons dans un premier temps proposé de résoudre le problème à l'aide de différentes techniques d'intégration numérique. En effet, l'emploi de ces techniques est envisageable, dès lors qu'une formulation analytique de $F(\chi, t)$ et qu'un historique des valeurs successives de χ sont disponibles. Il est alors possible de résoudre notre système dynamique **quelles que soient les primitives visuelles et l'architecture du système robotique portant la caméra**. La difficulté majeure réside donc plutôt dans la modélisation du problème que dans sa résolution qui peut être effectuée par des algorithmes numériques classiques. En effet, nous avons exploité uniquement des schémas bien connus de la littérature dédiée à la résolution numérique d'équations différentielles ordinaires. Nous nous sommes plus particulièrement focalisés sur deux algorithmes à pas simple (schémas d'Euler et de Runge-Kutta (4^{ème} ordre)) et deux méthodes à pas multiples (algorithme d'Adams-Bashforth-Moulton (ABM) et formule de Gear (ou Backward Differential Formulas (BDF))) dont les principes sont rappelés dans [Folio 2007]. Ces schémas fournissent une estimation χ_{k+1} à partir d'un historique de valeurs précédentes de χ et en supposant le torseur cinématique T_c constant ou variable sur $[t_k, t_{k+1}]$. Dans le premier cas, une seule évaluation de T_c à l'instant t_k intervient dans le calcul de $F(\chi, t)$; dans le second, il est nécessaire de sous-échantillonner l'intervalle précédent en n sous-intervalles $[t_n, t_{n+1}]$ sur lesquels T_c est considéré constant. Le torseur doit alors être déterminé à chaque instant t_n , ce qui passe par la prise en compte explicite de la jacobienne du robot $J(q(t_n))$ à cet instant. Ainsi, le premier cas fait totalement abstraction de la structure mécanique du robot. Cependant, le résultat obtenu repose sur l'hypothèse que le torseur cinématique est constant sur $[t_k, t_{k+1}]$. Cette première approximation n'est réellement satisfaisante que pour de faibles valeurs de T_e , et dans les situations où la dynamique du système porteur de la caméra n'est pas trop importante. La seconde approche proposée permet de s'affranchir de cet inconvénient en prenant en compte la variabilité de T_c sur $[t_k, t_{k+1}]$. Elle conduira donc généralement à de meilleurs résultats que la première. De plus, elle reste valable quelle que soit l'architecture du système robotique porteur puisque le système dynamique à résoudre reste exprimé en fonction du torseur cinématique [Folio 2007].

Nous proposons ci-après quelques résultats expérimentaux montrant l'efficacité de ces schémas et permettant de les comparer. Ceux-ci ont été obtenus sur le super-scout II. Pour chaque schéma numérique, le robot effectue la même tâche référencée vision consistant à se positionner vis-à-vis d'une cible composée de quatre points. La tâche est tout d'abord réalisée de manière classique, puis, après 10 itérations, une personne vient occulter l'amer d'intérêt. Malgré la perte du signal visuel, la caméra parvient à atteindre un voisinage de la situation finale désirée (cf. figure V.19). La tâche est correctement réalisée, démontrant la validité de notre approche dans des conditions expérimentales réelles. La table V.2 récapitule les erreurs obtenues pour chaque algorithme. Ces erreurs sont assez

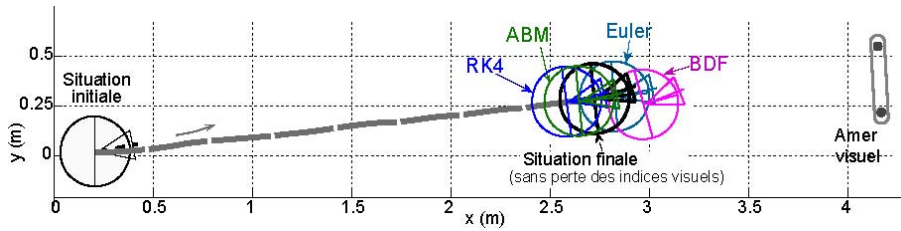


FIGURE V.19 – Reconstruction des indices visuels : trajectoire effectuée par le robot.

faibles quelle que soit la méthode considérée, ce qui signifie que le système n'a été que peu perturbé pendant l'exécution de la mission.

Schémas	s / z	Erreur moyenne	Ecart type	Erreur maximale
Euler	s (pix)	0.87	1.54	9.68
	z (m)	0.0706	0.13618	0.7232
RK4	s (pix)	0.79	1.19	7.02
	z (m)	0.0496	0.087037	0.44495
ABM	s (pix)	1.37	1.36	5.92
	z (m)	0.0224	0.0235	0.0935
Gear (ou BDF)	s (pix)	2.17	1.89	7.69
	z (m)	0.0234	0.0271	0.1184

TABLE V.2 – Erreurs obtenues.

Le schéma ABM apparaît comme la technique la plus efficace pour la tâche considérée, l'algorithme de Runge Kutta (RK4) et la formule de Gear (ou BDF) offrant tous deux de bonnes performances. Comme l'on pouvait s'y attendre, de par son principe, le schéma d'Euler est le moins précis. On notera néanmoins que la formule de Gear convient bien aux problèmes dits « raides » où la dynamique du système à intégrer varie rapidement. Il sera donc particulièrement bien adapté lorsque des évitements d'obstacles occultants seront à réaliser comme nous le verrons par la suite. Des résultats complémentaires montrant la reconstruction d'autres types d'indices visuels sont proposés dans [Folio 2007].

Les solutions proposées plus haut présentent l'avantage de la généricité puisqu'elles sont adaptables à tout type d'indice visuel et de systèmes robotiques. C'est d'ailleurs leur grande force. Par contre, elles ne permettent d'obtenir qu'une solution numérique approchée au problème, la qualité de la reconstruction dépendant essentiellement du schéma utilisé. Nous avons donc voulu étudier la possibilité de résoudre exactement le système (V.30). Pour cela, il est nécessaire de produire une solution analytique, ce qui ne peut se faire sans se focaliser sur un type de primitive visuelle. Nous avons alors choisi de nous intéresser au cas des points car, comme nous l'avons vu plus haut, ces derniers permettent

d'aider à la reconstruction de primitives plus complexes. Dans le cas d'un point, χ devient égal à Ψ_P et le système différentiel (V.30) se ré-écrit sous la forme (V.28). Notre objectif est donc ici de résoudre analytiquement ce système sur l'intervalle $[t_k, t_{k+1}]$. Trois grandes méthodes ont été élaborées selon que l'on considère [Folio 2007] :

- **le torseur T_c constant sur $[t_k, t_{k+1}]$** : nous retrouvons ici le cas où l'on néglige toute variation de T_c sur cet intervalle, approximation qui ne peut être valide que si T_e est faible et si la dynamique de mouvement de la caméra n'est pas trop élevée. L'intégration analytique du système (V.28) conduit à quatre solutions dépendant des vitesses de la caméra à l'instant t_k dont les expressions sont données dans [Folio 2007, Folio & Cadenat 2008c]. Il est ainsi possible de déduire la position et la profondeur du point P pour tout $t \in [t_k, t_{k+1}]$, et ceci quel que soit le système robotique portant la caméra. On bénéficie ainsi de la précision de la solution analytique alliée à la généralité.
- **le torseur T_c variable par morceaux sur $[t_k, t_{k+1}]$** : dans ce cas, comme précédemment, on sous-échantillonne l'intervalle $[t_k, t_{k+1}]$ en n sous-intervalles $[t_n, t_{n+1}]$ de largeur T_n . La résolution du système dynamique est alors réalisée en supposant que le torseur est constant sur chacun de ces sous-intervalles. Celui-ci doit pouvoir être évalué à chaque instant t_n , ce qui nécessite de calculer la jacobienne du robot $J(q)$ et donc la configuration q à chacun de ces instants. Pour cela, nous avons simplement intégré la relation $\dot{q}(t) = \dot{q}_k$ entre t_k et t , ce qui conduit à $q(t) = (t - t_k)\dot{q}_k + q_k$. Les valeurs $q_k = q(t_k)$ étant généralement fournies par les capteurs proprioceptifs, il est possible de déterminer la configuration et donc la jacobienne à tout instant t_n . Il suffit alors d'utiliser les expressions ci-dessus pour chaque instant $t_n \in [t_k, t_{k+1}]$ pour obtenir la valeur de $\Psi_P(t_{k+1})$. Cette méthode présente l'avantage de rester indépendante du robot porteur tout en permettant une première prise en compte de sa variation sur l'intervalle de commande. Elle apparaît donc plus proche de la réalité et permet d'améliorer la précision de la reconstruction tout en préservant la généralité.
- **le torseur T_c pleinement variable sur $[t_k, t_{k+1}]$** : ici, nous considérons pleinement l'évolution de T_c sur cet intervalle. Nous devons donc prendre en compte explicitement l'architecture mécanique du robot porteur dans la détermination de Ψ_P . Pour cela, nous ré-écrivons le système (V.28) comme suit :

$$\dot{\Psi}_P = \mathcal{L}_{\Psi_P} T_c = \mathcal{L}_{\Psi_P} J \dot{q} \quad (\text{V.31})$$

où J est la jacobienne de notre ensemble robotique et $\dot{q} = (v \ \omega \ \varpi)^T$ (cf. équation (V.1)). Comme précédemment, la résolution analytique de ce système conduit à quatre cas dépendant cette fois des vitesses $\dot{q}$ à l'instant t_k [Folio 2007]. Là encore, le lecteur intéressé trouvera leurs expressions dans [Folio 2007, Folio & Cadenat 2008c]. Cette dernière approche fournit la solution exacte du problème. Elle est certes limitée à un type d'indice visuel particulier (le point) et au système robotique à trois degrés de liberté considéré ici.

Pour conclure cette partie, nous proposons un résultat de simulation permettant de comparer les méthodes analytiques et numériques. Pour chaque algorithme testé, la même tâche de navigation consistant à positionner la caméra face à un amer constitué de 10 points est réalisée. Comme dans le cas de nos expérimentations, nous avons ici simulé une perte du signal visuel au bout de 10 itérations. Nous avons proposé des résultats pour deux périodes d'échantillonnage : $T_e = 50$ ms et $T_e = 100$ ms. La première correspond grossièrement à la valeur utilisée dans nos expérimentations, la seconde permettant de travailler dans un contexte plus dégradé. Nous proposons seulement les résultats obtenus dans le second cas, et renvoyons le lecteur intéressé à [Folio 2007] pour de plus amples détails. Nous avons cherché à étudier le comportement de ces techniques en fonction de la valeur du pas d'intégration T_n . Pour cela, nous avons évalué la valeur maximale des erreurs $\|s - \hat{s}\|$

et $\|z - \hat{z}\|$ où $s = (X_{P_1} \ Y_{P_1} \dots X_{P_{10}} \ Y_{P_{10}})^T$ est défini par les coordonnées des 10 points considérés et $z = (z_{p_1} \dots z_{p_{10}})^T$ par leur profondeur. L'évolution de ces erreurs en fonction de T_n est présentée sur la figure V.20.

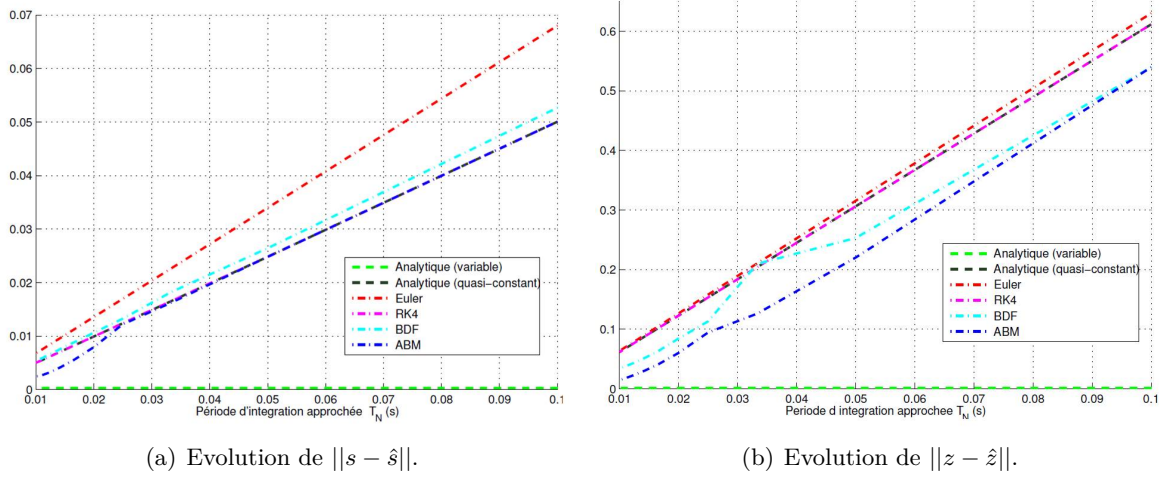


FIGURE V.20 – Evolution des erreurs $\|s - \hat{s}\|$ et $\|z - \hat{z}\|$.

Comme nous pouvons le constater, les erreurs restent faibles et diminuent avec le pas d'intégration T_n , validant ainsi les différentes approches proposées. La solution analytique à torseur variable conduit logiquement aux meilleurs résultats. En ce qui concerne les techniques de résolution approchée, l'algorithme ABM apparaît le plus précis (résultats proches de ceux obtenus par résolution analytique avec torseur constant par morceaux), tandis que les schémas d'Euler et de Runge Kutta sont les moins efficaces. Encore une fois, la formule de Gear (BDF) ne montre pas toute l'étendue de ses capacités car les variations de dynamique restent faibles compte tenu de la tâche effectuée.

Couplage de ces algorithmes avec la commande Nous disposons maintenant d'algorithmes performants (en termes de rapidité et de précision) permettant de reconstruire les indices visuels lorsque l'image est indisponible. Il devient possible de tolérer les pertes du motif d'intérêt, quelle que soit leur origine (occultation, panne de la caméra ou du traitement d'images, retard dû à l'extraction, utilisation de la caméra pour une autre tâche, etc.). Nous verrons que ce dernier point s'avèrera très utile pour réaliser des tâches de navigation au long cours dans la partie V.3.2. Cependant, afin de pouvoir utiliser ces algorithmes pour réaliser les tâches de navigation, il est nécessaire de les coupler avec nos stratégies de commande. Cela conduit à une nouvelle architecture de contrôle présentée sur la figure V.21.

L'idée est ici de basculer entre les indices visuels « réels » s et « reconstruits » $\hat{s}$ en fonction du risque d'occultation évalué par μ_{occ} . Etant maintenant capable de tolérer les occultations, nous n'avons plus à chercher à les éviter à tout prix et nous pouvons revenir à une loi de commande plus simple, similaire à l'équation (V.12) :

$$\dot{q} = (1 - \mu_{coll})\dot{q}_{av}(s, \hat{s}) + \mu_{coll}\dot{q}_{coll}(d_{coll}, \alpha, s, \hat{s}) \quad (V.32)$$

où $\dot{q}_{av}(s, \hat{s})$ et $\dot{q}_{coll}(d_{coll}, \alpha, s, \hat{s})$ sont les correcteurs permettant respectivement de réaliser la tâche de positionnement et de garantir la non collision. Ces deux correcteurs font intervenir la vision, l'un pour converger vers l'amer de référence, l'autre pour garder la caméra pointée vers la cible pendant le contournement. Ils seront calculés à partir de s si l'amer visuel est visible et à partir de $\hat{s}$ dans le cas

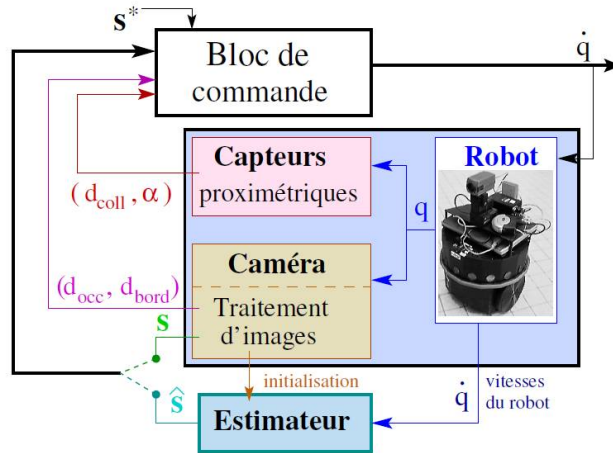


FIGURE V.21 – Nouvelle architecture de contrôle : couplage des algorithmes de reconstruction et de la commande.

contraire. Ils seront donc définis comme suit [Folio 2007] :

$$\begin{cases} \dot{q}_{av}(s, \hat{s}) = (1 - \mu_{occ})\dot{q}_{av}(s) + \mu_{occ}\dot{q}_{av}(\hat{s}) \\ \dot{q}_{coll}(d_{coll}, \alpha, s, \hat{s}) = (1 - \mu_{occ})\dot{q}_{coll}(d_{coll}, \alpha, s) + \mu_{occ}\dot{q}_{coll}(d_{coll}, \alpha, \hat{s}) \end{cases} \quad (V.33)$$

où $\dot{q}_{av}(s)$ et $\dot{q}_{av}(\hat{s})$ sont donnés par l'équation (V.11), en remplaçant s par $\hat{s}$ lorsqu'une occultation se produit. $\dot{q}_{coll}$ est un correcteur référencé multi-capteur puisqu'il dépend à la fois des informations proximétriques et des indices visuels. Cependant, la base étant commandée pour assurer l'évitement d'obstacles, seule la commande de la platine sera affectée si l'amer de référence vient à être perdu. Nous proposons de définir $\dot{q}_{coll}$ de la manière suivante [Folio & Cadenat 2008a, Folio & Cadenat 2008b] :

$$\dot{q}_{coll}(d_{coll}, \alpha, s) = \begin{pmatrix} \dot{q}_{base}(d_{coll}, \alpha) \\ \varpi_{coll}(d_{coll}, \alpha, s) \end{pmatrix} \quad \dot{q}_{coll}(d_{coll}, \alpha, \hat{s}) = \begin{pmatrix} \dot{q}_{base}(d_{coll}, \alpha) \\ \varpi_{coll}(d_{coll}, \alpha, \hat{s}) \end{pmatrix} \quad (V.34)$$

où $\dot{q}_{base}$ représente le correcteur chargé de piloter la base mobile. Il sera défini par les équations (V.19) et (V.20) de manière à contourner l'obstacle soit à l'aide des potentiels rotatifs, soit par suivi de chemin. La commande de la platine sera donnée par l'équation (V.21) en remplaçant s par $\hat{s}$ selon que le motif visuel peut être extrait ou non de l'image.

Notre approche permet donc de continuer à exécuter la tâche référencée vision en dépit de la totale indisponibilité de l'image, ce qui présente un intérêt certain. Cette propriété a notamment été exploitée avec profit pour réaliser de longs déplacements (cf. partie V.3.2). Cependant, les algorithmes de reconstruction supposant le mouvement de la caméra T_c connu, ils ne permettent de définir des schémas de commande en boucle fermée sur les mesures sensorielles que lorsque le torseur est déterminé indépendamment des indices visuels. Lorsqu'il est calculé à partir des données reconstruites $\hat{s}$, le schéma de commande devient une boucle ouverte comme le montre la figure V.21. Le robot évolue alors sur la base d'informations prédites qui ne peuvent être remises à jour tant qu'une image n'est pas à nouveau disponible. Ainsi, notre approche apparaît bien adaptée pour traiter des pertes du signal visuel de durée limitée, et dans la mesure où le mouvement du robot (et celui de la caméra) n'est que peu perturbé. Ces conditions sont a priori réunies dans les tâches de navigation considérées ici, les obstacles n'occultant l'amer d'intérêt que pour peu de temps.

Remarque 7 La stratégie proposée plus haut suppose que les enchainements ont été réalisés par combinaison convexe puisque les correcteurs ont été synthétisés séparément. Il apparaît envisageable de réaliser un enchainement dynamique en redéfinissant la fonction de tâche dédiée à l'évitement e_{coll} (cf. équation (V.22)) de manière à prendre en compte le risque d'occultation sur la troisième composante e_Y .

Remarque 8 Le correcteur $\dot{q}_{\text{occ}}$ dédié à l'évitement d'occultation en l'absence de risque de collision peut aussi être conservé dans la stratégie de commande. De cette manière, il est possible de tenter d'abord d'éviter la perte du signal visuel avant de la tolérer si la tâche le nécessite. La stratégie de commande est alors donnée par [Folio & Cadenat 2007, Folio 2007] :

$$\dot{q} = (1 - \mu_{\text{coll}}) ((1 - \mu_{\text{occ}}) \dot{q}_{\text{av}}(s, \hat{s}) + \mu_{\text{occ}} \dot{q}_{\text{occ}}(s)) + \mu_{\text{coll}} \dot{q}_{\text{coll}}(d_{\text{coll}}, \alpha, s, \hat{s}) \quad (\text{V.35})$$

où $\dot{q}_{\text{av}}(s, \hat{s})$ et $\dot{q}_{\text{coll}}(d_{\text{coll}}, \alpha, s, \hat{s})$ sont définis comme indiqués ci-dessus, $\dot{q}_{\text{occ}}$ étant donné par la relation (V.26b).

Nous proposons maintenant un résultat de simulation montrant l'efficacité de la stratégie (V.32). Nous reprenons le cas représenté sur la figure V.18 où la tâche ne pouvait être réalisée sans tolérer les occultations. Nous nous plaçons exactement dans les mêmes conditions de simulation. L'amer d'intérêt est constitué de 25 points. Deux obstacles sont positionnés dans l'environnement : le premier est un muret non occultant, le second un cylindre de hauteur suffisante pour masquer la cible. Le contournement par le haut est interdit afin qu'une occultation soit effectivement générée. L'enchainement est réalisé par combinaison convexe. Tous les algorithmes de reconstruction ont été testés dans le cadre de cette simulation. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure V.22. De plus amples détails sont disponibles dans [Folio 2007].

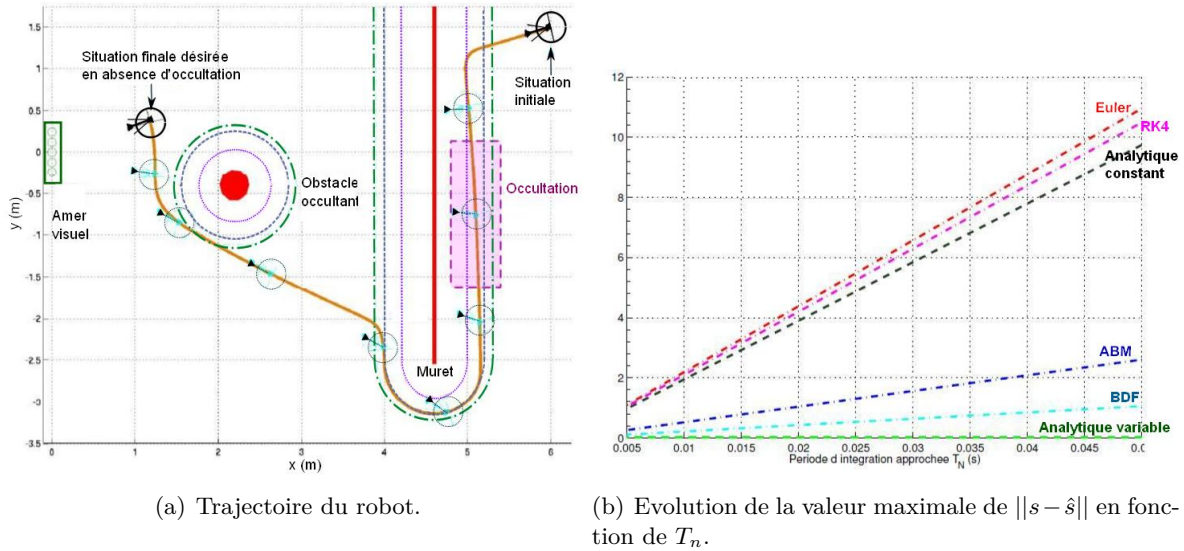


FIGURE V.22 – Evolution de la trajectoire du robot et de l'erreur $\|s - \hat{s}\|$.

Comme nous pouvons le constater, la tâche est maintenant parfaitement réalisée (cf. figure V.22(a)) malgré les obstacles et les occultations. Nos algorithmes permettent de reconstruire efficacement les indices visuels de sorte que la perte temporaire totale de l'image puisse être tolérée lorsque cela s'avère nécessaire pour le succès de la tâche. Nous noterons cette fois que, si la solution analytique avec torseur variable reste la plus précise (ce qui est logique!), la formule de Gear (BDF) est maintenant le schéma

numérique le mieux adapté du fait des variations importantes dans la dynamique du système (cf. figure V.22(b)). Les méthodes à pas multiples sont dans ce cas plus efficaces que celles à pas simple.

V.2.2.4 Conclusion

Nous nous sommes intéressés ici aux problèmes des occultations et des collisions susceptibles de se produire pendant l'exécution d'une tâche de navigation référencée vision. Nous avons tout d'abord proposé des stratégies de commande permettant d'éviter ces deux phénomènes. Malheureusement, très rapidement, ces solutions se sont trouvées limitées car la plupart des tâches robotiques nécessitent de pouvoir tolérer les occultations. C'est pourquoi, nous avons développé différents algorithmes permettant de reconstruire les indices visuels. Nous nous sommes appuyés sur le lien vision/mouvement défini par la matrice d'interaction et avons montré que le problème de reconstruction pouvait se ramener à l'intégration d'un système dynamique. Nous avons proposé plusieurs solutions analytiques ou numériques. Les premières présentent l'avantage de la précision mais sont restreintes à une primitive visuelle particulière, le point. Les secondes offrent la généralité puisqu'elles permettent de déterminer une solution approchée quels que soient les indices considérés et l'architecture du robot porteur. Nous avons ensuite couplé ces algorithmes à nos stratégies de commande afin de réaliser des tâches référencées vision en environnement encombré en dépit des collisions et des occultations. Les résultats obtenus valident les approches proposées et montrent leur efficacité. Il est cependant nécessaire de garder à l'esprit que nos algorithmes de reconstruction sont particulièrement bien adaptés aux occultations de courte durée et que le risque d'une accumulation de l'erreur n'est pas à exclure lorsque la perte du signal visuel se prolonge. En outre, tous les résultats de simulation présentés plus haut ont été obtenus dans un contexte non bruité et en supposant que les conditions initiales sur les indices visuels et leur profondeur sont disponibles et correctes, ce qui n'est pas toujours le cas (notamment pour le second paramètre). Nous leverons ces deux hypothèses dans la partie V.3.1.

V.2.3 Conclusion

Cette section a été consacrée à la gestion de la présence des obstacles pendant l'exécution d'une tâche de navigation référencée vision. Nous nous sommes d'abord intéressés à l'évitement de collision seul, avant d'étendre les stratégies de commande développées dans ce cadre pour contourner les obstacles tout en gérant le problème des occultations. Nous avons ainsi montré que chercher à éviter à tout prix la perte des indices visuels n'est pas toujours la solution la plus pertinente. Cela nous a conduit à reconstruire les indices visuels et à piloter le robot sur la base de ces derniers lorsque la caméra n'est plus en mesure de fournir les données nécessaires à la commande. Nous avons ainsi significativement amélioré l'efficacité de nos stratégies et le robot est maintenant capable de naviguer – pendant une courte durée – en l'absence de données visuelles, élargissant ainsi considérablement la gamme de tâches réalisables. Les stratégies de commande développées reposent sur le basculement entre différents correcteurs permettant de réaliser la tâche de navigation nominale, d'éviter les obstacles et de prendre en compte la perte temporaire du signal visuel. Deux techniques de séquençage permettant de garantir la continuité des vitesses envoyées au robot ont également été proposées et comparées. Il est aussi important de noter que l'ordre d'activation des différents correcteurs n'est jamais connu a priori mais est décidé en ligne, en fonction des risques de collision et d'occultation évalués à partir des informations visuelles et proximétriques. Les méthodes proposées sont donc typiquement locales et semblent bien adaptées aux problèmes occasionnés par les obstacles statiques présents dans l'environnement. Elles constituent donc un premier pas vers la réalisation de notre objectif à long terme : la réalisation de tâches de navigation référencées vision au long cours dans des environnements dynamiques encombrés où l'homme peut éventuellement être présent. Afin d'aller plus loin, il est nécessaire

de pouvoir prendre en compte la présence de l'homme et de donner la possibilité au robot d'effectuer de longs déplacements. Cela passera également par l'extension de nos algorithmes de reconstruction en contexte bruité. Ces différents points font l'objet des travaux menés dans les doctorats d'Adrien Durand Petiteville et Nouredine Ouadah. Les résultats correspondants sont présentés dans la section suivante.

V.3 Travaux actuels : vers la réalisation de grands déplacements dans des environnements « humains » peu connus

Nous avons proposé plus haut des solutions locales permettant de traiter efficacement le problème des collisions et de perte temporaire du signal visuel. Nous cherchons maintenant à étendre nos stratégies pour aller vers la réalisation de grands déplacements dans des environnements « humains¹² » peu connus. Pour cela, il s'agit tout d'abord d'améliorer l'efficacité de nos algorithmes en présence d'incertitudes et de bruits sur les mesures et l'odométrie. Il sera ainsi possible de relâcher certaines hypothèses simplificatrices et de proposer des résultats de meilleure qualité dans un contexte plus réaliste. Ensuite, il est nécessaire d'étendre les stratégies de commande proposées de manière à leur conférer le caractère « global » requis pour la réalisation de longs déplacements. Cela passera en premier lieu par l'introduction d'une carte topologique décrivant l'environnement ; cependant, nous pensons aussi que de tels déplacements peuvent être effectués par la prise en compte de l'homme. Il s'agit alors d'exécuter des tâches de navigation au long cours en suivant un utilisateur donné ou une personne de référence. Ces trois points sont successivement abordés ci-dessous. Les deux premiers sont traités dans la thèse d'Adrien Durand Petiteville [Durand Petiteville 2012], le dernier dans celle de Nouredine Ouadah [Ouadah 2011].

V.3.1 Extension des algorithmes en présence d'incertitudes

Nous avons établi dans la partie V.2.2 différents algorithmes permettant de reconstruire les indices visuels lorsque l'image entière est indisponible. Ces algorithmes ne peuvent fonctionner que si une condition initiale leur est fournie. Nous nous focalisons ici sur la solution analytique obtenue dans le cas du point pour un torseur cinématique pleinement variable. Quatre solutions distinctes ont été exhibées, dépendant des valeurs des vitesses appliquées au robot à l'instant t_k (cf. [Folio 2007, Folio & Cadenat 2008c]). Si nous analysons ces quatre solutions, nous constatons que les conditions initiales nécessaires portent non seulement sur les indices visuels, mais également sur leur profondeur. Les premières seront naturellement fournies par la dernière image disponible avant la perte du signal. Pour les secondes, le problème apparaît plus compliqué car la profondeur n'est pas « directement » accessible. De plus, elle doit être fournie suffisamment rapidement pour éviter d'accroître la période d'échantillonnage de l'asservissement et pour permettre une gestion de l'occultation dans de bonnes conditions. Notons également que les conditions initiales fournies à l'algorithme doivent être les plus précises possibles afin de limiter la propagation des erreurs (cf. remarque 6).

Outre la mesure directe de la profondeur par un capteur dédié (ce qui n'est pas forcément simple à mettre en œuvre), différentes solutions issues des communautés vision et automatique peuvent être envisagées. Ainsi, la stéréovision permet d'obtenir une mesure fiable de z_p si le banc est correctement calibré. Cependant, bien qu'une utilisation temps réel soit possible, elle souffre d'un temps de calcul trop élevé pour pouvoir être utilisée dans notre contexte. De même, les techniques dites de « structure from motion » [Jerian & Jain 1991, Chaumette *et al.* 1996, Oliensis 2002] et de « bundle

12. Le terme « humain » est ici à comprendre dans le sens « où l'homme peut être présent ».

adjustment » [Triggs *et al.* 2000] partagent ce même défaut et nécessitent des images obtenues pour des points de vue éloignés, ce qui n'est pas notre cas. Dans la communauté automatique, différentes approches permettent de reconstruire z_p . Il est ainsi possible d'utiliser un filtre de Kalman comme dans [Matthies *et al.* 1989], mais cette méthode interdisant certains mouvements n'est pas applicable dans notre contexte. Dans [Bellet 2002], l'estimation de pose de la cible est vue comme un dual du problème de commande. Cependant, cette solution nécessite une connaissance a priori importante sur l'environnement, ce que nous ne souhaitons pas. Enfin, d'autres auteurs ont proposé d'exploiter des observateurs non linéaires minimaux [Morbidi & Prattichizzo 2009] et non minimaux [De Luca *et al.* 2008]. Toutefois, ces observateurs dépendent de paramètres difficilement réglables a priori et ne conduisent pas à un temps de convergence répondant à nos attentes [Durand Petiteville *et al.* 2011a]. Pour notre part, nous avons étendu nos propres travaux et avons élaboré une technique consistant à estimer z_p en développant une paire prédictor/correcteur à partir des solutions analytiques obtenues.

Notre objectif est ici de construire une paire prédictor/correcteur permettant de reconstruire la profondeur à l'instant t_k notée $z_p(k)$ en fonction des données $X_P(k-1)$, $Y_P(k-1)$, $X_P(k)$ et $Y_P(k)$ extraites des images aux instants t_{k-1} et t_k . Nous avons obtenu les prédictors $X_P(k|k-1)$, $Y_P(k|k-1)$, et $z_p(k|k-1)$ à partir des équations d'évolution des indices visuels proposées dans [Folio 2007, Folio & Cadenat 2008c]. Leurs expressions ainsi que la démarche permettant de les calculer est décrite dans [Durand Petiteville *et al.* 2009]. Les prédictors étant calculés, il reste à déterminer l'estimateur. Pour cela, nous cherchons la valeur de z_p qui minimise le critère suivant [Durand Petiteville *et al.* 2009] :

$$C = (\hat{X}_P(k|k-1) - \tilde{X}_P(k))^2 + (\hat{Y}_P(k|k-1) - \tilde{Y}_P(k))^2 \quad (V.36)$$

où $\tilde{X}_P(k)$ et $\tilde{Y}_P(k)$ sont les mesures à l'instant t_k . Ce critère compare les prédictors basés sur les mesures à l'instant t_{k-1} avec les mesures obtenues à l'instant t_k . En dérivant ce critère par rapport à $\hat{z}_p(k|k-1)$, nous obtenons l'estimateur. Le lecteur intéressé trouvera son expression dans [Durand Petiteville *et al.* 2009].

Nous avons simulé le comportement de cet estimateur pendant la réalisation d'une tâche de navigation référencée vision. Ces simulations ont été effectuées d'abord en contexte non bruité puis en introduisant une erreur de ± 1 pixel sur l'image et de $\pm 3\%$ sur la commande calculée. Les résultats sont présentés sur la figure V.23. Comme nous pouvons le voir, dans un cas idéal, les profon-

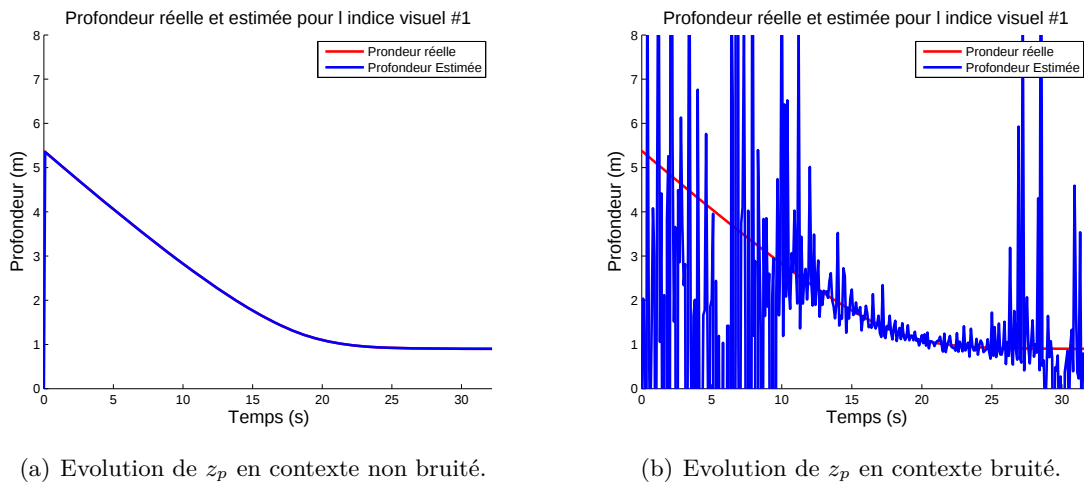


FIGURE V.23 – Evolution de la profondeur réelle et reconstruite en contexte bruité et non bruité.

deurs réelle et reconstruite se superposent parfaitement, validant notre approche. Par contre, dans un contexte plus réaliste où des bruits sont introduits, cet estimateur ne fonctionne plus. Les images utilisées pour la reconstruction étant consécutives, elles sont trop proches pour fournir un rapport signal/bruit suffisant et conduire à de bons résultats. Il est donc nécessaire de modifier la structure du prédictor/correcteur. Pour cela, nous proposons d'utiliser n images obtenues pour des configurations du robot significativement différentes. Dans cette optique, nous définissons un nouveau critère [Durand Petiteville *et al.* 2010b] :

$$C^* = \sum_{j=1}^n (\hat{X}_P(k|k-j) - \tilde{X}_P(k))^2 + (\hat{Y}_P(k|k-j) - \tilde{Y}_P(k))^2 \quad (\text{V.37})$$

Ce critère compare les mesures faites à l'instant t_k avec les prédictors $\hat{X}_P(k|k-j)$ et $\hat{Y}_P(k|k-j)$ construits à partir des mesures prélevées aux instants t_{k-j} , pour $j \in [1, n]$. L'estimation de $\hat{z}_P(k|k)$ est maintenant basée sur n images significativement différentes, ce qui permet d'accroître le rapport signal/bruit. Or, l'utilisation de ce critère nécessite de disposer des prédictors $\hat{X}_P(k|k-j)$ et $\hat{Y}_P(k|k-j)$. Pour cela, une première solution consiste à utiliser la récurrence des équations d'évolution des indices visuels. Cependant, cela conduit à des calculs complexes et lourds. C'est pourquoi, nous avons cherché à déterminer comment l'image $\mathcal{I}_{k-j}$ obtenue à l'instant t_{k-j} se transforme en l'image $\mathcal{I}_k$ mesurée à l'instant t_k . Pour cela, nous avons proposé de calculer la plus courte séquence de commandes reliant l'état de la base mobile¹³ $\eta_{k-j} = \eta(t_{k-j})$ à l'état $\eta_k = \eta(t_k)$. Cette séquence de commandes existe si et seulement si le système non linéaire discret $\eta_{k+1} = f(\eta_k, \dot{q}_k)$ modélisant l'ensemble robotique est commandable. Nous avons montré que ce système est commandable en deux coups [Durand Petiteville *et al.* 2010b]. Cela signifie qu'une séquence de deux commandes $\{\dot{q}_{e_1}, \dot{q}_{e_2}\}$ dites « commandes équivalentes » suffit pour relier les états η_{k-j} et η_k et donc les images $\mathcal{I}_{k-j}$ et $\mathcal{I}_k$. Leur expression est donnée dans [Durand Petiteville *et al.* 2010b]. Il est à noter que ces commandes ne seront jamais utilisées pour piloter réellement le robot ; d'ailleurs, la trajectoire effectuée sous l'action de $\dot{q}_{e_1}$ et $\dot{q}_{e_2}$ est différente de celle obtenue lorsque le véhicule est contrôlé par la séquence $\{\dot{q}(t_{k-j}) \dots \dot{q}(t_k)\}$ [Durand Petiteville *et al.* 2010b]. Les commandes équivalentes seront simplement exploitées pour déterminer les prédictors nécessaires. Leurs expressions sont disponibles dans [Durand Petiteville *et al.* 2010b]. Une fois les prédictors connus, le critère (V.37) peut être minimisé et l'estimateur déterminé [Durand Petiteville *et al.* 2010b].

Nous avons donc obtenu un estimateur s'appuyant sur plusieurs images significativement différentes, ce qui devrait permettre d'accroître le rapport signal/bruit et améliorer la reconstruction de la profondeur en contexte bruité. Afin de vérifier l'efficacité de la méthode, nous l'avons d'abord simulée dans les mêmes conditions que précédemment. La figure V.24 montre les résultats obtenus en présence de bruit. Dans un contexte parfait, nous retrouvons des courbes très similaires au cas précédent [Durand Petiteville *et al.* 2010b]. Nous ne les présentons donc pas à nouveau.

La figure V.24 permet d'évaluer l'influence du nombre d'images n utilisé pour calculer les prédictors. Comme nous pouvons le voir, dans chaque cas, l'estimateur converge vers la valeur réelle de la profondeur, ce qui valide notre approche. Lorsque n est faible, nous observons des oscillations en fin de simulation. Dans ce cas, la tâche référencée vision étant quasiment réalisée, les vitesses appliquées sont très faibles, conduisant à des images très semblables. Le rapport signal/bruit est alors réduit et la qualité de la reconstruction s'en ressent. Il est possible de lutter contre ce phénomène en augmentant le nombre d'images utilisé. L'historique devient alors plus important, ce qui permet en outre de diminuer le temps de convergence. Naturellement, un compromis est nécessaire dans le choix de n . Une

13. Dans notre cas, $\eta = (x \ y \ \theta \ \vartheta)^T$ où (x, y) sont les coordonnées du centre M de la base mobile, θ et ϑ désignant les orientations de la base et de la platine (cf. annexe B).

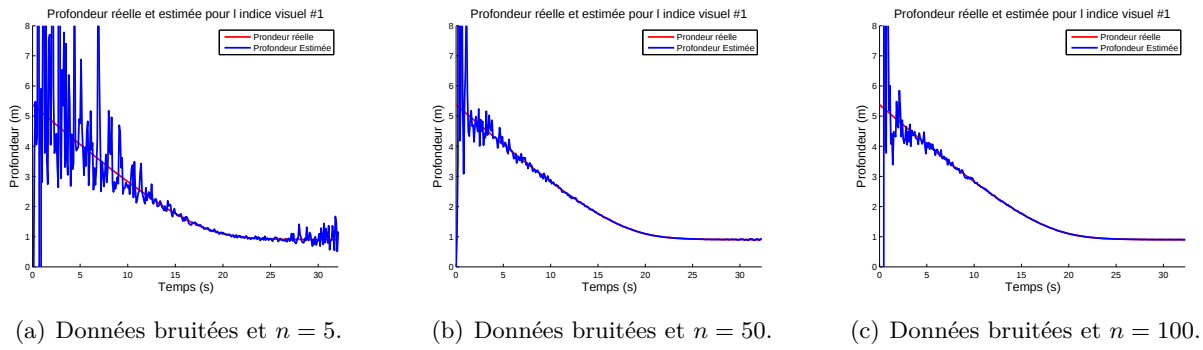


FIGURE V.24 – Simulation pour un estimateur avec n images.

valeur trop importante conduirait en effet à des temps de calcul trop élevés pour notre application. Compte tenu de ces bons résultats, nous avons expérimenté notre approche sur le robot Peeke II. La cible considérée est constituée de quatre cercles rouges d'un diamètre de 16 cm (cf. figure V.3(a)). Les points sont obtenus en extrayant les centres de ces cercles. Nous avons utilisé ici un nombre d'images $n = 30$. Les résultats sont présentés sur la figure V.25. Ne disposant pas de capteur permettant de mesurer la profondeur, il est difficile de conclure avec certitude sur la précision de l'estimation pendant la navigation. Cependant, la valeur reconstruite finale de 0.75 m est cohérente avec la mesure effectuée. De plus, la mission nécessitant que la caméra soit orientée face à la cible à la fin du mouvement, il est logique que la profondeur reconstruite pour chaque point converge vers la même valeur.

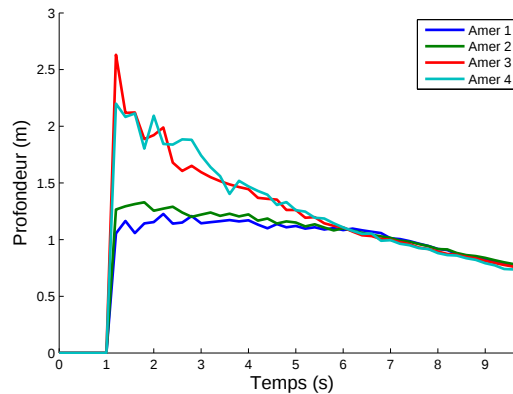


FIGURE V.25 – Estimation de la profondeur avec le robot Peeke II.

Le prédicteur/estimateur proposé plus haut est basé sur le calcul de commandes équivalentes permettant de relier les états η_{k-j} et η_k . Les expressions obtenues pour ces dernières sont spécifiques à chacun des quatre cas d'évolution des indices visuels présentés dans [Folio 2007, Folio & Cadenat 2008c]. Ainsi, il peut arriver que le calcul de $\dot{q}_{e1}$ et de $\dot{q}_{e2}$ utilise les équations obtenues dans deux cas différents. Il existe donc seize expressions analytiques possibles pour les prédicteurs avec le critère (V.37), alors qu'il n'en existait que quatre pour le critère (V.36). Cela pouvant s'avérer un peu fastidieux, nous avons cherché à raccourcir la séquence des vitesses équivalentes. En effet, si un système commandable en un coup pouvait être exhibé, l'estimateur ne s'exprimerait plus que de quatre manières différentes. Dans cette optique, nous avons considéré le système décrivant l'évolution de la caméra plutôt que celle de la base mobile comme nous l'avons fait plus haut. Nous définissons l'état de ce

nouveau système de la manière suivante : $\eta_C(t_k) = (C_x(t_k) \ C_y(t_k) \ \theta_C(t_k))^T$ où $\theta_C(t_k) = \theta(t_k) + \varpi(t_k)$, le couple (C_x, C_y) représentant la position de la caméra. Il est alors possible de montrer que le système représenté par l'équation dynamique $\eta_C(t_k + 1) = g(\eta_C(t_k), \dot{q}(t_k))$ est commandable en un coup [Durand Petiteville 2012]. Une seule commande équivalente $\dot{q}_{e1}$ est alors nécessaire pour transformer l'état $\eta_C(t_{k-j})$ en $\eta_C(t_k)$ et donc l'image $\mathcal{I}_{k-j}$ et $\mathcal{I}_k$. En suivant le même raisonnement que précédemment, il est possible d'établir l'expression de l'estimateur $z_p(k|k)$. Le lecteur intéressé est renvoyé à [Durand Petiteville 2012] pour une description détaillée de la démarche et des résultats.

Nous disposons à présent d'un prédictor/estimateur permettant de fournir une condition initiale fiable sur la profondeur (même en contexte bruité). Les algorithmes de reconstruction des indices visuels développés plus haut seront donc nourris avec des valeurs plus précises, ce qui permettra de réduire la propagation des erreurs. Il faut néanmoins remarquer que ces résultats sont pour l'instant restreints au cas de primitives visuelles de type point et à l'ensemble robotique considéré dans ces travaux. Le premier point n'est pas un gros inconvénient, puisque nous avons montré que la plupart des primitives peuvent être reconstruites à partir de ce type d'indice visuel. Le second est par contre plus limitant et il sera nécessaire d'étudier de nouvelles approches permettant de lever cette contrainte. En termes de performances, les résultats obtenus en simulation et expérimentation montrent l'efficacité de notre solution : la condition initiale est produite dans un temps compatible avec la période d'échantillonnage de l'asservissement et suffisamment rapidement pour permettre de gérer les occultations dans de bonnes conditions. De plus, peu d'hypothèses sur l'amer d'intérêt ont été formulées (en particulier, aucun modèle n'est nécessaire). Afin d'affiner notre analyse, nous avons aussi comparé notre méthode aux techniques basées sur les observateurs non linéaires mentionnées en introduction [De Luca *et al.* 2008, Morbidi & Prattichizzo 2009]. Ceux-ci sont également utilisés pour des primitives de type point et pour une caméra disposant de six degrés de liberté. Nous avons montré que les observateurs proposés sont difficilement réglables et qu'ils ne conduisent pas à un temps de convergence suffisamment court pour répondre à nos attentes. Le lecteur intéressé trouvera de plus amples détails sur ces aspects dans [Durand Petiteville *et al.* 2011a]. Enfin, nous avons intégré ce prédictor/estimateur dans la structure de commande proposée sur la figure V.21, conduisant à une nouvelle architecture représentée sur le schéma V.26.

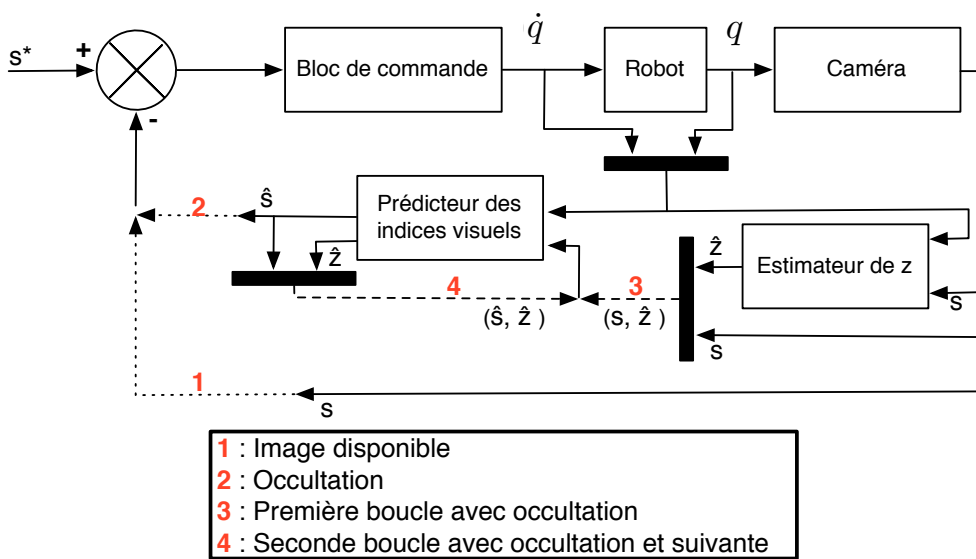


FIGURE V.26 – Nouvelle architecture de contrôle.

Grâce à ces travaux, nous sommes maintenant en mesure de traiter correctement le problème de la perte du signal visuel, quelle qu'en soit son origine (occultation, panne de la caméra ou du traitement d'images, utilisation temporaire de la caméra pour une autre tâche, etc.). *En d'autres termes, le robot est capable d'évoluer sur la base d'indices visuels virtuels pendant un laps de temps donné.* Cette propriété est extrêmement importante. Elle sera en effet la pierre angulaire du superviseur développé pour la réalisation de tâches de navigation « au long cours ». Nous nous focalisons maintenant sur ce dernier point qui fait l'objet de nos contributions les plus récentes.

V.3.2 Réalisation de longs déplacements

Nous nous intéressons ici à la réalisation de grands déplacements à partir des techniques de type asservissement visuel 2D. Nous avons montré dans la partie IV que ces techniques avaient un caractère intrinsèquement local et qu'il était nécessaire d'étendre leur domaine d'application. Pour cela, nous avons proposé des stratégies de commande, basées sur le basculement entre différents correcteurs, permettant de garantir la non collision tout en tolérant la perte du signal visuel. Cependant, si ces améliorations permettent d'effectuer des déplacements dans des environnements encombrés en toute sécurité, elles restent encore « trop locales » pour réaliser des navigations « au long cours ». En effet, la spécificité essentielle de ce dernier cas réside en le fait que *l'amer d'intérêt n'est pas visible depuis la position initiale du robot*. Celui-ci n'ayant aucune information sur sa position dans l'environnement, il est incapable de déterminer le mouvement à effectuer pour le rejoindre. Il est donc nécessaire de compléter nos travaux en adjoignant des informations globales permettant au robot d'aller vers l'amer. Pour les raisons mentionnées dans la section V.1, nous avons choisi d'exprimer ces informations sous la forme d'une carte topologique que nous associerons ensuite aux lois de commande synthétisées précédemment. Nos travaux s'inspirent des solutions consistant à suivre un chemin constitué d'images caractéristiques (ou « images-clés ») permettant de relier les points de départ et d'arrivée du robot. Ce chemin est souvent appelé « route visuelle » ou « mémoire visuelle ». Ces méthodes nécessitent une phase d'apprentissage préalable à la mission pendant laquelle le robot parcourt l'environnement en enregistrant des séquences d'images-clés qui seront utilisées pour bâtir la carte topologique. Un algorithme du type Dijkstra ou A^* permet alors d'extraire le chemin à suivre. La littérature propose de nombreuses approches reposant sur ce principe parmi lesquelles nous pouvons citer [Matsumoto *et al.* 1996, Remazeilles 2004, Blanc *et al.* 2005, Kralnik & Přečil 2008, Courbon *et al.* 2009, Cherubini & Chaumette 2009, Cherubini & Chaumette 2010, Cherubini *et al.* 2011]. Nous noterons que généralement la carte topologique se réduit à la séquence d'images à enchaîner, excepté dans [Remazeilles 2004, Blanc *et al.* 2005, Royer *et al.* 2007, Segvic *et al.* 2009] où le problème de la construction de la carte complète de l'environnement est considéré.

Cependant, la plupart de ces méthodes souffrent de deux inconvénients majeurs. Tout d'abord, la construction de la carte topologique nécessite de prélever un grand nombre d'images-clés, conduisant à une base de données volumineuse [Gaspar *et al.* 2000]. En effet, ces images sont prélevées pour des configurations relativement proches du robot de manière à toujours :

- pouvoir trouver des primitives visuelles communes entre deux images successives afin de préserver la propriété d'adjacence ;
- garantir la stabilité locale de l'asservissement visuel, traditionnellement utilisé pour passer d'une image à l'autre et avancer dans la carte.

Une solution à ces problèmes est de définir les nœuds de la carte topologique par des images représentant seulement les amers caractéristiques de l'environnement comme dans [Vassallo *et al.* 2000, Gaspar *et al.* 2000]. La progression dans la carte est alors assurée par des asservissements visuels basés

sur des primitives permettant de passer d'un nœud à l'autre et elle est vérifiée par des procédures de localisation « qualitative » [Vassalo *et al.* 2000, Gaspar *et al.* 2000].

Le second problème évoqué concerne la prise en compte des événements imprévus tels que les obstacles. En effet, à notre connaissance, peu de travaux s'inscrivant dans ce contexte se sont intéressés à ce problème, à l'exception des solutions récentes proposées dans [Cherubini & Chaumette 2010, Cherubini *et al.* 2011]. Celles-ci ont consisté à modifier la loi de commande assurant la progression dans la carte de manière à garantir la non collision. Un correcteur spécifique a donc été synthétisé.

Pour notre part, nous nous sommes intéressés à ces deux problèmes. Nous avons d'abord cherché à définir notre carte topologique de manière à réduire la quantité d'informations nécessaires en nous inspirant de [Vassalo *et al.* 2000]. Nous avons ensuite couplé cette carte avec un superviseur permettant d'organiser les différentes tâches élémentaires nécessaires à la réalisation de la mission. Ce superviseur a été conçu de manière à ce qu'il soit le plus générique possible, c'est-à-dire que les tâches élémentaires susmentionnées puissent être réalisées par n'importe quel type de correcteur. Nous présentons nos résultats ci-dessous. Ces travaux étant relativement récents [Durand Petiteville *et al.* 2011b], nous avons porté notre effort essentiellement sur la détermination du superviseur. Nous proposons donc seulement nos premières réflexions sur la construction de la carte topologique.

V.3.2.1 Vers la définition d'une carte topologique peu volumineuse

Afin de construire la carte topologique, nous avons suivi l'idée proposée dans [Vassalo *et al.* 2000] où les nœuds sont constitués par des amers spécifiques à la navigation en environnement intérieur : couloirs, portes, coins, etc. Nous avons donc modélisé notre environnement par un ensemble de m amers noté $T_G = \{T_1, \dots, T_m\}$. Nous proposons de définir notre carte topologique par un graphe G (cf. figure V.28(b)) où chaque amer T_i est représenté par un nœud. Nous supposons pour l'instant que ces amers sont des cibles artificielles constituées d'un nombre r_i de points $P_i(X_{P_i}, Y_{P_i})$. Chaque cible T_i sera donc caractérisée par un ensemble d'indices visuels $\mathbf{s}_i = (X_{P_1}, Y_{P_1}, \dots, X_{P_{r_i}}, Y_{P_{r_i}})^T$. Un nœud T_i sera connecté à un nœud T_{i+1} si :

1. T_{i+1} est visible depuis un voisinage proche de T_i ;
2. T_{i+1} est accessible depuis T_i , i.e., rien n'empêche le robot de rejoindre T_{i+1} une fois qu'il l'a détecté par la vision. En d'autres termes, les deux amers appartiennent à des composantes connexes de l'environnement.

Il y a donc une double contrainte portant sur la *visibilité* et l'*accessibilité* de l'amer suivant à partir de l'amer précédent. A partir de ce graphe décrivant tout l'environnement, il sera possible de déterminer¹⁴ un chemin reliant l'amer initial à l'amer final correspondant au but, même si ce dernier n'est pas visible depuis la position de départ. Ce chemin sera constitué d'une séquence d'amers notée T_{ch} à atteindre successivement. La « route visuelle » à suivre ne sera donc plus constituée d'un ensemble d'images-clés rapprochées mais au contraire éloignées, ce qui permettra de réduire significativement la taille de la base de données. La propriété d'adjacence sera préservée en définissant une tâche chargée de retrouver l'amer T_{i+1} une fois que le robot aura atteint un voisinage de l'amer T_i . C'est d'ailleurs ce mécanisme qui nous permettra d'évaluer la progression du robot le long du chemin prédéfini. Nous reviendrons sur ce point ci-dessous. Naturellement, la réalisation de la mission nécessitera de « localiser » le robot dans la carte topologique une fois au début de la tâche afin de déterminer le nœud de départ et construire T_{ch} . Les amers étant artificiels, une simple recherche de cible suffit. L'évolution vers des amers naturels passera par l'utilisation d'algorithmes de matching robustes. Une fois la carte topologique élaborée, nous sommes capables de trouver un chemin reliant deux amers quelconques de la carte.

14. A l'aide d'un algorithme de Dijkstra [Dijkstra 1971] par exemple.

V.3.2.2 Stratégie de commande globale et superviseur

Nous supposons maintenant que nous disposons d'une séquence d'amers T_{ch} à atteindre successivement. Nous avons donc déterminé le chemin à suivre; il reste maintenant à réaliser le mouvement correspondant. Pour cela, nous avons développé le superviseur présenté sur la figure V.27.

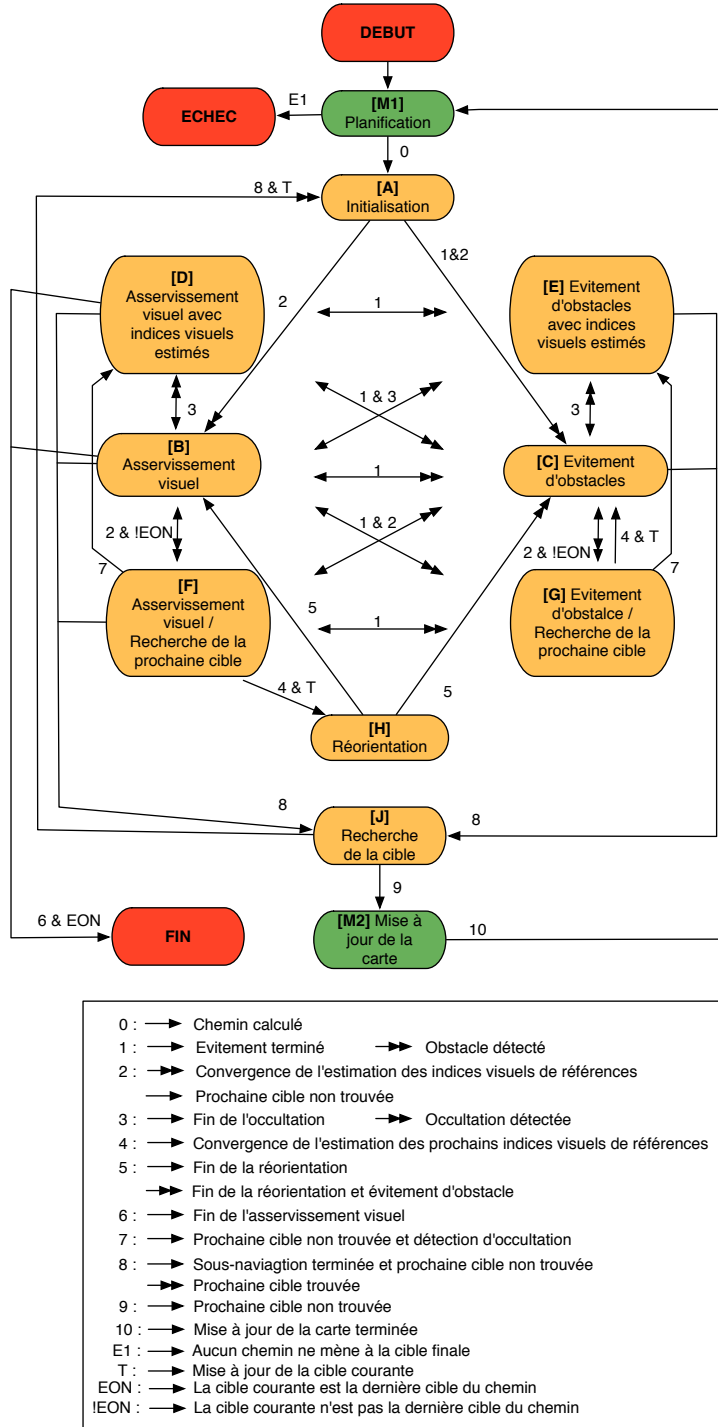


FIGURE V.27 – Superviseur.

Celui-ci permet de basculer entre différents correcteurs permettant respectivement de converger vers l'amer courant T_i par asservissement visuel (tâche $[B]$), de garantir la non collision (tâche $[C]$), ou encore d'utiliser les algorithmes de reconstruction pour déterminer ces deux lois de commande lorsque les données nécessaires ne sont pas disponibles (tâches $[D]$ et $[E]$). Ce basculement sera effectué en fonction des événements pertinents pour le déroulement de la mission (risques de collision, d'occlusion, amer courant atteint, etc.). Ces événements seront évalués à partir des mesures visuelles et proximétriques. La continuité de la commande envoyée au robot sera préservée à l'aide des techniques d'enchaînement présentées plus haut (séquencement dynamique ou bien combinaison convexe). Les stratégies de commande développées précédemment apparaissent donc maintenant comme de simples outils permettant de réaliser une tâche de navigation au long cours. Cependant, elles ne sont pas encore suffisantes pour atteindre notre objectif. En effet, il faut de plus être capable de :

▷ **trouver la cible suivante T_{i+1} pendant que le robot converge vers l'amer courant T_i :**

Cette recherche peut être effectuée soit durant un asservissement visuel (tâche $[F]$), soit en phase d'évitement (tâche $[G]$). Pour cela, la base et la platine sont désolidarisées. La première est pilotée à partir des *indices visuels virtuels* fournis par les algorithmes de reconstruction. La seconde est commandée à l'aide d'un simple asservissement de position angulaire pour balayer l'environnement à la recherche de la cible suivante [Durand Petiteville et al. 2011b]. Nous voyons ici tout l'intérêt de pouvoir accepter des pertes totales de l'image et de permettre au robot de se déplacer en « aveugle » pendant au moins de courtes périodes. Si la cible T_{i+1} n'a pas été détectée, on revient à l'asservissement visuel ou à l'évitement en cours d'exécution. Enfin, notons que si cette cible n'était jamais repérée, le robot s'arrêterait devant l'amer T_i et la caméra scannerait l'environnement jusqu'à ce que T_{i+1} soit trouvée (tâche $[J]$). La sécurité des biens et des personnes est donc préservée. Une étape de mise à jour de la carte et de replanification du chemin est alors mise en œuvre (tâches $[M1]$ et $[M2]$).

▷ **changer la cible considérée dans l'asservissement visuel, une fois T_{i+1} trouvée :**

Ce changement pouvant occasionner des mouvements indésirables du système robotique tels que des marches arrières [Durand Petiteville et al. 2011b], nous avons proposé un correcteur permettant de réorienter la base mobile vers la nouvelle cible. C'est ce correcteur qui est appliqué au robot lorsque la tâche $[H]$ est réveillée. Le lecteur intéressé trouvera davantage de détails sur ce point dans [Durand Petiteville et al. 2011b].

Tous les correcteurs mis en jeu sont à présent connus. Il reste cependant un point à définir qui concerne la détermination des motifs de référence s_i^* . En effet, leur valeur est nécessaire puisque le mouvement entre chaque amer est réalisé par un asservissement visuel (cf. tâche $[B]$). Cette valeur peut être obtenue pendant une phase d'apprentissage comme dans [Cherubini & Chaumette 2010]. Mais il est également possible de la calculer en ligne à partir de la technique développée dans [Durand Petiteville et al. 2010a]. Dans ce travail, nous avons utilisé la valeur de la profondeur reconstruite par la paire prédicteur/estimateur pour déterminer automatiquement les dimensions de l'amer et déduire les indices visuels de référence. Grâce à cette méthode, contrairement aux approches classiquement proposées dans la littérature, aucun modèle de l'amer n'est nécessaire pour effectuer ce calcul, limitant ainsi les informations à fournir préalablement au système. C'est donc cette solution-là que nous avons choisie. Ainsi, la tâche $[A]$ dédiée à l'initialisation consistera principalement à faire tourner le robot sur lui-même pour acquérir les images nécessaires au calcul de la profondeur des points du premier amer à atteindre et de s_1^* . De même, lorsque la cible suivante T_{i+1} a été détectée, l'estimateur permettant de déterminer la profondeur des points est lancé et les indices visuels de référence s_{i+1}^* peuvent être déterminés.

Ce superviseur apparait donc comme une extension des stratégies de commande proposées dans nos travaux antérieurs. Celles-ci peuvent être vues comme une « bibliothèque » de correcteurs élémentaires à disposition qu'il suffit d'activer « au bon moment » pour réaliser la tâche souhaitée.

V.3.2.3 Résultats de simulation

Nous avons simulé une tâche de navigation au long cours dans l'environnement représenté sur la figure V.28(a). La carte topologique correspondante est décrite sur le schéma V.28(b). La scène comprend quatre obstacles dont trois sont occultants. Elle est caractérisée par un ensemble de $m = 9$ amers, chacun d'entre eux étant constitués de quatre cercles. La position de leurs centres respectifs peut être extraite de l'image et définit les indices visuels s_i ($i = \{1, \dots, 9\}$) nécessaires à la navigation. Afin de nous rapprocher des conditions expérimentales, nous avons introduit un bruit de 1 pixel sur le traitement d'image et une erreur de 3% sur l'odométrie.

L'objectif de la mission est de positionner la caméra embarquée face à l'amer T_7 . Initialement, le robot se trouve dans une configuration telle que T_7 n'est pas visible. Un algorithme de Dijkstra permet, à partir de la carte topologique, de calculer la séquence d'amers permettant de connecter le point de départ et le but. Celle-ci est donnée par : $T_{ch} = \{T_1, T_2, T_4, T_6, T_7\}$ (cf. figure V.28(b)).

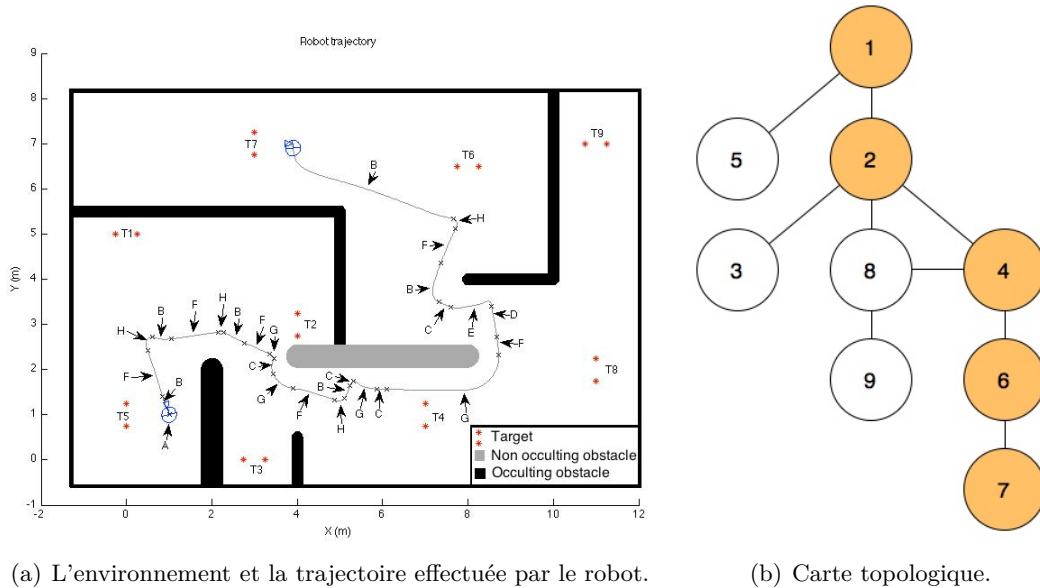


FIGURE V.28 – Environnement, carte topologique et trajectoire du robot.

Comme le montre la trajectoire du robot représentée sur la figure V.28(a), la mission est parfaitement réalisée, bien que le but ne soit pas visible depuis la position initiale du robot. Les différentes cibles ont été correctement enchainées et la sécurité préservée. Le robot a effectué un déplacement d'environ 20 mètres, ce qui est conséquent pour une tâche référencée vision et qui n'est pas « optimal » en termes de distance parcourue. Ce résultat est logique car, le chemin étant effectué par un ensemble de correcteurs référencés capteurs, aucune contrainte sur la longueur de la trajectoire n'a été prise en compte. En outre, nous pouvons aussi remarquer que le basculement vers l'amer suivant n'est réalisé que lorsque ce dernier est effectivement détecté par la caméra (et non dès qu'il est visible). Le temps d'exécution de la mission est donc accru. Cependant, la carte topologique ne contenant aucune information sur la position des amers, il est impossible de choisir des directions privilégiées de recherche et donc d'améliorer l'efficacité de la tâche [H]. Notons enfin que toutes les tâches apparaissant dans

le superviseur ont été exécutées au moins une fois (cf. figure V.28(a)), validant l'approche proposée.

Pour aller plus loin dans notre analyse, nous présentons de plus l'évolution des vitesses appliquées au robot sur la figure V.29(a). Les pointillés matérialisent les instants de basculement et les lettres font référence aux tâches activées (cf. schéma V.27). Comme nous pouvons le constater, la continuité des commandes a été préservée tout au long de la mission. Nous avons ici utilisé l'enchaînement dynamique, mais il aurait aussi été possible de travailler avec la combinaison convexe. Enfin, nous concluons cette partie en montrant l'efficacité de la méthode de reconstruction des indices visuels de référence. Les résultats pour l'amer T_7 sont proposés sur la figure V.29(b). Cette courbe permet d'apprécier la précision et la rapidité avec laquelle chaque motif de référence s_i est déterminé en dépit des bruits présents sur l'image et l'odométrie. La technique développée dans [Durand Petiteville *et al.* 2010a] est donc parfaitement utilisable en ligne dans un contexte réel.

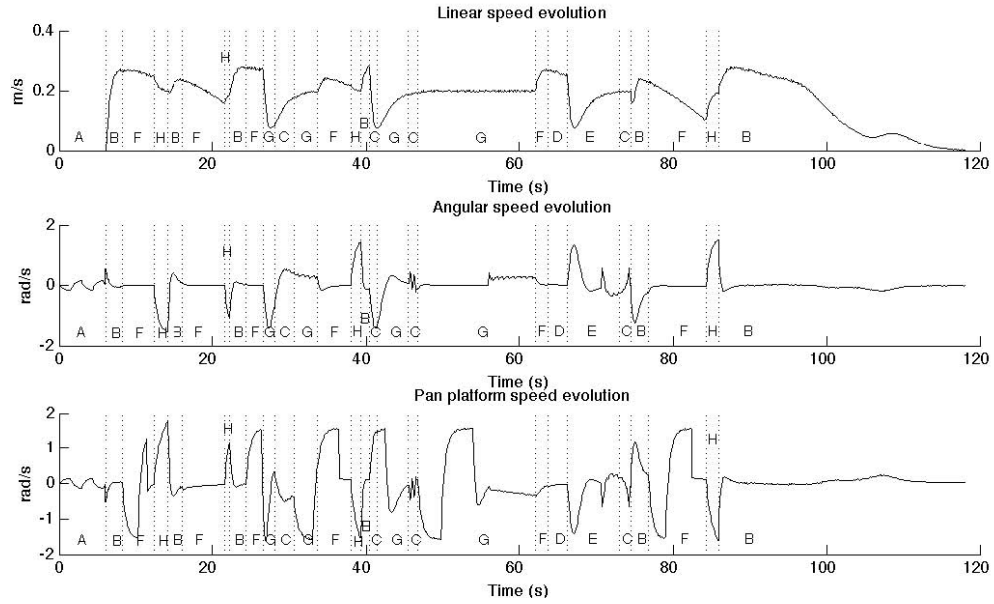
V.3.2.4 Conclusion

Nous avons proposé ici une première solution au problème de la navigation au long cours par asservissement visuel. Nous nous sommes appuyés sur les stratégies de commande locales développées dans nos travaux antérieurs et nous les avons complétées pour bâtir un superviseur dédié. Ce superviseur a ensuite été couplé à une carte topologique qui apporte les données globales nécessaires à la réalisation de grands déplacements. Cette carte ne contenant qu'un petit nombre d'informations sur l'environnement (seulement, quelques amers caractéristiques), elle offre l'avantage de réduire significativement la taille de la base de connaissance disponible. Le superviseur permet quant à lui de sélectionner le bon correcteur au bon moment, de manière à réaliser la tâche adéquate (asservissement visuel, évitement, etc.). Ces correcteurs sont basés sur des informations sensorielles, réelles ou estimées, et ont donc un caractère typiquement local. C'est en fait la capacité d'enchaîner continûment ces correcteurs à des instants judicieusement choisis en fonction du contexte qui permet de conférer le caractère global requis pour effectuer la mission considérée. Enfin, il est à noter que tout correcteur capable d'effectuer la tâche élémentaire souhaitée peut être utilisé dans notre superviseur. Ce dernier offre donc une structure générique, exploitable avec d'autres lois de commande que celles que nous avons présentées. Pour conclure, nous pouvons mettre en évidence deux limitations importantes de notre approche. Celles-ci concernent la carte topologique qui reste encore trop peu aboutie, ainsi que l'utilisation d'amers artificiels qui restreint l'exploitation de cette technique dans des contextes vraiment réalistes. Ces différents points seront abordés dans notre prospective.

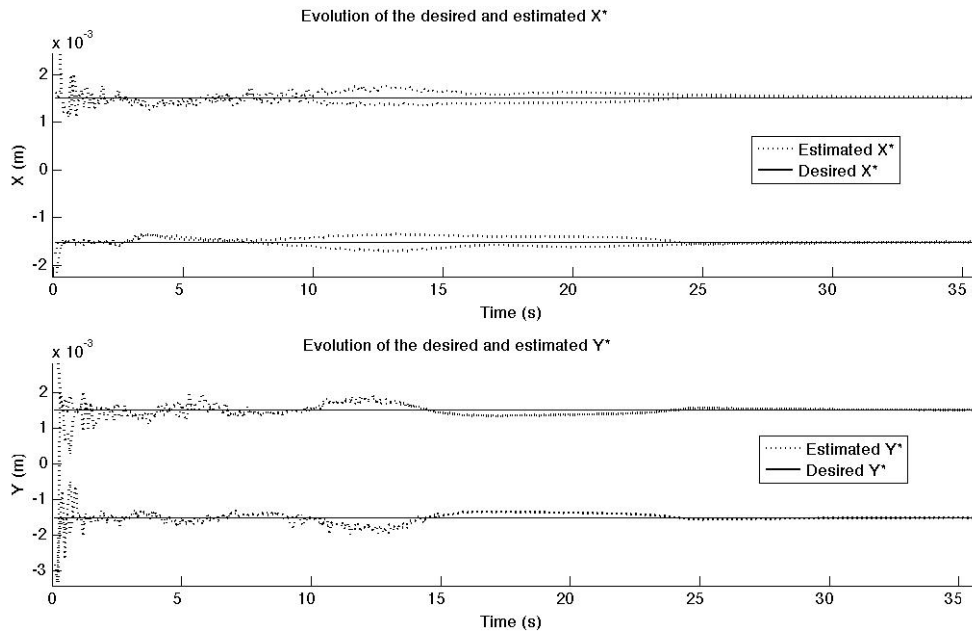
V.3.3 Navigation par asservissement visuel en présence de l'homme

Nous avons dans les parties précédentes amélioré les méthodes utilisées pour la reconstruction des indices visuels en contexte bruité. Nous avons de plus développé un superviseur qui, couplé à une carte topologique de l'environnement, permet de réaliser de longs déplacements par asservissement visuel. Il s'agit maintenant de prendre en compte la présence de l'homme dans un voisinage proche du robot. Notre objectif est double : d'une part interagir avec un utilisateur d'intérêt, et d'autre part, garantir la sécurité des biens et des personnes situés à proximité du véhicule. La tâche d'interaction envisagée consiste essentiellement à s'approcher de la personne et à la suivre, en dépit des obstacles et des piétons. De longs déplacements peuvent ainsi être exécutés, sans nécessairement faire appel à une carte de l'environnement, l'utilisateur guidant le véhicule.

A ce jour, l'asservissement visuel a été utilisé dans des domaines variés tels que le médical ou la micro-robotique par exemple (cf. annexe A). Cependant, à notre connaissance, peu de travaux se sont intéressés à l'exploitation de cette technique pour permettre à un robot mobile de se déplacer par rapport à l'homme. Quelques résultats peuvent néanmoins être mentionnés. Par exemple, dans



(a) Les vitesses appliquées.



(b) La reconstruction automatique de s_7^* .

FIGURE V.29 – Evolution des commandes et reconstruction automatique des indices visuels de référence.

[Kwon *et al.* 2005], un véhicule équipé de deux caméras non calibrées permet de tracker une personne d'intérêt. De même, dans [Kobilarov *et al.* 2006, Chen & Birchfield 2007, Gockley *et al.* 2007], le robot réalise une tâche consistant à suivre un utilisateur donné. Cependant, ces différents articles focalisent sur les aspects « vision », laissant de côté le contrôle.

Notre objectif est donc ici de développer des stratégies de commande référencées multi-capteur permettant de réaliser ce type de mission. Les travaux réalisés à ce jour, présentés dans la thèse de Nouredine Ouadah [Ouadah 2011] ainsi que dans différents articles [Ouadah *et al.* 2009, Ouadah *et al.* 2011], permettent d'initier et de maintenir l'interaction entre l'homme et le robot. Pour cela, nous avons exploité deux capteurs, la vision et les capteurs RFID. De premiers évitements de piétons basés sur des informations fournies par le laser embarqué ont également été réalisés. Cependant, seuls les travaux concernant le premier point sont présentés ci-dessous, les résultats dédiés au second étant encore trop partiels.

V.3.3.1 Détection de l'homme et choix des informations sensorielles

Comme nous l'avons vu dans la partie V.1.2, la personne d'intérêt est repérée par un tracker développé au LAAS par F. Lerasle et T. Germa [Germa *et al.* 2010b, Germa *et al.* 2010c, Germa *et al.* 2010a]. Ce tracker retourne les coordonnées du centre de gravité du rectangle englobant la tête (cf. figure V.3(b)), ainsi qu'un facteur d'échelle caractérisant grossièrement la distance homme/robot. A partir de ces données, il est nécessaire de construire le vecteur des indices visuels utilisés pour commander le véhicule. Pour cela, compte tenu qu'il s'agit de définir une « liaison virtuelle rigide » entre l'utilisateur et la caméra, nous avons choisi de considérer les quatre sommets P_i du rectangle englobant la tête de la personne d'intérêt. Notre vecteur sera donc ici défini par $s = (X_{P_1}, Y_{P_1}, \dots, X_{P_4}, Y_{P_4})^T$ où les couples (X_{P_i}, Y_{P_i}) désignent les coordonnées de chaque sommet.

Cependant, il faut ici pointer une première difficulté liée à l'utilisation du tracker et qui nous empêchera d'exploiter nos algorithmes de reconstruction en cas d'occultation. Le système de vision retourne en effet un rectangle qui n'est jamais distordu, même lorsque la caméra n'est pas perpendiculaire à la personne d'intérêt. En d'autres termes, seuls la position du centre de gravité et du facteur d'échelle évoluent pendant l'exécution de la tâche, l'orientation du rectangle par rapport à $\vec{y}_c$ restant toujours identiquement nulle. Cela signifie que les quatre sommets du rectangle utilisés comme indices visuels ne respectent pas les équations du flot optique et qu'en toute rigueur il est impossible de caractériser leur évolution dans l'image par la relation classique $\dot{s} = \mathcal{L}T_c$. De plus, l'utilisateur pouvant éventuellement bouger, le modèle d'évolution des indices visuels sera pleinement donné par l'équation (V.4). Il sera donc impossible ici d'utiliser les algorithmes de reconstruction développés plus haut. C'est pourquoi, l'utilisateur a été muni d'un « tag » RFID permettant de continuer à le détecter, même lorsqu'il se trouve hors du champ de vue de la caméra. Le robot Rackham a donc été doté d'un ensemble de huit antennes réparties régulièrement autour de sa circonférence (cf. figures V.1(a) et B.1(a)). Leur portée se situe entre 0.5 m et 4.5 m, ce qui est suffisant pour les applications envisagées (environnement intérieur). Elles retournent le couple $(d_{\text{tag}}, \theta_{\text{tag}})$ correspondant respectivement à la distance antenne/tag et à la direction dans laquelle se trouve l'utilisateur exprimée dans le repère robot. Il est important de noter que ces données, notamment la première, sont généralement grossières et imprécises. Cependant, elles restent notre dernière source d'informations possible lorsque le signal visuel est indisponible. De plus amples détails sur ce capteur et le tracker utilisé sont fournis dans [Germa *et al.* 2010a].

V.3.3.2 Une stratégie de commande basée vision et RFID

Notre objectif est ici de réaliser une tâche consistant à initier et maintenir l'interaction entre un utilisateur (muni d'un tag RFID) et le robot. Celui-ci doit donc se diriger vers la personne d'intérêt, rester à une distance convenable de cette dernière et la garder dans le champ de vue (autant que possible), en dépit de ses mouvements¹⁵. Pour cela, nous avons développé une stratégie de commande reposant à la fois sur les données visuelles et RFID. Elle est donc référencée multi-capteurs. Son principe est similaire aux solutions proposées plus haut puisqu'il s'agit d'exploiter l'asservissement visuel tant que l'homme peut être détecté par le tracker et de basculer sur un correcteur basé sur les données RFID lorsque ce n'est plus le cas. Si l'utilisateur ne peut être détecté par aucune de ces modalités sensorielles, la commande est nulle et le robot stoppé par mesure de sécurité. Nous proposons la stratégie suivante [Ouadah *et al.* 2011] :

$$\dot{q} = \mu_{\text{vis}} \dot{q}_{\text{vis}} + \mu_{\text{RFID}} (1 - \mu_{\text{vis}}) \dot{q}_{\text{RFID}} \quad (\text{V.38})$$

où μ_{vis} et μ_{RFID} sont des indicateurs fixés à 1 respectivement si l'utilisateur est visible et si le tag est détecté dans un voisinage proche du robot. Ils sont nuls sinon. $\dot{q}_{\text{vis}}$ et $\dot{q}_{\text{RFID}}$ sont les correcteurs permettant de piloter le véhicule sur la base des données visuelles ($\mu_{\text{vis}} = 1$) et des informations RFID ($\mu_{\text{vis}} = 0$ et $\mu_{\text{RFID}} = 1$). Nous synthétisons ces deux correcteurs ci-après.

Synthèse de $\dot{q}_{\text{vis}}$ Il s'agit ici de commander le robot de manière à ce qu'il s'approche et reste à une distance convenable de la personne d'intérêt tout en la gardant dans le champ de vue de la caméra. Nous supposons ici que le tracker peut à tout instant détecter la personne d'intérêt et renvoyer le vecteur des indices visuels nécessaires s . Dans le contexte de notre travail, nous sommes confrontés à plusieurs types de perturbations dues :

- à des erreurs de calibration et d'estimation de la profondeur (cf. plus haut),
- à des informations sensorielles susceptibles d'être imprécises,
- à un modèle mal connu puisque nous considérerons, pour construire notre commande, que les indices visuels vérifient la relation du flot optique (V.4),
- au mouvement de l'utilisateur défini par le terme $\frac{\partial s}{\partial t}$ que nous négligerons.

Afin de proposer une loi de commande efficace, nous avons couplé l'asservissement visuel 2D classique donné par l'équation (V.11) à un second correcteur basé sur la commande à structure variable et la théorie des modes glissants. En effet, ce type d'approche est classiquement utilisée en automatique pour contrôler des systèmes non linéaires représentés par des modèles incertains [Utkin 1992]. Elle a été appliquée à l'asservissement visuel de bras manipulateurs en présence d'incertitudes dans [Zanne *et al.* 2000, Park & Lee 2003, Joon-Kil *et al.* 2006]. A notre connaissance, elle n'a été que peu exploitée dans le cadre de la robotique mobile. On peut néanmoins citer les travaux récents proposés dans [Becera & Sagues 2008] où un asservissement visuel basé sur les droites épipolaires a été développé à l'aide de cette approche. Pour notre part, nous avons cherché à exploiter à la fois le formalisme des fonctions de tâche et la commande par modes glissants. Celle-ci consiste à amener les trajectoires de l'état du système non linéaire considéré sur une surface de glissement définie par $\sigma_{\text{gliss}} = 0$. Celle-ci doit être choisie de telle sorte que le système ait la dynamique souhaitée (la stabilité à l'origine devant être au moins garantie). La tâche à réaliser consistant à annuler l'erreur $s - s^*$, nous avons défini σ_{gliss} par la fonction de tâche e_{pos} [Ouadah *et al.* 2011] donnée par l'équation (V.10)). La loi de commande par modes glissants s'écrit alors classiquement comme suit [Utkin 1992] :

$$\dot{q}_{\text{mg}} = \dot{q}_{\text{eq}} + \Delta \dot{q} \quad (\text{V.39})$$

15. Nous rappelons que le problème des collisions n'est pas abordé.

où $\dot{q}_{eq}$ est la commande dite « équivalente » permettant de maintenir le système sur la surface de glissement, une fois qu'il s'y trouve. $\Delta\dot{q}$ est une commande discontinue destinée à attirer le système vers la surface de glissement et à rejeter les perturbations. Nous avons montré que ces deux commandes s'expriment dans notre cas de la manière suivante [Ouadah *et al.* 2011] :

$$\dot{q}_{eq} = -(C\mathcal{L}J)^{-1} \frac{\partial e_{pos}}{\partial t} \quad \text{et} \quad \Delta\dot{q} = -K \text{sign}(e_{pos}) \quad (\text{V.40})$$

où $K = \text{Diag}(k_1, k_2, k_3)$ est une matrice 3×3 diagonale. Celle-ci doit être choisie de telle sorte que la stabilité du système soit garantie. Nous avons établi que cette condition est remplie si les gains k_i vérifient la relation suivante exprimée pour $i = \{1, 2, 3\}$ [Ouadah *et al.* 2011] :

$$\text{sign}(\sigma_i) \sum_{j=1}^3 M_i(j) k_j \text{sign}(\sigma_j) \geq \nu_i \quad (\text{V.41})$$

Le vecteur M_i désigne la $i^{\text{ème}}$ ligne de la matrice $C\mathcal{L}J$, σ_i la $i^{\text{ème}}$ composante de e_{pos} et les paramètres ν_i sont des constantes strictement positives permettant de fixer la rapidité du système. Cependant, les paramètres M_i dépendent de la configuration du robot et de la fonction de tâche e_{pos} . Il est donc parfois difficile d'exhiber une solution à l'inégalité (V.41) et donc de garantir la stabilité. Différentes solutions sont envisageables [Utkin 1992, Ouadah *et al.* 2011]. Dans ce travail, nous avons finalement proposé d'appliquer le correcteur $\dot{q}_{av}$ défini par l'équation (V.11) lorsque ce cas se produit. Notre loi de commande est donc finalement donnée par [Ouadah *et al.* 2011] :

$$\dot{q}_{vis} = \mu \dot{q}_{av} + (1 - \mu) \dot{q}_{mg} \quad (\text{V.42})$$

où μ permet de basculer entre les deux correcteurs selon que l'on peut trouver ou non un gain K vérifiant les conditions de stabilité (V.41). Il est à noter que, compte tenu de la fonction de Lyapunov considérée, ces conditions sont relativement conservatives et que le calcul de K n'est pas toujours aisé [Ouadah *et al.* 2011].

Synthèse de $\dot{q}_{RFID}$ Lorsque la personne ne peut être détectée par le tracker, la loi de commande précédente ne peut être calculée et il est nécessaire d'exploiter les informations (d_{tag}, θ_{tag}) fournies par l'antenne RFID. Nous proposons alors de commander le robot de manière à ce qu'il s'oriente vers l'utilisateur d'intérêt et s'approche de lui jusqu'à une distance de sécurité d_{sec} prédéfinie. Nous cherchons donc à atteindre l'orientation θ_{tag} et à obtenir $d_{tag} = d_{sec}$. La platine sur laquelle est montée la caméra apparaît ici comme un degré de liberté supplémentaire dont nous n'avons pas nécessairement besoin pour cette tâche (aucun évitement d'obstacle n'est en effet prévu). Nous avons donc choisi simplement de la ramener à sa position d'origine ($\vartheta = 0$). Nous proposons la loi de commande suivante [Ouadah *et al.* 2011] :

$$\dot{q}_{RFID} = (v(d_{tag}) \quad \omega(\theta_{tag}) \quad \varpi(\theta))^T \quad (\text{V.43})$$

où la vitesse angulaire $\omega(\theta_{tag})$ est calculée par un correcteur proportionnel-intégral de manière à orienter le robot dans la direction donnée par θ_{tag} . La vitesse linéaire $v(d_{tag})$ est déterminée à l'aide d'un profil, fonction de d_{tag} , pour faire décroître l'erreur $d_{tag} - d_{sec}$. Enfin, $\varpi(\theta)$ est un simple correcteur proportionnel permettant de réinitialiser la platine. Il est à noter que, si θ_{tag} est d'une précision convenable, la valeur de d_{tag} est très grossière du fait de la faible résolution de l'antenne (environ 1 m). Cette loi de commande ne sera donc appliquée que tant que le tracker ne parvient pas à détecter l'utilisateur. On reviendra dès que possible à la loi de commande référencée vision précédente qui est la plus fiable ici.

Remarque 9 La structure de commande proposée reposant sur les modes glissants a une nature discontinue. Nous ne nous sommes pas particulièrement attachés ici au problème du maintien de la continuité pendant la réalisation de la tâche. Nous avons néanmoins cherché à limiter ce problème en choisissant convenablement les gains intervenant dans le calcul des correcteurs $\dot{q}_{av}$ et $\dot{q}_{RFID}$.

V.3.3.3 Résultats expérimentaux

La stratégie de commande appliquée est donc donnée par l'équation (V.38) où les correcteurs $\dot{q}_{vis}$ et $\dot{q}_{RFID}$ sont respectivement définis par les relations (V.39) et (V.43). Cette stratégie a été implantée sur le robot Rackham qui est le seul véhicule équipé des systèmes sensoriels nécessaires. Le scénario est le suivant : un utilisateur non expert, muni d'un tag RFID, doit évoluer librement à proximité du robot (il peut même quitter son champ de vue). Celui-ci, en retour, doit se déplacer vers la personne d'intérêt et rester dans un certain voisinage tout en orientant la caméra vers elle. A la fin de la mission, le robot doit s'arrêter face à l'utilisateur à une distance souhaitée de 1 m. Afin d'évaluer les performances de notre système, nous avons tracé l'évolution des trois composantes de la fonction de tâche e_{pos} et de l'erreur de position latérale notées respectivement TF et PE sur la figure correspondante. Nous avons également enregistré les vitesses appliquées au robot, ainsi que la variation du « flag » μ_{vis} noté **visible** sur les courbes proposées. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure V.30 et montrent que la tâche est correctement réalisée.

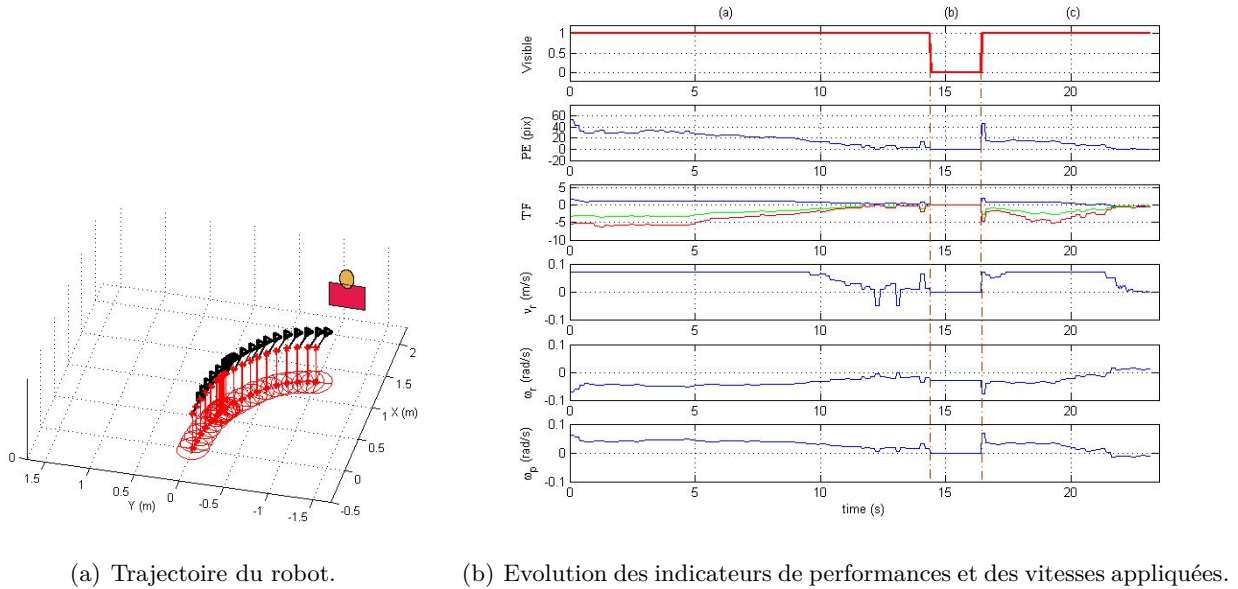


FIGURE V.30 – Evolution du robot, des indicateurs de performances et des vitesses appliquées.

V.3.3.4 Conclusion

Dans cette partie, nous avons proposé une stratégie de commande référencée multi-capteurs permettant à un robot mobile de se déplacer par rapport à une personne d'intérêt. Cette stratégie est basée sur deux modalités sensorielles – la vision et les données RFID – et consiste à basculer entre deux correcteurs selon que l'utilisateur se trouve (ou non) dans le champ de vue de la caméra. La mise en place de cette stratégie a nécessité de coupler un tracker, capable de suivre une personne d'intérêt, à des techniques de commande référencée vision. Nous avons ainsi réalisé un « asservissement visuel

sur l'homme », permettant au robot de se mouvoir vis-à-vis d'un être humain et non plus simplement relativement à un ensemble d'amers de l'environnement. A notre connaissance, ce point est assez peu abordé dans la littérature. En outre, nous avons été aussi confrontés à des incertitudes sur le modèle que nous n'avions pas rencontrées dans les travaux précédents. Nous avons couplé un asservissement visuel classique à une commande par modes glissants. Les résultats obtenus se sont montrés prometteurs mais ne sont qu'un premier pas vers la réalisation de tâches d'interaction de manière fiable. Ainsi, ces résultats pourraient être améliorés en proposant de nouvelles conditions de stabilité, moins conservatives. Le chattering, toujours présent dans ce type de commande, pourrait aussi être réduit en considérant une nouvelle structure pour $\Delta\dot{q}$ [Utkin 1992]. La prise en compte explicite du mouvement de l'utilisateur permettrait également de réduire l'erreur de vitesse et d'améliorer significativement les performances de l'asservissement. Enfin, il sera nécessaire d'étendre cette stratégie de commande afin de garantir la non collision, non seulement avec les objets de l'environnement mais également avec tout piéton situé dans un voisinage proche du robot. Les principales limitations concernent donc les conditions de stabilité, le chattering, la non prise en compte du mouvement de l'utilisateur et des obstacles (hommes et objets). Ces différents points s'insèrent dans notre prospective de recherche.

V.4 Conclusion

L'objectif de nos travaux est de réaliser des tâches de navigation référencées vision au long cours dans des environnements d'intérieur structurés peu connus et possiblement évolutifs. Les missions considérées ici consistent essentiellement à atteindre un but donné, ce but étant défini par un amer artificiel ou une personne d'intérêt. Nous avons cherché à réduire autant que possible la connaissance a priori à fournir au robot sur l'environnement.

Nous avons abordé ce problème du point de vue de la commande et nous sommes appuyés sur l'asservissement visuel 2D. Cette technique permet d'amener le robot vers le but en régulant à zéro une erreur exprimée dans l'image. Cependant, de par sa nature locale, elle a un domaine de convergence limité. Il est ainsi impossible de garantir la non collision ou bien de réaliser la tâche si le signal visuel est indisponible (occultation, longs déplacements, etc.). Tout notre travail a donc consisté à essayer d'étendre son « rayon d'action » de manière à remplir nos objectifs. Pour cela, nous avons développé des stratégies de commande référencées multi-capteurs permettant de basculer continûment entre différents correcteurs élémentaires en fonction de la situation rencontrée par le robot. Nous avons ainsi proposé des solutions garantissant seulement la non collision, avant de traiter le problème des obstacles occultants. Nous avons alors montré que l'évitement conjoint d'obstacles et d'occultations n'est pas toujours la stratégie la plus pertinente, ce qui nous a conduits à développer des algorithmes permettant de reconstruire la profondeur et les indices visuels. De cette manière, le robot devient capable d'évoluer dans l'environnement, même lorsqu'il est « aveugle ». Cette caractéristique s'est avérée très précieuse pour réaliser des grands déplacements référencés vision et a été la pierre angulaire du superviseur que nous avons bâti pour répondre à ce problème. Celui-ci a ensuite été couplé à une carte topologique afin de donner au robot les informations globales nécessaires à la réalisation de la tâche. Dans le prolongement de ces résultats, nous avons développé une stratégie de commande permettant au robot de se déplacer par rapport à une personne d'intérêt. Exploitant les informations renvoyées par un tracker dédié, nous avons réalisé un « asservissement visuel sur l'homme », thème à notre connaissance peu abordé dans la littérature d'un point de vue commande. Nous avons validé ces travaux en simulation puis expérimentalement sur différents systèmes disponibles au LAAS. Les résultats obtenus ont montré la pertinence, l'intérêt et les limitations des approches développées, balisant ainsi notre prospective de recherche. Nous présentons celle-ci dans le chapitre suivant.

Prospective

Sommaire

VI.1 Extension des travaux « historiques »	101
VI.1.1 Vers la réalisation de tâches de navigation « au long cours » dans des environnements « réalistes »	102
VI.1.2 Vers un environnement « humain » évolutif	105
VI.2 Coordination de systèmes complexes par asservissement visuel	107
VI.2.1 Vers l'asservissement visuel coordonné d'un système à deux bras	107
VI.2.2 Vers l'automatisation des tâches de biomicromanipulation par asservissement visuel	108

Dans les travaux évoqués précédemment, nous avons développé des stratégies de commande permettant de réaliser des tâches de navigation référencées vision dans des environnements peu connus où l'homme peut être présent. La première partie de notre prospective s'inscrit dans le prolongement de ces travaux et vise à améliorer l'existant. Il s'agira donc ici principalement d'étendre les méthodes proposées afin de mieux satisfaire les objectifs initialement mentionnés. Cependant, cette piste n'est pas la seule envisagée. En effet, la plupart des robots actuellement en cours de développement sont caractérisés par une structure complexe, souvent anthropomorphique. Ils sont en outre conçus pour pouvoir interagir de manière poussée avec l'homme. Ces robots sont donc appelés à effectuer des missions de plus en plus évoluées où les besoins en coopération ne pourront être que difficilement négligés. C'est pourquoi, très récemment, nous avons souhaité ouvrir un nouvel axe de recherche consacré à la réalisation de tâches nécessitant la coordination de deux ou plusieurs robots par asservissement visuel. La palette des applications envisageables apparaît riche et vaste, depuis la manipulation à deux bras jusqu'à la navigation de plusieurs véhicules coopérants. Pour notre part, nous nous intéresserons essentiellement au premier point, à la fois dans les domaines macroscopique et microscopique.

Notre prospective comprend donc deux facettes : la première, résolument « historique », consiste à poursuivre les travaux développés jusqu'ici ; la seconde apparaît plus novatrice et plus « en rupture », notamment avec les aspects concernant la micromanipulation. Nous présentons ces différents axes de recherche ci-après.

VI.1 Extension des travaux « historiques »

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence nos contributions sur le thème de la navigation d'un robot mobile dans un environnement encombré d'obstacles statiques possiblement occultants. Les différents algorithmes et stratégies de commande proposés ont été validés en simulation puis expérimentés sur les systèmes robotiques à disposition au LAAS, démontrant leur faisabilité. Nous sommes parvenus à remplir un certain nombre d'objectifs parmi ceux que nous avons évoqués dans l'introduction. Cependant, des contraintes telles que la présence de l'homme ou l'évolutivité de l'environnement n'ont été que peu, voire pas du tout prises en compte. En outre, certains travaux

comme l'exécution de grands déplacements doivent encore être améliorés. La première partie de notre prospective est consacrée à ces deux aspects.

VI.1.1 Vers la réalisation de tâches de navigation « au long cours » dans des environnements « réalistes »

Ces travaux sont basés sur le couplage d'une carte topologique apportant les informations globales nécessaires à la réalisation de longs déplacements avec un ensemble de correcteurs typiquement locaux organisés au sein d'un superviseur. Bien que les résultats obtenus soient globalement satisfaisants, nous pouvons axer notre prospective autour de trois directions de recherche concernant respectivement les différents algorithmes intervenant dans le superviseur, la carte topologique et l'aspect réaliste de l'environnement.

VI.1.1.1 Des algorithmes plus efficaces

Nous nous focalisons ici sur les méthodes utilisées dans le superviseur. Comme nous l'avons vu, celui-ci s'appuie sur :

- des stratégies d'évitement d'obstacles statiques,
- des algorithmes de reconstruction des indices visuels et de la profondeur,
- des asservissements visuels.

Ces stratégies de commande et ces algorithmes sont bien maîtrisés. Aussi, les pistes envisagées sont-elles essentiellement techniques et visent-elles à améliorer l'efficacité des différentes méthodes mentionnées. Les propositions effectuées ici s'inscrivent dans une prospective à très court terme et concernent les deux premiers points. Le troisième sera abordé plus loin.

Considérons d'abord les stratégies d'évitement développées. Elles consistent à imposer au robot de suivre une enveloppe de sécurité et sont déclenchées dès que celui-ci pénètre dans la zone dangereuse. Ce principe, bien qu'efficace, souffre de plusieurs inconvénients. D'abord, il ne permet de traiter qu'un seul obstacle à la fois. La méthode ne fonctionne donc que si les obstacles sont séparés d'une distance suffisante, ce qui apparaît comme une hypothèse plutôt forte sur l'environnement. Une solution est de traiter les données proximétriques en amont de manière à regrouper les obstacles trop proches. Cependant, un tel processus n'est pas forcément simple à réaliser et de plus certaines directions libres de l'espace peuvent être supprimées. En outre, les conditions de déclenchement ne fonctionnent pas toujours correctement, si bien que, dans certaines situations particulières, le robot peut rester « satellisé » sur l'enveloppe de sécurité. Enfin, cette méthode ne permet pas d'anticiper l'obstacle puisque l'on attend que le robot rentre dans la zone dangereuse avant d'agir. Le véhicule est ainsi contraint de suivre l'enveloppe de sécurité quel que soit le cas, alors que d'autres solutions d'évitement pourraient être envisagées pour peu que l'on réagisse plus tôt. Nous souhaitons donc dans notre prospective à court terme travailler ces différents points. En particulier, afin d'améliorer les conditions de déclenchement, nous envisageons d'exploiter les techniques d'asservissement visuel avec reconstruction des indices afin de prédire l'impact de cette commande sur la distance à l'obstacle. Si celle-ci s'accroît, cela signifie que tout danger est désormais écarté. Dans le cas contraire, il est nécessaire de continuer à suivre l'enveloppe de sécurité. En outre, nous prévoyons de développer une stratégie « anticipative » permettant d'écarter le robot de l'obstacle avant que la seule solution de contournement ne se réduise au suivi de l'enveloppe de sécurité. Cette stratégie pourrait reposer sur la définition d'un champ de potentiel ou de chemins appropriés imposant au véhicule de « fuir » l'obstacle plutôt que de continuer à s'en approcher. De cette manière, le robot ne sera plus asservi sur l'enveloppe de sécurité que lorsque les circonstances l'exigent vraiment, i.e., lorsque l'obstacle présente un danger immédiat.

Des mouvements d'évitement inutiles ou inadaptés pourront ainsi être supprimés. Ces deux aspects permettront d'améliorer significativement les performances du robot et seront abordés prochainement.

Revenons maintenant sur les algorithmes permettant de reconstruire les indices visuels et la profondeur. Si nous avons obtenu, pour les premiers, différentes solutions plus ou moins génériques, ce n'est pas le cas pour les seconds. En effet, les paires prédicteurs/correcteurs développées sont restreintes au cas des points et de la plateforme robotique considérée dans nos travaux. Une première extension intéressante consisterait donc à étudier la possibilité de construire cette paire à partir des solutions analytiques obtenues pour le torseur cinématique constant. En effet, bien qu'encore restreint au cas des points, le résultat obtenu serait valide pour tout système robotique. Il faudrait néanmoins évaluer la précision du nouveau schéma ainsi obtenu. Il est de plus à noter qu'une solution indépendante des primitives visuelles considérées semble ici compromise puisqu'aucune expression analytique des indices visuels ne peut être exhibée dans un cas général.

VI.1.1.2 Une carte topologique mieux définie

Nous nous intéressons maintenant aux aspects liés à la carte topologique et à la planification de trajectoire. Ici, s'ouvrent des problèmes scientifiques extrêmement intéressants et auxquels il sera difficile de répondre rapidement : d'une part, la construction d'une carte topologique adéquate respectant les contraintes spécifiées sur la taille de la base de connaissance, la visibilité et l'accessibilité de l'amer suivant depuis l'amer courant ; d'autre part, la maîtrise des trajectoires effectuées par le robot. Ces deux problèmes apparaissent néanmoins étroitement liés. En effet, ayant choisi de définir les nœuds par des cibles artificielles éloignées les unes des autres, nous avons significativement réduit la base de connaissance nécessaire à la navigation. Cependant, ce faisant, nous avons abandonné une partie de la maîtrise des trajectoires réalisées puisque le mouvement entre deux nœuds successifs du graphe est effectué par un asservissement visuel 2D basé sur l'amer à atteindre. Comme l'ont montré les résultats de simulation, les trajectoires ainsi obtenues apparaissent parfois peu naturelles, notamment lors de la transition d'une cible vers l'autre. A notre sens, ces trajectoires dépendent de deux paramètres importants : (i) la configuration dans laquelle se trouve le véhicule lorsque l'on passe d'un amer à l'autre ; (ii) les valeurs choisies pour les indices visuels de référence associés à chaque amer, ces derniers étant fonction de la configuration finale souhaitée pour le robot vis-à-vis de la cible. Bien que nous n'ayons encore que très peu approfondi ces aspects, il nous semble que ce problème peut être abordé de deux manières : soit au niveau de la définition de la carte topologique ; soit au niveau de la commande. Dans le premier cas, il s'agira de s'attacher à définir les informations associées aux nœuds. Différentes questions devront être abordées : faut-il se contenter d'informations caractérisant les amers considérés ? ou bien doit-on envisager de rajouter des données complémentaires facilitant par exemple la recherche de la prochaine cible ou encore la tâche de réorientation ¹ ? et si oui, quels types de données (configuration du robot ? vecteur vitesse souhaité ? indices visuels de référence ? autre ?) ? Cependant, il est aussi envisageable que la solution au problème de la gestion des trajectoires se situe davantage au niveau du contrôle. Une piste intéressante pourrait par exemple consister à prédire la trajectoire du robot sur quelques secondes à partir de l'instant où on décide de changer de cible. Peut-être des techniques de commande prédictive pourraient-elles être bénéfiques ici ? Autant de questions ouvertes sur lesquelles nous devons travailler pour apporter des éléments de réponse satisfaisants.

1. Il s'agit ici de garantir que le robot se trouvera dans une configuration facilitant le mouvement vers l'amer suivant lors de la transition.

VI.1.1.3 Un contexte plus réaliste

Enfin, le troisième axe de recherche que nous envisageons concerne les asservissements visuels mis en place. Ceux-ci exploitent pour l'instant uniquement des indices visuels de type point extraits à partir de cibles artificielles. Cela apparaît limitatif compte tenu de l'évolution actuelle de la robotique où la capacité d'évolution autonome dans un environnement quelconque devient essentielle. Dans ce contexte, il nous semble important de pouvoir considérer des primitives variées (et non plus seulement des points) issues d'amers naturels (et non plus artificiels). En effet, si les points apparaissent particulièrement bien adaptés pour réaliser des tâches de positionnement, ils semblent moins pertinents lorsqu'il s'agit de suivre des corridors un peu étroits, de tourner au coin d'un couloir ou bien de franchir des portes. De plus, s'affranchir des amers artificiels permet d'éviter d'instrumenter l'environnement, ce qui peut être difficile si celui-ci est étendu. Il nous semble ainsi intéressant de considérer les droites (pour tourner au bout d'un couloir) ou le point de fuite (pour parcourir un corridor). Nous souhaitons aussi mener une réflexion sur le franchissement des portes. Notons que le passage aux amers naturels nécessitera également de revenir sur la définition des nœuds de la carte topologique. Ceux-ci avaient été définis jusque-là par des amers caractéristiques d'un lieu particulier de l'environnement. Les primitives telles que le point de fuite ou les droites par exemple sont communes à tous les couloirs de la scène. Dans ce contexte, se pose la question de savoir si on les considère comme des nœuds ou bien de simples informations nécessaires au déplacement entre ces derniers. Dans ce dernier cas, cela signifie que le robot pourra être asservi temporairement sur des primitives visuelles indépendantes des nœuds du graphe topologique. Il faudra s'assurer que l'on parcourt bien la portion de chemin adéquate pour contrôler l'exécution de la tâche. La localisation « topologique » sera ici cruciale et un travail important devra être fait pour étendre le superviseur de manière à intégrer ces aspects.

Toujours concernant les asservissements visuels mais dans un contexte plus global, nous souhaitons nous intéresser à la commande du robot à partir d'images fournies par plusieurs caméras. En effet, il s'agit d'un problème ouvert, encore peu abordé dans la littérature consacrée à l'asservissement visuel. L'intérêt majeur de ces approches est de bénéficier de plusieurs champs de vue complémentaires de la scène, facilitant l'exécution de tâches complexes et offrant davantage de flexibilité. Dans la plupart des cas relevés dans la littérature associée à l'asservissement visuel, les solutions considèrent deux caméras, l'une embarquée, l'autre déportée. La première souffre d'un champ de vue limité mais permet d'explorer l'espace et bénéficie d'une bonne précision. La seconde offre une vue globale de l'environnement mais apparaît moins précise. De plus, à notre connaissance, la grande majorité des travaux proposés utilisent les deux caméras pour réaliser deux tâches distinctes. Il nous semble au contraire intéressant d'aller vers l'intégration de toutes les données visuelles disponibles dès lors qu'elles sont pertinentes pour la tâche considérée. Dans notre contexte, nous souhaitons poursuivre deux pistes séparées. Dans la première, nous envisageons de piloter un robot à partir d'images fournies par un réseau de caméras pour réaliser des tâches de navigation au long cours. Il s'agirait alors d'exploiter la caméra embarquée pour rejoindre l'amer d'intérêt et les capteurs déportés pour détecter les événements imprévus (obstacles, piétons, etc). Ainsi, le robot pourrait être contrôlé à partir des vues embarquées ou déportées selon que l'on cherche à rejoindre le but ou à éviter les collisions (si l'on souhaite traiter ce problème avec la vision). De plus, l'exploitation de vues complémentaires pourrait aussi proposer une réponse alternative aux problèmes d'occultation. Ce travail pourrait s'inscrire au sein du programme ADREAM (Architectures Dynamiques Reconfigurables pour systèmes Embarqués Autonomes Mobiles) du LAAS. La seconde piste que nous souhaitons poursuivre est totalement différente. Elle s'appuie sur un nouveau dispositif de vision, la caméra Ladybug, récemment montée sur le robot Rackham. Ce dispositif est composé de six caméras : cinq d'entre elles perçoivent latéralement, la dernière étant orientée verticalement. Il propose ainsi un champ de vue sphérique de quasiment 360 degrés autour et au-dessus du robot.

La richesse du signal vidéo disponible peut alors être utilisée pour différentes tâches. Elle apparaît particulièrement bien adaptée pour la navigation au long cours, notamment pour la recherche et la détection de l'amer suivant. Le robot peut ainsi rester commandé par des indices visuels réels, y compris dans les tâches $[F]$ et $[G]$ (cf. schéma V.27), renforçant la robustesse de l'exécution de la mission. Elle peut aussi être intéressante dans le cadre du suivi de personnes d'intérêt ainsi que pour la détection d'obstacles.

Nous avons ici proposé quelques pistes d'améliorations et de réflexion autour de la navigation au long cours par asservissement visuel. Dans le prolongement de nos travaux, un autre axe s'impose de lui-même : la prise en compte de l'évolutivité de l'environnement et de la présence de l'homme.

VI.1.2 Vers un environnement « humain » évolutif

Les stratégies de commande que nous avons présentées dans le chapitre V sont pour l'instant restreintes aux environnements statiques. Il s'agit donc de scènes où les différents objets sont immobiles. Or, la tendance actuelle est au développement de robots de plus en plus proches de l'homme, de par leur structure mécanique (humanoides) ou bien de par les tâches qu'ils devront effectuer. En effet, les robots de service tels que les « co-workers » ou encore les guides de musée connaissent un réel essor. Afin de réussir leurs missions, ces robots doivent pouvoir interagir étroitement avec l'homme et partager son environnement en toute sécurité. Dans ce contexte, il est fondamental de donner au robot la capacité de prendre en compte le mouvement des amers ou des personnes d'intérêt ainsi que celui des obstacles. Pour cela, nous pensons qu'il sera essentiel de coupler l'asservissement visuel avec des méthodes d'estimation fiables. Nous procéderons progressivement, en considérant d'abord l'environnement libre puis en traitant l'effet des obstacles en termes d'occultations et de collision. Il s'agira donc dans un premier temps de revenir aux sources de nos travaux et de les étendre de manière à intégrer le mouvement des différents objets de la scène, qu'il soient amers, personnes d'intérêt ou obstacles. Nous présentons nos pistes de réflexion sur ces thèmes ci-après, en séparant le suivi de personnes de celui des objets inanimés.

VI.1.2.1 Prise en compte du mouvement des objets présents dans la scène

Nous nous intéressons ici à l'aspect dynamique de l'environnement. Cette caractéristique peut avoir un impact au niveau global et au niveau local. Au niveau global, des objets de l'environnement peuvent avoir été déplacés, remettant en cause la connexité et donc la carte topologique. Il faut alors donner au robot la capacité de remettre à jour la carte pendant l'exécution de la mission, autrement dit la possibilité de replanifier la séquence d'amers à effectuer. Au niveau local, nous allons retrouver les mêmes contraintes que précédemment : suivre l'amer, garantir la non collision et traiter les occultations. Il s'agit donc d'une extension des stratégies de commande et des algorithmes de reconstruction développés précédemment.

En collaboration avec P. Danès et T. Sentenac, nous avons commencé à mener une réflexion sur cet objectif dans le cadre de deux stages de master [Comment 2009, Dessus 2010]. Nous nous sommes confrontés à deux problèmes : la réalisation du mouvement de suivi d'une part et l'estimation du mouvement de la cible d'autre part. Les résultats obtenus ont montré l'intérêt de coupler l'asservissement visuel 2D permettant de satisfaire le premier point à des techniques de filtrage satisfaisant le second point. En effet, la grande difficulté rencontrée réside dans la reconstruction du terme $\frac{\partial e}{\partial t}$ qui caractérise l'impact du mouvement de l'objet sur la variation de la fonction de tâche. La question qui se pose alors et qui fait l'objet de notre prospective sur ce thème est la suivante : « comment déterminer ce mouvement de manière fiable à l'aide des données visuelles fournies par la caméra ? ».

Une première solution proposée dans [Bensalah 1996] consiste à filtrer directement $\frac{\partial e}{\partial t}$ à l'aide d'un filtre de Kalman. Cependant, elle ne nous satisfait pas pleinement car il nous semble difficile de pouvoir définir clairement les propriétés statistiques du bruit intervenant sur cette grandeur, ainsi que d'effectuer des hypothèses pertinentes sur la dynamique de cette dernière. Une autre solution, à notre sens plus intéressante, serait de revenir au mouvement physique de l'amer, et plus précisément à son torseur cinématique (et non à son état complet, qui nécessiterait une localisation métrique du robot, ce que nous ne souhaitons pas). C'est cette intuition que nous avons suivie. Nous avons ainsi exprimé la relation entre $\frac{\partial e}{\partial t}$ et ce torseur dans [Comment 2009, Dessus 2010]. Il devient alors possible de faire des hypothèses physiquement pertinentes sur ce dernier, ce qui permet de modéliser sa dynamique par des représentations d'état dans de meilleures conditions. Il est maintenant nécessaire de mettre en place des dispositifs de filtrage dédiés (filtres de Kalman étendus, « unscented », etc.) et de comparer leurs performances. Une fois ces travaux finalisés, nous prévoyons également d'étudier les ruptures de modèle de manière à pouvoir suivre l'amer, même si son mouvement change brutalement. Ce point, aux confluent des thématiques de l'asservissement visuel et de l'estimation, constitue le nœud de nos prochains travaux sur ce thème. Les résultats obtenus ici influenceront à la fois les techniques d'évitement d'obstacles développées ainsi que l'extension des algorithmes de reconstruction. Il sera probablement nécessaire de repenser une grande majorité des stratégies mises en place jusqu'ici. Enfin, ces résultats seront également sans doute le point de départ de travaux à plus long terme sur l'asservissement visuel coordonné d'une flotte de robots.

VI.1.2.2 Prise en compte du mouvement de l'homme

Nous nous intéressons maintenant à donner la capacité au robot de prendre en compte le mouvement de l'homme. Comme nous l'avons vu, ces aspects sont importants dans l'optique d'un robot de plus en plus appelé à être proche de l'homme. Il apparaît alors nécessaire de s'intéresser à la réalisation de tâches d'interaction. Celles-ci nécessitent que le robot soit capable de (i) s'approcher de la personne d'intérêt, (ii) orienter sa caméra vers elle, (iii) rester à une distance dite « sociale » convenable², et enfin (iv) la suivre ou la guider selon la mission assignée. Nous pensons que l'asservissement visuel peut être intéressant pour répondre à cette problématique. Nous souhaitons donc poursuivre les travaux que nous avons initiés selon les axes suivants. Tout d'abord, la qualité du mouvement de suivi reste encore perfectible, notamment lorsque l'utilisateur se déplace. En effet, si nous sommes parvenus à positionner le robot face à une personne d'intérêt immobile, les résultats sont de moins bonne qualité lorsqu'elle se déplace, son mouvement n'étant jamais estimé. Nous prévoyons donc de nous intéresser à ce problème. Nous pensons dans un premier temps reprendre les méthodes mentionnées plus haut dans le cas d'un objet inanimé pour étudier sa possible adaptation dans ce contexte particulier. Notre première piste d'amélioration est donc similaire à celle évoquée dans la partie précédente. Cependant, avant de nous intéresser à ce problème, notre priorité sera orientée vers la sécurité. En effet, nous avons déjà mentionné ce point plusieurs fois dans notre manuscrit, sans jamais vraiment le traiter, du moins lorsque le robot se déplace vis-à-vis de l'homme. Nous allons donc dans cette thématique porter nos efforts sur l'évitement de piétons³. De premiers résultats ont déjà été obtenus dans le cas d'une personne statique, repérée à l'aide d'un détecteur de jambes⁴ à partir des informations laser. Sur cette base, nous avons développé une première loi de commande répondant au problème. Celle-ci reste encore à finaliser mais les premiers tests expérimentaux sont encourageants. Nous poursuivrons

2. Cette distance doit être fixée de manière à ce que le robot ne soit pas trop près de l'homme pour ne pas envahir son espace, mais pas trop loin afin que l'interaction soit effective.

3. Rappelons que la distinction entre la personne d'intérêt et les autres passants se fait automatiquement grâce au tag RFID.

4. Ce détecteur a été développé au LAAS par F. Lerasle et A. Mekkonen.

donc cette seconde piste, en collaboration avec N. Ouadah et A. Durand Petiteville, pour finaliser ces résultats puis considérer l'évitement de piétons mobiles, ce qui nécessitera là-encore l'estimation du mouvement de ces derniers.

Nous avons présenté ici les axes de recherche futurs concernant nos travaux « historiques ». Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons récemment ouvert un thème de recherche, plus novateur, orienté vers l'asservissement visuel de systèmes complexes avec un objectif de coordination. Nous parlerons ainsi souvent dans la suite « d'asservissement visuel coordonné ».

VI.2 Coordination de systèmes complexes par asservissement visuel

Depuis quelques années, l'évolution de la robotique conduit au développement de systèmes mobiles, d'architecture complexe, dédiés à l'interaction avec l'homme. Ces systèmes, souvent anthropomorphes (robots humanoïdes, plateformes mobiles à deux bras, etc.), disposent d'un grand nombre de degrés de liberté et sont conçus pour assister les personnes dans leur travail (« co-worker ») ou bien leur vie quotidienne (aide aux handicapés ou aux séniors). Les missions du robot vont donc progressivement évoluer et ne se restreindront plus à un simple déplacement ou une saisie d'objet. Des aspects liés à la coordination nous semblent appelés à devenir incontournables. En effet, les tâches possibles peuvent aller du déplacement coordonné de plusieurs robots mobiles à la réalisation de travaux de manipulation comme ouvrir une bouteille, servir un verre, ou encore, dans un cadre plus industriel, assembler des composants. La littérature propose de nombreux travaux traitant de la coordination. Nous souhaitons pour notre part l'aborder sous l'angle de l'asservissement visuel. Cette discipline a en effet acquis une certaine maturité qui lui permet maintenant d'être exploitée avec profit pour commander des robots d'architecture complexe et réaliser des tâches évoluées (cf. annexe A). Malgré cela, à notre connaissance, elle n'a été jusqu'ici que peu employée pour traiter les problèmes de coordination. Dans ce contexte, il nous semble intéressant de tirer parti de nos travaux historiques pour proposer des stratégies de commande référencées multi-capteurs permettant de coordonner les mouvements de systèmes robotiques complexes. Dans un premier temps, nous avons choisi de nous focaliser sur des aspects manipulation. Nous avons ainsi ouvert récemment un nouvel axe de recherche consacré à l'asservissement visuel coordonné d'un robot à deux bras muni d'une ou plusieurs caméras. Nous proposons ci-dessous nos premières réflexions sur ce thème.

VI.2.1 Vers l'asservissement visuel coordonné d'un système à deux bras

Ce travail est mené en collaboration avec D. Sidobre, maître de conférences à l'université P. Sabatier, dont la thématique de recherche est centrée autour de la manipulation. Notre objectif est ici de coordonner par asservissement visuel un système robotique composé de deux bras manipulateurs, chacun d'entre eux étant muni d'une caméra embarquée. A notre connaissance, à l'heure actuelle, seuls quelques travaux se sont intéressés au problème de l'asservissement visuel dans le cadre de la coopération [Han *et al.* 2000, Lee *et al.* 2005, Miyabe *et al.* 2003, Hynes *et al.* 2006]. Cependant, dans ces travaux, la coordination est soit inexistante, soit très limitée. Afin d'aller vers une coopération plus efficace, différentes questions, ouvertes, doivent être abordées : le positionnement des capteurs, l'exploitation des différentes images disponibles, l'expression de l'impact du mouvement d'un bras dans l'image renvoyée par la caméra embarquée sur l'autre, la prise en compte du mouvement de chaque bras dans la commande de l'autre, l'expression de la coordination elle-même, etc.

Nos premières réflexions ont été menées dans le cadre de deux stages de master [Boissinot 2008, Khalfaoui 2009]. Dans le premier, nous nous sommes focalisés sur la faisabilité du problème et sur la manière d'utiliser au mieux les images renvoyées par les deux caméras embarquées. Nous avons en

autre évalué l'intérêt d'utiliser des approches basées sur le séquençement de correcteurs. Nous avons ainsi développé une stratégie de commande permettant de refermer un stylo. Cependant, seul le bras portant le capuchon était piloté à partir de l'une ou l'autre des caméras selon les besoins, le second manipulateur restant immobile. Ce travail a donc conduit à une coordination plutôt limitée mais a montré tout l'intérêt d'exploiter différentes images dans la réalisation d'une tâche aussi complexe. Dans le prolongement de ces résultats, nous avons commencé à répondre aux deuxième et troisième questions évoquées plus haut. Nous avons exprimé la variation des signaux visuels dus aux mouvements des bras et synthétisé de premières lois de commande les prenant en compte. Les résultats obtenus, bien qu'encore très partiels, ont montré la pertinence de l'approche [Khalfaoui 2009]. A l'issue de ces travaux, de nombreuses pistes sont à suivre : l'amélioration de la stratégie de commande proposée pour la coordination des bras, la gestion de la redondance due aux nombreux degrés de liberté présents, la prise en compte des collisions et des occultations susceptibles de se produire pendant la tâche, ou encore l'étude du positionnement des caméras avec introduction éventuelle d'un capteur supplémentaire déporté. Un couplage des informations de force et de vision pour la manipulation serait également intéressant, mais se situe dans des perspectives à plus long terme.

Les quelques pistes de réflexion que nous avons évoquées jusqu'à présent répondent à des besoins ou des tâches réalisées dans le macro-monde. Cependant, actuellement, la demande pour des systèmes automatiques permettant d'agir aux échelles microscopiques ne cesse de s'accroître. Ce besoin est particulièrement marqué dans le domaine de la manipulation cellulaire ou biomicromanipulation. Nous pensons que des stratégies de commande évoluées basées sur la vision, offrant éventuellement des capacités de coordination, peuvent aider à automatiser ce type de tâche. Ces derniers aspects, au cœur du projet BM2V (BioMicroManipulation par asservissement Visuel), sont présentés ci-après.

VI.2.2 Vers l'automatisation des tâches de biomicromanipulation par asservissement visuel

Nous nous intéressons ici au problème de la biomicromanipulation. Il s'agit d'agir sur ou d'inter-agir avec des cellules biologiques. Une grande variété d'applications est envisageable : caractérisation de cellules en vue de déterminer un modèle biophysique, micro-injection de solutions pour tester de nouvelles molécules ou réaliser des opérations de type fécondation in vitro, isolement de cellules particulières à des fins d'analyse (e.g., cellules cancéreuses), etc. La plupart des solutions techniques actuelles permettant de réaliser ce type de tâches reposent sur une automatisation souvent partielle et spécifique à une application ou bien encore sur des procédés de téléopération. Ceux-ci conduisent à des temps d'exécution importants, à des opérations imprécises et peu reproductibles, et au final à des taux d'échec souvent non négligeables. En outre, il est à noter que certaines tâches telles que l'isolement de cellules à des stades de développement donnés ne peuvent encore être réalisées, faute d'outil adapté. Il y a donc un vrai besoin de solutions scientifiques et techniques permettant d'automatiser ce type de tâches. Une plateforme robotisée, équipée du matériel adéquat (microscope, micro-manipulateur, etc.), pourrait répondre à ce besoin.

De notre point de vue, l'automatisation des tâches de biomicromanipulation passe par le développement de techniques perceptuelles et de stratégies de commande évoluées adaptées au micro-monde biologique. En effet, il est impossible de transférer directement les techniques appliquées en robotique « conventionnelle » à cause du changement d'échelle. Plusieurs difficultés spécifiques peuvent être mises en exergue : prédominance des forces surfaciques (électrostatique, Van der Waals, capillarité) devant les forces volumiques traditionnelles (gravité, inerties, etc.), mécanique du contact et interactions complètement modifiées, influence de l'environnement non négligeable (température, humidité, rayonnements, etc.), impératifs de précision drastiques, besoin d'interfaces spécifiques pour

percevoir et agir à ces échelles, etc. D'une manière générale, dans le domaine de la perception pour la biomicromanipulation, ce sont principalement les techniques basées sur la vision qui prédominent [Li *et al.* 2001], bien que des travaux exploitent aussi le retour d'effort [Pillariseti *et al.* 2006]. Aussi, il apparaît intéressant d'exploiter les techniques basées sur l'asservissement visuel pour piloter les micro-manipulateurs. La plupart des résultats proposés dans la littérature sont dédiés à l'assemblage de micro-composants [Kim & Menq 2005, Haliyo *et al.* 2006, Tamadazte *et al.* 2009, Duceux *et al.* 2010]. Bien que l'asservissement visuel ait été intensivement exploité dans le contexte biomédical à l'échelle macroscopique, il n'est encore que rarement appliqué pour réaliser des tâches de biomicromanipulation cellulaire (quelques travaux plus ou moins récents pouvant néanmoins être pointés [Parvin *et al.* 1996, Mezouar & Allen 2002, Ogawa *et al.* 2005]). Cette technique semblant offrir des solutions intéressantes pour l'automatisation des tâches de biomicromanipulation, nous souhaitons poursuivre dans cette voie. Pour cela, nous avons mis en place cette année une collaboration avec D. Folio, maître de conférences à l'ENSI de Bourges, dont la thématique est centrée autour de la micro-manipulation cellulaire. Le projet BM2V que nous présentons brièvement maintenant est le premier fruit de cette collaboration.

Ce projet vise à développer des solutions innovantes contribuant à automatiser la réalisation de tâches de biomanipulation cellulaire, l'objectif étant de proposer aux professionnels du monde biomédical un premier prototype, prêt à l'emploi, fiable et efficace. La plateforme robotisée envisagée sera équipée du matériel requis, en particulier un microscope, deux caméras (une frontale et une latérale), et deux micro-manipulateurs nécessaires pour l'application considérée (isolement de mélanocytes). Afin de mener à bien ce projet, plusieurs éléments scientifiques et techniques devront être pris en compte. Nous nous focalisons ici uniquement sur la commande qui sera au centre de notre contribution à ce projet. Différents aspects relevant de ce thème devront être traités : asservissements visuels mono et multi-images pour positionner précisément les micro-manipulateurs, gestion des éventuels problèmes de collision et d'occultation, coordination des deux micro-manipulateurs lorsque requis par la tâche, contrôle d'exécution de l'opération, etc. Un couplage avec les informations de force pourra être considéré, bien que ce type de problématique n'ait été abordé que très récemment à l'échelle microscopique [Huang *et al.* 2009]. Nous retrouvons donc ici un grand nombre de nos préoccupations déjà mentionnées dans nos contributions et nos perspectives, tirant ainsi un trait d'union entre nos travaux, passés, présents et futurs. Cette dernière piste est en outre une opportunité d'ouvrir notre thématique de recherche à un domaine actuellement en plein essor et qui apparaît comme un nouveau champ d'application de l'asservissement visuel. Elle pourrait aussi s'inscrire au sein de l'axe transversal « interactions avec le vivant » défini au LAAS pour les années à venir. Enfin, au-delà de ces considérations, d'un point de vue plus personnel, c'est aussi et surtout une occasion de contribuer aux progrès de la recherche médicale, ce qui donne « plus de sens » à nos propres travaux.

Petit panorama de la thématique

« asservissement visuel »

Sommaire

A.1 Les structures de commande fondatrices de l'asservissement visuel	111
A.2 Les évolutions	113
A.2.1 Fondements théoriques	113
A.2.2 Applications	115
A.3 Conclusion	115

L'asservissement visuel consiste à exploiter les informations visuelles renvoyées par une ou plusieurs caméras, embarquées ou déportées, dans la loi de commande afin de contrôler les mouvements d'un système robotique donné [Hutchinson *et al.* 1996, Chaumette 2002, Chaumette & Hutchinson 2006]. Ce type d'approche a été exploitée avec profit pour réaliser des tâches de plus en plus évoluées, allant de la manipulation à la navigation dans des cadres applicatifs variés. Par nature, l'asservissement visuel apparaît comme une discipline transverse, située aux confluent de la vision et de la commande, qui resserre le lien entre la perception et l'action [Chaumette 2002]. Lorsque l'on souhaite réaliser une tâche par asservissement visuel, de nombreux aspects relevant de ces deux thématiques devront être abordés. Ils concernent essentiellement [Chaumette 2002, Chaumette 2003, Chaumette 2007a] : la modélisation du capteur et le choix des primitives visuelles d'une part ; la synthèse de lois de commande efficaces et robustes, capables de prendre en compte les contraintes nécessaires, d'autre part. Ces différents points, souvent inter-connectés, constituent le cœur des recherches menées dans le cadre de cette thématique. De plus, le domaine applicatif, ainsi que le type de robot utilisé, doivent également être considérés car ils peuvent conduire à des difficultés spécifiques.

Nous présentons ci-après un bref rappel historique des premières techniques qui ont jeté les bases de l'asservissement visuel tel que nous le connaissons aujourd'hui. Nous tentons ensuite de dégager les grandes évolutions et tendances de cette thématique avant de conclure en montrant sa maturité.

A.1 Les structures de commande fondatrices de l'asservissement visuel

Historiquement, les débuts de l'asservissement visuel se situent dans les années 1970 [Corke 1996]. Les premiers travaux relevant de cette discipline sont en effet ceux développés par Shirai et Inoue en 1973 [Shirai & Inoue 1973]. Il s'agissait ici d'aller saisir un objet cubique et de le déposer dans une boîte à partir des données renvoyées par une caméra fixée dans l'environnement. Le robot était asservi à partir de l'information de situation déterminée à partir des images. Plus tard, en 1979, Hill et Park réalisaient le suivi et la saisie d'objets mobiles [Hill & Park 1979]. L'image est encore une fois traitée pour fournir la position dans le plan et une estimation grossière de la profondeur. Celle-ci est

raffinée en projetant un motif lumineux qui est aussi utilisé pour déterminer l'orientation. Enfin, les effets dynamiques intervenant dans la boucle de commande sont également abordés. Dans la même année, Prajoux s'intéresse à l'asservissement visuel d'un système à deux degrés de liberté permettant de suivre un crochet oscillant. Il synthétise un observateur permettant de prédire le mouvement du crochet [Prajoux 1979]. Ainsi, les « travaux-pionniers » mentionnés plus haut partagent une caractéristique commune : une étape de reconstruction 3D permettant de déterminer la situation à partir des images est obligatoire. Les tout premiers asservissements visuels ainsi réalisés étaient alors dits 3D (ou position-based) car basés sur des informations de position (ou de situation) extraites de l'image (cf. remarque 10). Dans les années 1980, les progrès techniques ont permis d'extraire les indices visuels dans des cadences plus compatibles avec celle de l'asservissement. C'est ainsi qu'a vu le jour le premier asservissement visuel 2D (ou image-based) développé par L.E. Weiss [Weiss 1984] (cf. remarque 10). Restreints à des bras manipulateurs à trois degrés de liberté, ces travaux ont été ensuite étendus par J. Feddema [Feddema 1989]. Les activités de recherche n'ont alors cessé de s'intensifier autour de ce domaine, conduisant à de nombreux résultats dont l'élaboration du formalisme des fonctions de tâche [Samson *et al.* 1991, Espiau *et al.* 1992] et son application à la commande référencée vision de bras manipulateurs [Chaumette 1990] et de robots mobiles [Pissard-Gibollet 1993]. Le lecteur intéressé peut se reporter à [Corke 1996] pour un survol plus détaillé de ces techniques entre 1970 et 1996.

Ainsi, deux structures de commande émergent de cette première période historique : l'asservissement visuel 3D (ou position-based) et l'asservissement visuel 2D (ou image-based), donnant lieu à la classification proposée par Sanderson et Weiss [Sanderson & Weiss 1980].

Remarque 10 *Il est à noter que cette classification prend en compte de plus le niveau de commande. Ainsi, on parlera plutôt d'une structure de type « position-based (ou image-based) dynamic look and move » lorsque la commande du robot est gérée par un asservissement de position, la notion de « position-based ou image-based visual servoing » s'appliquant lorsque cette boucle n'intervient pas [Corke 1996]. Le terme « asservissement visuel » étant largement utilisé dans la littérature pour désigner tout asservissement reposant sur des données visuelles, nous confondrons improprement dans ce manuscrit ces différentes structures de commande. Nous distinguerons donc simplement les asservissements visuels 3D (ou position-based) et 2D (ou image-based).*

Les premiers efforts effectués dans cette thématique ont porté sur l'analyse et la comparaison de ces techniques. Celles-ci ont permis de mettre en avant les forces et faiblesses respectives de ces deux types de commande [Chaumette 1998, Martinet 1999, Gans *et al.* 2003]. Ainsi, l'asservissement visuel 3D reposant sur des informations de situation entre le capteur et l'amer d'intérêt est connu pour sa grande sensibilité aux erreurs de modèle et de calibration. De plus, bien qu'offrant une bonne maîtrise des trajectoires 3D effectuées par le robot, cette approche ne permet pas de gérer le mouvement des indices visuels dans l'image, ce qui peut conduire à la perte de l'amer d'intérêt. L'asservissement visuel 2D exploite quant à lui directement les indices visuels extraits de l'image. Il permet donc de s'affranchir de toute phase de localisation, ce qui présente l'avantage de réduire les temps de calcul et de le rendre plus robuste aux différentes incertitudes mentionnées plus haut. Cependant, même s'il est possible de mieux maîtriser les trajectoires effectuées par les informations visuelles, la gestion des mouvements correspondants du robot s'avère impossible. Dans certains cas, des minima locaux ou des problèmes de singularité peuvent apparaître. La prise en compte des contraintes nécessaires à la réalisation de toute tâche référencée vision apparaît donc difficile [Allibert *et al.* 2010].

A.2 Les évolutions

Les premières améliorations significatives ont été élaborées dès la fin des années 90. C'est en effet à partir de cette date que les solutions proposées vont permettre de répondre à des problèmes de plus en plus complexes, riches et réalistes. Les recherches poursuivies se sont orientées autour de trois axes scientifiques relevant de la vision, de la commande, ou bien se situant à leurs confluent [Chaumette 2003, Chaumette 2007a]. Dans le même temps, les domaines d'application de l'asservissement visuel ainsi que les systèmes robotiques considérés n'ont cessé de se diversifier, venant par là-même influencer les recherches menées dans chacun des axes scientifiques précédents.

Nous présentons ci-après les évolutions principales de cette thématique en séparant les avancées correspondant aux fondements théoriques de celles liées aux applications.

A.2.1 Fondements théoriques

Les premiers travaux menés ont cherché à analyser en profondeur les structures de commande évoquées plus haut et à répondre à leurs limitations. Ainsi, la fin des années 90 a tout d'abord été marquée par l'émergence de nouvelles stratégies dites « partitionnées » telles que [Malis 1998, Deguchi 1998, Corke & Hutchinson 2001] par exemple. Elles permettent de contrôler séparément les degrés de liberté de la caméra, conduisant à un fort découplage de la loi de commande et à une meilleure maîtrise des mouvements du robot. Ce découplage facilite de plus l'analyse du système (stabilité, robustesse, etc.) [Malis & Chaumette 2002]. Toujours basée sur le principe du couplage d'informations 2D et 3D, une autre approche appelée asservissement visuel 2D étendu a été développée dans [Schramm *et al.* 2004]. Elle offre la possibilité de caractériser l'ensemble des minima locaux, de générer des trajectoires satisfaisantes et de garantir la stabilité asymptotique du système. Enfin, très récemment, une nouvelle méthode, consistant à introduire progressivement des informations 2D dans un asservissement visuel 3D pour préserver la visibilité de l'amer d'intérêt a été proposée dans [Kermorgant & Chaumette 2011b].

Dans le prolongement de ces nouvelles structures de commande, des travaux ont été menés pour évaluer les différents types d'asservissements visuels existants. Ainsi, par exemple, les performances des différentes structures de commande ont été comparées dans [Martinet 1999, Gans *et al.* 2003]. Les problèmes potentiels de convergence des asservissements visuels 2D et 3D ont été mis en évidence dans [Chaumette 1998]. Enfin, des analyses de stabilité en présence d'erreurs de calibration ou d'incertitudes sur la profondeur [Taylor & Ostrowski 2000, Espiau 1993, Malis *et al.* 1999, Malis & Chaumette 2002, Malis & Rives 2003] ont aussi été réalisées. D'autres techniques issues de l'automatique avancée telles que les LMI par exemple ont également été exploitées pour caractériser la région de convergence et étudier la sensibilité [Bellot 2002, Danès & Coutinho 2006, Danès *et al.* 2010]. Le lecteur intéressé trouvera dans [Morel *et al.* 2005] un survol plus complet des différentes approches s'intéressant à la robustesse des asservissements visuels entre 1990 et 2005. Plus récemment, des travaux se sont intéressés à la propagation des erreurs de mesure pour des asservissements visuels de type 3D et 2D 1/2 [Kyrki *et al.* 2006, Kyrki 2009] ainsi qu'à l'évaluation de la précision du positionnement final en présence de ces mêmes erreurs [Chesi *et al.* 2010].

Les travaux précédents ont d'une part permis d'améliorer la robustesse des asservissements visuels. D'autre part, ils ont apporté une première réponse à la prise en compte des contraintes nécessaires à la réalisation de la tâche. Ces contraintes peuvent être classifiées en deux groupes [Kazemi *et al.* 2010, Allibert *et al.* 2010] : *contraintes 2D* liées à la visibilité du motif visuel d'intérêt et éventuellement aux problèmes de minima locaux ou de singularité de la matrice d'interaction ; *contraintes 3D* relatives à la trajectoire effectuée par le robot et à ses limites physiques (bornes de l'espace de travail, présence

d'obstacles, singularités éventuelles du système, non-saturation des actionneurs, etc.).

La prise en compte de ces contraintes apparaît essentielle pour pouvoir réaliser des tâches évoluées dans des environnements peu connus et réalistes. La littérature propose trois grandes approches [Allibert *et al.* 2010]. La première consiste à concevoir des indices visuels adéquats permettant d'avoir de bonnes propriétés de découplage (cf. par exemple [Mahony *et al.* 2002, Tahri 2004]). Les structures de commande hybrides telles que l'asservissement visuel 2D1/2 peuvent aussi relever de ce type d'approche. La seconde option consiste à coupler l'asservissement visuel avec des techniques de planification. Grâce à ce type d'approche, il est possible de considérer les contraintes de type 2D et/ou 3D [Mezouar & Chaumette 2002, Mezouar & Chaumette 2003, Zanne *et al.* 2003, Schramm & Morel 2006, Kazemi *et al.* 2009, Chesi 2009]. Le lecteur intéressé trouvera une très bonne synthèse et une analyse comparative des différents types de méthodes dans [Kazemi *et al.* 2010]. Enfin, la dernière solution consiste à exploiter des techniques avancées de commande telles que la commande optimale [Hashimoto & Kimura. 1993], les LMIs [Gao 2006, Danès & Bellot 2006, Durola *et al.* 2009, Tarbouriech & Souères 2010], ou la commande prédictive [Allibert *et al.* 2010]. Il est aussi possible de s'appuyer sur la redondance [Chaumette & Marchand 2000, Mansard & Chaumette 2005, Ma & Hutchinson 2010, Marey & Chaumette 2010b] ou bien sur le séquençement de tâches (ou de correcteurs) et la théorie des systèmes hybrides [Cadenat 1999, Hashimoto & Noritsugu 2000, Souères & Cadenat 2003, Chesi *et al.* 2004, Deng *et al.* 2005, Folio 2007, Mansard & Chaumette 2007, Gans & Hutchinson 2007]. D'autres structures de commande sont également envisageables. Ainsi, par exemple, peut-on noter la prise en compte explicite des contraintes de non holonomie en asservissement visuel à l'aide du formalisme des fonctions transverses [Morin & Samson 2003, Artus *et al.* 2003] et de la géométrie différentielle [Lopes & Koditschek 2007, López-Nicolás *et al.* 2010].

En utilisant ces différentes techniques, il est possible de considérer des contraintes dans la loi de commande et donc de pouvoir réaliser des tâches plus évoluées. Cependant, certaines tâches ne peuvent être réalisées sur la seule base de la vision. Il faut coupler cette dernière à des informations sensorielles complémentaires issues d'autres capteurs. La loi de commande obtenue est alors dite référencée multi-capteurs. Ainsi, certains travaux proposent de coupler des données fournies par des capteurs de force aux indices visuels extraits de l'image [Malis *et al.* 2001, Mezouar *et al.* 2007, Prats *et al.* 2007]. Dans le cas de la robotique mobile, il peut être intéressant de bâtir la loi de commande sur des mesures visuelles et proximétriques [Ohya *et al.* 1998, Cadenat 1999, Folio 2007, Cherubini & Chaumette 2010]. Enfin, il est aussi envisageable de considérer des données visuelles issues de plusieurs caméras [Malis *et al.* 2000, Flandin *et al.* 2000, Lippiello *et al.* 2005, Dune *et al.* 2007, Kermorgant & Chaumette 2011c] ou bien encore de traiter ensemble des informations proprioceptives et extéroceptives [Kermorgant & Chaumette 2011a].

Enfin, ce petit panorama ne serait pas complet sans évoquer les structures de commande n'utilisant pas d'information géométrique. Parmi celles-ci, nous pouvons citer l'asservissement visuel d2D/dt qui cherche à asservir le champ des vitesses dans l'image [Crétual 1998]. Plus récemment, des travaux ont proposé de bâtir la loi de commande à partir des données photométriques extraites de l'image. Un intéressant survol de ces dernières techniques est proposé dans [Collewet & Marchand 2011, Dame & Marchand 2011].

Nous avons ici essayé de mettre en exergue l'essentiel des avancées scientifiques effectuées dans le domaine de l'asservissement visuel. Les efforts ont porté sur l'amélioration de la robustesse ainsi que sur la prise en compte de contraintes. Des lois de commande intégrant des informations sensorielles complémentaires de même nature ou non ont aussi vu le jour. Grâce à ces avancées, il devient possible d'aller vers la réalisation de tâches plus évoluées dans des environnements de plus en plus réalistes,

élargissant ainsi les domaines d'application considérés. Quelques éléments sur ce dernier point sont donnés ci-après.

A.2.2 Applications

Les champs d'application de l'asservissement visuel sont très variés. Si certains travaux relèvent de domaines originaux tels que la réalité virtuelle [Marchand & Chaumette 2002] ou la réalité augmentée [Comport *et al.* 2006], la plupart des réalisations s'inscrivent dans le domaine de la robotique.

Si les tâches considérées à l'origine étaient centrées autour de la robotique de manipulation [Kragic & Christensen 2002], le champ d'application s'est élargi à la robotique mobile dans les années 90. En effet, l'asservissement visuel a été utilisé avec profit pour réaliser des tâches de navigation [Pissard-Gibollet 1993, Swain 1999, Cadenat 1999], de guidages automatiques de véhicules [Khadraoui 1996, Martinet & Thibaud 2000], ou bien encore des grands déplacements [Vassalo *et al.* 2000, Gaspar *et al.* 2000, Remazeilles 2004, Blanc *et al.* 2005, Kralník & Přeučil 2008, Courbon *et al.* 2009, Cherubini & Chaumette 2009, Cherubini & Chaumette 2010]. Autour de l'an 2000, de nouveaux systèmes robotiques mobiles ont été considérés, ouvrant par là-même de nouveaux domaines applicatifs pour l'asservissement visuel. Ainsi, cette technique a permis de contrôler des engins volants variés (avions [Bourquardez & Chaumette 2007], hélicoptères [Hamel & Mahony 2002, Guénard *et al.* 2007], dirigeables [Rives & Azinheira 2004, Huang *et al.* 2005]), ou bien encore des robots humanoïdes [Mansard *et al.* 2007, Vahrenkamp *et al.* 2008]. Elle a également été utilisée pour des systèmes robotiques à deux bras [Miyabe *et al.* 2003, Hynes *et al.* 2006], ainsi que pour des manipulateurs mobiles [Tsakiris *et al.* 1996, De Luca *et al.* 2007], faisant le lien entre les problématiques de manipulation et de navigation qui constituaient le cœur des applications entre 1990 et 2000. En marge de ces réalisations diverses, la robotique médicale est aussi devenue dans la dernière décennie un terrain d'application privilégié de l'asservissement visuel. De très nombreux travaux ont en effet été menés sur cette thématique : aide au geste chirurgical en chirurgie laparoscopique [Krupa *et al.* 2003, Nageotte *et al.* 2006, Osa *et al.* 2010], guidage d'instruments [Vittrani *et al.* 2007, Mebarki *et al.* 2010], compensation des mouvements cardiaques et respiratoires [Gangloff *et al.* 2006], etc. Ces dernières années, de nouveaux domaines d'application ont émergé. Parmi ceux-ci, l'un des plus prometteurs est l'exploitation de l'asservissement visuel pour manipuler aux échelles microscopiques. La plupart des résultats proposés dans la littérature microrobotique sont dédiés à l'assemblage de micro-composants [Feddema & Simon 1998, Kim & Menq 2005, Tamadazte *et al.* 2010, Duceux *et al.* 2010]. Cependant, quelques applications dans le domaine de la microbiologie existent : manipulation de brins d'ADN [Parvin *et al.* 1996], saisie de protéines [Mezouar & Allen 2002], contrôle de mouvements de micro-organismes [Ogawa *et al.* 2005], etc.

Ainsi, initialement restreint à la robotique de manipulation [Kragic & Christensen 2002], le champ d'application de l'asservissement visuel s'est progressivement élargi vers des thématiques variées. Aujourd'hui, de nouveaux domaines prometteurs tels que la micro et bientôt la nanorobotique émergent, signe de l'adaptabilité de ce type d'approche.

A.3 Conclusion

L'asservissement visuel a beaucoup évolué depuis ses débuts et les premiers travaux de Shirai et Inoue [Shirai & Inoue 1973]. Des progrès significatifs ont été faits avec l'amélioration des techniques existantes pour les rendre plus robustes et plus précises, le développement de nouveaux types d'asservissements visuels basés sur des informations visuelles variées et l'exploitation de techniques de

commande avancées. Enfin, les domaines applicatifs de l'asservissement visuel se sont grandement diversifiés et couvrent des thématiques variées s'inscrivant à la fois dans et en dehors de la robotique.

La littérature sur ce sujet est abondante. Loin de chercher à être exhaustif dans notre survol, notre objectif était ici de pointer l'essentiel des avancées effectuées dans ce domaine. Le lecteur intéressé trouvera un bilan plus détaillé des activités menées en asservissement visuel dans [Corke 1996, Chaumette 2003, Chaumette 2007a]¹. Outre les travaux mentionnés précédemment, on peut signaler l'existence de trois tutoriaux [Hutchinson *et al.* 1996, Chaumette & Hutchinson 2006, Chaumette & Hutchinson 2007], de trois chapitres de livres [Chaumette 2002, Chaumette 2007b, Chaumette & Hutchinson 2008], ainsi que d'un recueil décrivant l'exploitation des techniques numériques les plus récentes pour l'asservissement visuel [Chesi & Hashimoto 2010]. Ces éléments montrent que l'asservissement visuel est désormais une discipline mature et porteuse. Il devrait connaître des développements riches dans les prochaines années, de par ses champs d'application divers et variés.

1. Le travail proposé ici s'est d'ailleurs appuyé sur ces trois documents.

Description des différents systèmes robotiques utilisés dans nos travaux

Sommaire

B.1 Super Scout II	117
B.2 Rackham	117
B.3 Pekee II	118
B.4 Modélisation de ces robots	119

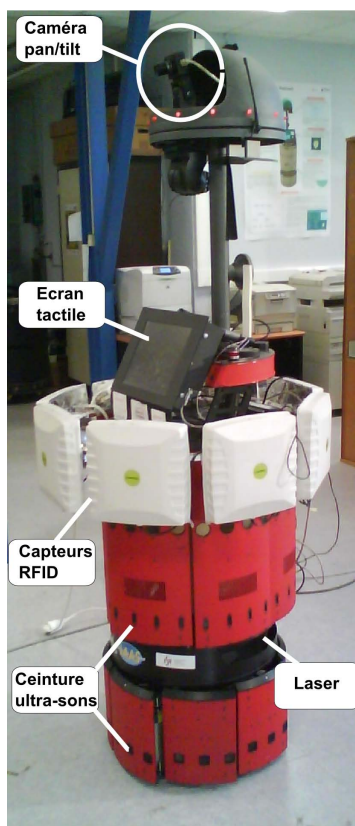
Nous décrivons ici de manière plus détaillée que dans la partie [V.1](#) les systèmes robotiques sur lesquels nous avons travaillé. Comme nous l'avons déjà mentionné, tous les robots représentés sur la figure [B.1](#) ont été équipés des capteurs nécessaires à la réalisation des tâches de navigation souhaitées (caméras, dispositifs de détection d'obstacles, etc.). Une brève description de chacun de ces systèmes robotiques est présentée ci-dessous.

B.1 Super Scout II

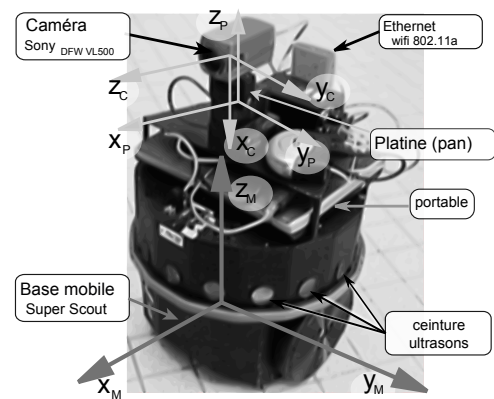
Ce robot a été développé par la société Nomadic Technologies, et mis à notre disposition par l'AIP-PRIMECA de Toulouse. Le Super Scout est constitué d'une base mobile de type char principalement destinée à une utilisation en intérieur. D'architecture cylindrique (35 cm de diamètre pour 35 cm de hauteur), il pèse 15 kg environ (sans les batteries). Il possède deux roues motrices indépendantes commandables en vitesse. Le Super Scout est également doté d'une ceinture de seize capteurs ultrasoniques, de contacteurs (bumpers) et d'odomètres. Il comprend un système de commande multiprocesseurs bas niveau qui commande à la fois les capteurs, le mouvement ainsi que la communication. À un niveau plus élevé, le Super Scout est piloté par un PC-portable embarqué, évoluant sous une distribution Linux et disposant d'une architecture logicielle nommée GenoM (Generator of Module) élaborée au LAAS. De plus, notre plateforme est équipée d'une caméra numérique couleur Sony DFW-VL 500 [[Sony 2001](#)], supportant la norme IEEE 1394. Cette caméra possède des pixels carrés permettant de ne pas modifier les proportions des objets perçus. Elle délivre des images au format VGA non compressé. Elle propose différentes résolutions (160×120 , 320×240 ou 640×480) et différents modes de compression pour l'acquisition des images vidéo (YUV 444, YUV 422 ou YUV 411). Ce robot n'est à ce jour plus utilisé.

B.2 Rackham

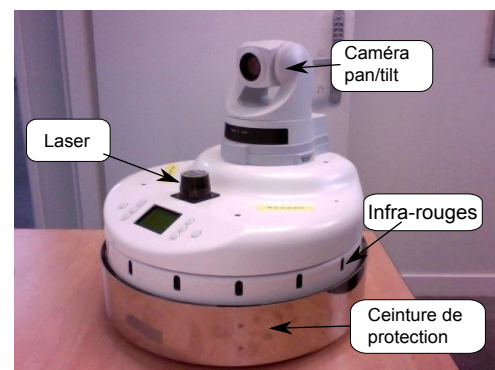
Rackham est un robot mobile de type B21R développé par la société iRobot. Tout comme les superscouts, il s'agit d'un robot dédié à la navigation en intérieur. Il est aussi d'architecture cylindrique (52 cm de hauteur pour un diamètre de 118 cm). Afin de pouvoir l'utiliser pour la réalisation de tâches



(a) Robot Rackham (iRobot).



(b) Robot Super Scout II (Nomadic Technologies).



(c) Robot Peeke II (Wany robotics).

FIGURE B.1 – Les différents systèmes robotiques utilisés.

d'interaction homme/robot, son équipement standard a été étendu avec différents éléments permettant de communiquer plus facilement avec l'utilisateur :

- une caméra Sony EVI-D70 mobile en tangage et lacet (non utilisée ici),
- une caméra numérique montée sur une platine développée par Direct Perception commandable en pan et tilt,
- un écran de contrôle tactile,
- un haut-parleur,
- des antennes RFID permettant de repérer un utilisateur porteur d'un badge dans un rayon de 4.5 m autour du robot.

Il est de plus équipé de différents capteurs de proximité (laser et ceinture d'ultrasons) afin de pouvoir détecter et éviter les obstacles situés à proximité. Enfin, il est piloté via un PC sur lequel tourne l'architecture logicielle Genom déjà embarquée sur les super scouts.

B.3 Peeke II

Le robot Peeke II est un robot non holonome développé par la société Wany Robotics et mis à notre disposition par l'AIP-PRIMECA de Toulouse. Son architecture mécanique est constituée d'une base cylindrique, de 38.7 cm de diamètre et de hauteur 22.5 cm (38, avec la caméra) pour un poids de 15 kg. La plateforme est commandée à l'aide d'un PC embarqué comprenant (entre autres) un processeur Intel Core2Duo T7100, 2 GB DDR2 de RAM, un disque dur de 80 GB, 1 port Ethernet,

et 1 Wireless LAN (WiFi) 802.11b/g. Il est de plus équipé :

- d’une caméra réseau Axis 214 PTZ. Elle est commandable en pan et tilt et offre des fonctionnalités de zoom. Le degré de liberté en tilt et le zoom n’ont pas été utilisés. La caméra fournit des images de taille 640×480 pour la valeur de la distance focale considérée (ici, 3.54 mm).
- d’un laser Hokuyo URG-04LX permettant de mesurer des distances comprises entre 2 cm et 5.6 m. La résolution angulaire est de 0.36 degrés pour un débattement angulaire de 240 degrés. La durée d’un scan est de 100 ms.
- de seize capteurs infrarouges de type Sharp GP2D120. Treize sont équirépartis (espacés de 22.5 degrés) sur la périphérie du châssis circulaire et trois sont situés à l’arrière. Chacun des capteurs peut être interrogé individuellement. Les capteurs sont capables de mesurer des distances comprises entre 5 et 200 centimètres. La fréquence maximale de mesure est de 10 Hz (100 ms).
- d’un détecteur anti-collision situé dans la ceinture de protection.

Les acquisitions des capteurs et l’envoi des commandes aux actionneurs sont réalisées grâce à une interface dédiée développée en C++ à l’AIP-PRIMECA. Ce robot a été acheté l’an dernier et est utilisé dans le cadre de nos activités de recherche et de certains de nos enseignements.

B.4 Modélisation de ces robots

Nous nous intéressons ici très brièvement à la modélisation des robots considérés. Comme nous l’avons vu plus haut, ces robots ont la même architecture mécanique. Ils peuvent donc tous être représentés par le schéma proposé sur la figure B.2.

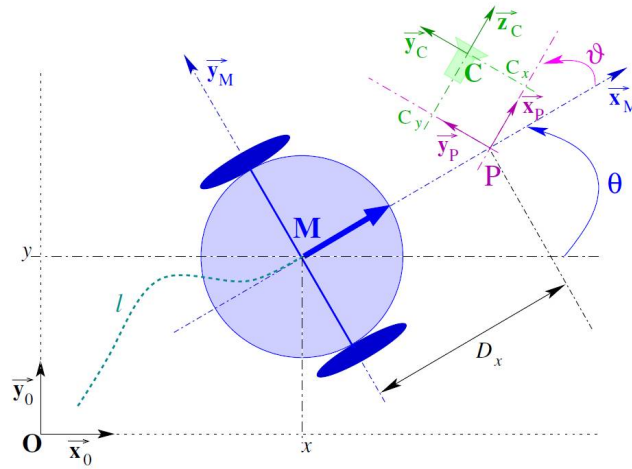


FIGURE B.2 – Modélisation de la base mobile équipée d’une caméra montée sur une platine.

Nous avons introduit plusieurs repères :

- le repère $\mathcal{R}_0$ lié à la scène,
- le repère $\mathcal{R}_M$ lié à la base mobile,
- le repère $\mathcal{R}_P$ lié à la platine,
- le repère $\mathcal{R}_C$ lié à la caméra.

La position du robot est exprimée par le couple (x, y) désignant les coordonnées du centre M de la base mobile par rapport à $\mathcal{R}_0$. Son orientation est définie par rapport à l’axe $\vec{x}_0$ par l’angle θ . Le centre de rotation de la platine est décalé par rapport au point M d’une longueur notée D_x . La position relative de la caméra dans le repère $\mathcal{R}_P$ est donnée par le couple (C_x, C_y) . Nous définissons de plus le vecteur des paramètres $q = (l \ \theta \ \vartheta)^T$ où l désigne l’abscisse curviligne du robot. En dérivant ce dernier

par rapport au temps, nous obtenons le vecteur de commande $\dot{q} = (v \ \omega \ \varpi)^T$ introduit plus haut. A partir de ces données, il est possible d'exprimer le torseur cinématique de la caméra par rapport au repère $\mathcal{R}_0$. Celui-ci s'écrit dans le repère $\mathcal{R}_C$ comme suit [Pissard-Gibollet 1993, Cadenat 1999] :

$$T_{C/\mathcal{R}_0}^{\mathcal{R}_C} = T_c = J \dot{q} \text{ où } J = \begin{pmatrix} -\sin \vartheta & C_x + D_x \cos \vartheta & C_x \\ \cos \vartheta & -C_y + D_x \sin \vartheta & -C_y \\ 0 & -1 & -1 \end{pmatrix} \dot{q} \quad (\text{B.1})$$

Il est à noter que, compte tenu de la géométrie du robot, la caméra ne dispose que de trois degrés de liberté : deux en translation selon les axes $\vec{x}_C$ et $\vec{z}_C$, ainsi qu'un en rotation autour de $\vec{x}_C$. Le torseur cinématique évoqué dans l'équation précédente est réduit aux trois vitesses correspondantes, les trois autres étant par construction strictement nulles puisque les mouvements correspondants sont impossibles. De ce fait, la jacobienne est carrée et il est possible de montrer que son déterminant est non nul quelle que soit la configuration. Elle est donc toujours inversible. De plus amples détails sur la modélisation de ce type de robot sont disponibles dans [Pissard-Gibollet 1993, Cadenat 1999].

Bibliographie

- [Allibert *et al.* 2010] G. Allibert, E. Courtial et F. Chaumette. *Predictive Control for Constrained Image-Based Visual Servoing*. IEEE Trans. on Robotics, vol. 26, no. 5, pages 933–939, October 2010. [52](#), [112](#), [113](#), [114](#)
- [Argyros *et al.* 2001] A. Argyros, C. Bekris et S. Orphanoudakis. *Robot homing based on corner tracking in a sequence of panoramic views*. In IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Hawaii, USA, December 2001. [41](#)
- [Artus *et al.* 2003] G. Artus, P. Morin et C. Samson. *Tracking of an omnidirectional target with a nonholonomic mobile robot*. In International Conference on Advanced Robotics, ICAR'03, pages 1468–1473, 2003. [114](#)
- [Axis 2008] Axis. *AXIS 214 PTZ Network Camera*, 2008. [44](#)
- [Becera & Sagues 2008] H. M. Becera et C. Sagues. *A Sliding Mode Control Law for Epipolar Visual Servoing of Differential-Drive Robots*. In IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, 2008. [96](#)
- [Bellot 2002] D. Bellot. *Contribution à l'analyse et à la synthèse de schémas de commande référencée vision*. PhD thesis, Université P. Sabatier, Toulouse, December 2002. [84](#), [113](#)
- [Benhimane & Malis 2003] S. Benhimane et E. Malis. *Vision-based control with respect to planar and non-planar objects using a zooming camera*. In IEEE International Conference on Advanced Robotics, pages 991–996, Coimbra, Portugal, July 2003. [67](#)
- [Bensalah 1996] F. Bensalah. *Estimation du mouvement par vision active*. PhD thesis, Université de Rennes I, 1996. [106](#)
- [Blanc *et al.* 2004] G. Blanc, O. Ait-Ader, Y. Mezouar, T. Chateau et P. Martinet. *Autonomous image-based navigation in indoor environment*. In Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lisboa, Portugal, July 2004. [41](#)
- [Blanc *et al.* 2005] G. Blanc, Y. Mezouar et P. Martinet. *Indoor navigation of a wheeled mobile robot along visual routes*. In International Conference on Robotics and Automation, Barcelona, Spain, 2005. [41](#), [88](#), [115](#)
- [Boissinot 2008] D. Boissinot. *Asservissement visuel coordonné pour un manipulateur mobile à deux bras*. Master's thesis, Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 2008. [107](#)
- [Bonin-Font *et al.* 2008] F. Bonin-Font, F. Ortiz et G. Oliver. *Visual navigation for mobile robots : a survey*. Journal of intelligent and robotic systems, vol. 53, no. 3, page 263, 2008. [37](#), [40](#), [41](#)
- [Bourquardez & Chaumette 2007] O. Bourquardez et F. Chaumette. *Visual servoing of an airplane for auto-landing*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'07, pages 1314–1319, San Diego, CA, USA, October 2007. [115](#)
- [Burschka & Hager 2001] D. Burschka et G. D. Hager. *Vision-based control of mobile robots*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1707–1713, Seoul, South Korea, May 2001. [41](#)
- [Cadenat *et al.* 1999a] V. Cadenat, P. Souères et M. Courdesses. *An hybrid control for avoiding obstacles during a vision-based tracking task*. In European Control Conference, Karlsruhe, Germany, Septembre 1999. [61](#)

- [Cadenat *et al.* 1999b] V. Cadenat, P. Souères, R. Swain et M. Devy. *A controller to perform a visually guided tracking task in a cluttered environment*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Korea, Octobre 1999. 61
- [Cadenat *et al.* 2006] V. Cadenat, P. Souères et T. Hamel. *A reactive path-following controller to guarantee obstacle avoidance during the transient phase*. Int. J. Robot. Automat., vol. 21, pages 256–265, 2006. 55
- [Cadenat *et al.* 2012] V. Cadenat, D. Folio et A. Durand Petiteville. *A comparison of two sequencing techniques to perform a vision-based navigation task in a cluttered environment*. Advanced Robotics, vol. 26, no. 6-7, 2012. 53, 59, 70
- [Cadenat 1999] V. Cadenat. *Commande référencée multi-capteurs pour la navigation d'un robot mobile*. PhD thesis, Université Paul SABATIER, Toulouse, France, Décembre 1999. 35, 40, 45, 46, 50, 53, 54, 55, 56, 57, 60, 61, 62, 114, 115, 120
- [Chaumette & Hutchinson 2006] F. Chaumette et S. Hutchinson. *Visual Servo Control, Part I : Basic Approaches*. IEEE Robotics and Automation Magazine, vol. 13, no. 4, pages 82–90, Décembre 2006. 40, 49, 51, 111, 116
- [Chaumette & Hutchinson 2007] Chaumette et Hutchinson. *Visual Servo Control, Part 2 : Advanced Approaches*. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2007. 116
- [Chaumette & Hutchinson 2008] F. Chaumette et S. Hutchinson. *Visual servoing and visual tracking*. In B. Siciliano et O. Khatib, éditeurs, Handbook of Robotics, chapitre 24, pages 563–583. Springer, 2008. 116
- [Chaumette & Marchand 2000] F. Chaumette et E. Marchand. *A new redundancy-based iterative scheme for avoiding joint limits : application to visual servoing*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, Mai 2000. 114
- [Chaumette & Marchand 2001] F. Chaumette et E. Marchand. *A redundancy-based iterative approach for avoiding joint limits : Application to visual servoing*. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 17, no. 5, pages 719–730, October 2001. 52
- [Chaumette *et al.* 1996] F. Chaumette, S. Boukir, P. Bouthemy et D. Juvin. *Structure from Controlled Motion*. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 18, no. 5, pages 492–504, Mai 1996. 83
- [Chaumette 1990] F. Chaumette. *La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques*. PhD thesis, Université de Rennes 1, IRISA, Juillet 1990. 48, 75, 112
- [Chaumette 1998] F. Chaumette. *Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing*. In D. Kriegman, G. Hager et A.S. Morse, éditeurs, The Confluence of Vision and Control, chapitre The Confluence of Vision and Control. LNCIS Series, No 237, Springer-Verlag, 1998. 40, 112, 113
- [Chaumette 2002] F. Chaumette. *Asservissement visuel*. In W. Khalil, éditeur, La commande des robots manipulateurs, Traité IC2, chapitre 3, pages 105–150. Hermès, 2002. 47, 48, 111, 116
- [Chaumette 2003] F. Chaumette. *Avancées récentes en asservissement visuel*. In Quatrièmes journées nationales de la recherche en robotique, Clermont-Ferrand, Octobre 2003. 111, 113, 116
- [Chaumette 2004] F. Chaumette. *Image moments : a general and useful set of features for visual servoing*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 4, pages 713–723, Août 2004. 48

- [Chaumette 2007a] F. Chaumette. *Quoi de neuf en asservissement visuel depuis les JNRR'03 ?* In Sixièmes journées nationales de la recherche en robotique, Obernai, Octobre 2007. 111, 113, 116
- [Chaumette 2007b] F. Chaumette. *Visual servoing*. In E. Dombre et W. Khalil, éditeurs, Robot Manipulators : Modeling, Performance Analysis and Control, chapitre 6, pages 279–336. ISTE, 2007. 116
- [Chen & Birchfield 2007] Z. Chen et S. T. Birchfield. *Person Following with a Mobile Robot using Binocular Feature-Based Tracking*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, CA, USA, 2007. 95
- [Cherubini & Chaumette 2009] A. Cherubini et F. Chaumette. *Visual navigation with a time-independent varying reference*. In IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'09, pages 5968–5973, St Louis, USA, October 2009. 40, 41, 88, 115
- [Cherubini & Chaumette 2010] A. Cherubini et F. Chaumette. *A redundancy-based approach to obstacle avoidance applied to mobile robot navigation*. In Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Taipei, Taiwan, 2010. 40, 41, 88, 89, 91, 114, 115
- [Cherubini et al. 2011] A. Cherubini, F. Chaumette et G. Oriolo. *Visual servoing for path reaching with nonholonomic robots*. Robotica, 2011. 41, 88, 89
- [Chesi & Hashimoto 2003] G. Chesi et K. Hashimoto. *Effects of camera calibration errors on static-eye and hand-eye visual servoing*. Advanced Robotics, vol. 17, pages 1023–1039, 2003. 39
- [Chesi & Hashimoto 2010] G. Chesi et K. Hashimoto, éditeurs. Visual servoing via advanced numerical methods, volume 401 of *Lecture notes in control and information science*. Springer Verlag, 2010. 116
- [Chesi et al. 2004] G. Chesi, K. Hashimoto, D. Prattichizzo et A. Vicino. *Keeping features in the field of view in eye-in-hand visual servoing : A switching approach*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, pages 908–914, Octobre 2004. 53, 67, 114
- [Chesi et al. 2010] G. Chesi, Y. S. Hung et H. L. Yung. *Image Measurement Errors in Visual Servoing : Estimating the Induced Positioning Error*. In Visual Servoing via Advanced Numerical Methods, pages 151–168. Springer Verlag, 2010. 113
- [Chesi 2009] G. Chesi. *Visual servoing path planning via homogeneous forms and LMI optimizations*. IEEE Trans. Robotics and Automation, vol. 25, no. 2, pages 281–291, 2009. 114
- [Choset et al. 2005] H. Choset, K. Lynch, S. Hutchinson, G. Kantor, W. Burgard, L. Kavraki et S. Thrun. Principles of robot motion. MIT Press, Boston, 2005. 37
- [Collewet & Marchand 2011] C. Collewet et E. Marchand. *Photometric visual servoing*. IEEE Trans. on Robotics, vol. 27, no. 4, August 2011. 48, 114
- [Comment 2009] Estelle Comment. Estimation de mouvement pour l'asservissement visuel en contexte dynamique. Master's thesis, Polytechnique, 2009. 105, 106
- [Comport et al. 2004] A. I. Comport, E. Marchand et F. Chaumette. *Robust model-based tracking for robot vision*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Sendai, Japan, Octobre 2004. 67
- [Comport et al. 2006] A.I. Comport, E. Marchand, M. Pressigout et F. Chaumette. *Real-time markerless tracking for augmented reality : the virtual visual servoing framework*. IEEE Trans. on Visualization and Computer Graphics, vol. 12, no. 4, pages 615–628, July 2006. 115

- [Cordesses *et al.* 2000] L. Cordesses, B. Thuilot, P. Martinet et C. Cariou. *Curved path following of a farm tractor using a cp-dgps*. In 6th SYmposium on RObot COntrol, SYROCO'00, pages 489–494, Vienna, Austria, 2000. 37
- [Corke & Hutchinson 1999] P. I. Corke et S. Hutchinson. *A new partitioned approach to image-based visual servo control*. In 31st International Symposium on Robotics and Automation, 1999. 60
- [Corke & Hutchinson 2001] P.I. Corke et S. Hutchinson. *A new partitioned approach to image-based visual servo control*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 17, pages 507–515, Août 2001. 67, 113
- [Corke 1996] P.I. Corke. Visual control of robots : High performance visual servoing. Research Studies Press LTD, 1996. 111, 112, 116
- [Courbon *et al.* 2009] J Courbon, Y Mezouar et P Martinet. *Autonomous navigation of vehicles from a visual memory using a generic camera model*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 10, no. 3, pages 392–402, 2009. 41, 88, 115
- [Cowan *et al.* 2002] N. Cowan, J. Weingarten et D. Koditschek. *Visual servoing via navigation functions*. IEEE Transaction on Robotics and Automation, vol. 18, no. 4, pages 521–533, August 2002. 40
- [Crétual 1998] A. Crétual. *Asservissement visuel à partir d'information de mouvement dans l'image*. PhD thesis, Université de Rennes 1, IRISA, Novembre 1998. 114
- [Dame & Marchand 2011] Amaury Dame et Eric Marchand. *Mutual Information-based Visual Servoing*. IEEE Transactions on Robotics, vol. To appear, 2011. 114
- [Danès & Coutinho 2006] P. Danès et D.F. Coutinho. *Multicriteria Analysis of Visual Servos via Biquadratic Lyapunov Functions*. In 5th IFAC Symposium on Robust Control Design, Toulouse, France, 2006. 52, 113
- [Danès *et al.* 2010] P. Danès, D. Coutinho et S. Durola. *Multicriteria Analysis of Visual Servos through Rational Systems, Biquadratic Lyapunov Functions, and LMIs*. In Visual Servoing via Advanced Numerical Methods. G. Chesi and H. Hashimoto, 2010. 113
- [Danès & Bellot 2006] P. Danès et D. Bellot. *Towards an LMI approach to multicriteria visual servoing in robotics*. European Journal of Control, vol. 12, no. 1, pages 86–110, January 2006. 49, 114
- [De Luca *et al.* 2007] Alessandro De Luca, Giuseppe Oriolo et Paolo Robuffo Giordano. *Image-based visual servoing schemes for nonholonomic mobile manipulators*. Robotica, vol. 25, pages 131–145, 2007. 115
- [De Luca *et al.* 2008] De Luca, Oriolo et Giordano. *Features depth observation for image based visual servoing : theory and experiments*. Int. Journal of Robotics Research, vol. 27, no. 10, 2008. 84, 87
- [De Souza & Kak 2002] G. N. De Souza et A. C. Kak. *Vision for Mobile Robot Navigation : A Survey*. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 24, no. 2, pages 237–267, 2002. 37
- [Deguchi 1998] K. Deguchi. *Optimal motion control for image-based visual servoing by decoupling translation and rotation*. In International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 705–711, October 1998. 113
- [Deng *et al.* 2005] L. Deng, F. Janabi-Sharifi et W.J. Wilson. *Hybrid Motion Control and Planning Strategies for Visual Servoing*. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 52, no. 4, pages 1024 – 1040, aug. 2005. 53, 114

- [Dessus 2010] S. Dessus. Estimation de mouvement pour l'asservissement visuel en contexte dynamique. Master's thesis, ENSEEIHT, 2010. 105, 106
- [Dijkstra 1971] Edsger W. Dijkstra. A short introduction to the art of programming. circulated privately, Août 1971. 39, 89
- [Duceux *et al.* 2010] G. Duceux, B. Tamadazte, N. Le Fort-Piat, E. Marchand, G. Fortier et S. Dembélé. *Autofocusing-based visual servoing : application to MEMS micromanipulation*. In Int. Symp. on Optomechatronic Technologies, ISOT 2010, Toronto, Canada, October 2010. 109, 115
- [Dune *et al.* 2007] C. Dune, E. Marchand et C. Leroux. *One Click Focus with Eye-in-hand/Eye-to-hand Cooperation*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007. 114
- [Durand Petiteville *et al.* 2009] A. Durand Petiteville, M. Courdesses et V. Cadenat. *Reconstruction of the features depth to improve the execution of a vision-based task*. In 9th International workshop on Electronics, Control, Modelling, Measurement and Signals 2009, Mondragon, Spain, July 2009. 84
- [Durand Petiteville *et al.* 2010a] A. Durand Petiteville, V. Cadenat et M. Courdesses. *A Unified Initialization Phase to Improve Visual Servoing in an Unknown Environment*. In IFAC Symposium on Intelligent Autonomous Vehicles, Lecce, Italy, September 2010. 91, 93
- [Durand Petiteville *et al.* 2010b] A. Durand Petiteville, M. Courdesses et V. Cadenat. *A new predictor/corrector pair to estimate the visual features depth during a vision-based navigation task in an unknown environment*. In 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Funchal, Portugal, June 2010. 85
- [Durand Petiteville *et al.* 2011a] A. Durand Petiteville, V. Cadenat, M. Courdesses, F. Delpech de Frayssinet et A. Magassouba. *A comparison of several approaches to perform a vision-based long range navigation*. In IEEE Workshop on Electronics, Control, Measurement and Signals, Liberec, Czech Republic, June 2011. 84, 87
- [Durand Petiteville *et al.* 2011b] A. Durand Petiteville, S. Hutchinson, V. Cadenat et M. Courdesses. *2D visual servoing for a long range navigation in a cluttered environment*. In 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Orlando, Florida, USA, December 2011. 56, 89, 91
- [Durand Petiteville 2012] A. Durand Petiteville. *Navigation référencée multi-capteur d'un robot mobile en environnement encombré*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2012. 83, 87
- [Durola *et al.* 2009] S. Durola, P. Danès, D.F. Coutinho et M. Courdesses. *Rational systems and matrix inequalities to the multicriteria analysis of visual servos*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2009), pages 1504–1509, Kobe, Japan, 2009. 52, 114
- [Espiau *et al.* 1992] B. Espiau, F. Chaumette et P. Rives. *A new approach to visual servoing in robotics*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 8, pages 313–326, Juin 1992. 47, 48, 51, 112
- [Espiau 1993] B. Espiau. *Effect of camera calibration errors on visual servoing in robotics*. In 3rd international Symposium on Experimental Robotics, volume 200, pages 182–192, Kyoto, Japan, 1993. 113
- [Favaro & Soatto 2003] P. Favaro et S. Soatto. *Seeing beyond occlusions (and other marvels of a finite lens aperture)*. In IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Saint Louis, USA, 2003. 74

- [Feddema & Simon 1998] J.T. Feddema et R. W. Simon. *CAD-driven micro-assembly and visual servoing*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, Mai 1998. 115
- [Feddema 1989] J. Feddema. *Real time visual feedback control for hand-eye coordinated robotic systems*. PhD thesis, Purdue University, 1989. 112
- [Flandin *et al.* 2000] G. Flandin, F. Chaumette et E. Marchand. *Eye-in-hand / eye-to-hand cooperation for visual servoing*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'00, volume 3, pages 2741–2746, San Francisco, California, April 2000. 114
- [Folio & Cadenat 2005a] D. Folio et V. Cadenat. *A controller to avoid both occlusions and obstacles during a vision-based navigation task in a cluttered environment*. In European Control Conference, Seville, Spain, Décembre 2005. 69, 70
- [Folio & Cadenat 2005b] D. Folio et V. Cadenat. *Using redundancy to avoid simultaneously occlusions and collisions while performing a vision-based task amidst obstacles*. In ECMR, Ancona, Italy, Septembre 2005. 69
- [Folio & Cadenat 2006] D. Folio et V. Cadenat. *A redundancy-based scheme to perform safe vision-based tasks amidst obstacles*. In ROBIO'06, Décembre 2006. 69, 70
- [Folio & Cadenat 2007] D. Folio et V. Cadenat. *A new controller to perform safe vision-based navigation tasks amidst possibly occluding obstacles*. In European Control Conference, Kos, Greece, Juillet 2007. 81
- [Folio & Cadenat 2008a] D. Folio et V. Cadenat. *Dealing with visual features loss during a vision-based task for a mobile robot*. Int. Journal on Optomechatronics, special issue on visual servoing, vol. 2, pages 185–204, Juillet 2008. 80
- [Folio & Cadenat 2008b] D. Folio et V. Cadenat. *A sensor-based controller able to treat total image loss to guarantee non-collision during a vision-based navigation task*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, Septembre 2008. 80
- [Folio & Cadenat 2008c] D. Folio et V. Cadenat. *Treating image loss using the vision/motion link : a generic framework*. IN-TECH, 2008. 78, 83, 84, 86
- [Folio 2003] D. Folio. *Navigation par enchaînement de tâches référencées multi-capteurs*. Rapport de stage de DEA, Université Paul SABATIER, Juin 2003. 65
- [Folio 2007] D. Folio. *Stratégies de commande référencées multi-capteurs et gestion de la perte du signal visuel pour la navigation d'un robot mobile*. PhD thesis, University of Toulouse, France, Juillet 2007. 40, 53, 54, 56, 57, 62, 63, 65, 67, 68, 69, 70, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 83, 84, 86, 114
- [Gangloff *et al.* 2006] J. Gangloff, R. Ginhoux, M. de Mathelin, L. Soler et J. Marescaux. *Model predictive control for compensation of cyclic organ motions in teleoperated laparoscopic surgery*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 14, no. 2, pages 235 – 246, March 2006. 115
- [Gans & Hutchinson 2007] N.R. Gans et S.A. Hutchinson. *Stable Visual Servoing Through Hybrid Switched-System Control*. Robotics, IEEE Transactions on, vol. 23, no. 3, pages 530 –540, June 2007. 53, 114
- [Gans *et al.* 2003] Nicholas R. Gans, Seth A. Hutchinson et Peter I. Corke. *Performance Tests for Visual Servo Control Systems, with Application to Partitioned Approaches to Visual Servo Control*. International Journal of Robotic Research, vol. 22, pages 955–984, 2003. 40, 49, 53, 60, 112, 113
- [Gao 2006] B. Gao. *Contribution à la synthèse de commandes référencées vision 2D multi-critères*. PhD thesis, University of Toulouse, France, Octobre 2006. 58, 114

- [Garcia-Aracil *et al.* 2006] N.M. Garcia-Aracil, J.M. Azorin Poveda, J.M. Sabater Navarro, C. Perez Vidal et R. Saltaren Pazmino. *Visual Control of robots with changes of visibility in image features*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 4, pages 27–33, March 2006. 52, 67
- [Gaspar *et al.* 2000] J. Gaspar, N. Winters et J. Santos-Victor. *Vision-based navigation and environmental representations with an omni-directional camera*. IEEE transactions on robotics and automation, vol. 6, no. 6, pages 890–898, 2000. 41, 88, 89, 115
- [Germa *et al.* 2010a] T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah et V. Cadenat. *Vision and RFID data fusion for tracking people in crowds by a mobile robot*. Comput. Vis. Image Underst., vol. 114, no. 6, pages 641–651, 2010. 47, 95
- [Germa *et al.* 2010b] T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah, V. Cadenat et M. Devy. *Vision and RFID-based Person Tracking in Crowds from a Mobile Robot*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Saint Louis, USA, Octobre 2010. 95
- [Germa *et al.* 2010c] T. Germa, F. Lerasle, N. Ouadah, V. Cadenat et C. Lemaire. *Fusion de données visuelles et RFID pour le suivi de personnes en environnement encombré depuis un robot mobile*. In Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle, Caen, France, Janvier 2010. 95
- [Gockley *et al.* 2007] R. Gockley, J. Forlizzi et R. Simmons. *Natural Person-Following Behavior for Social Robots*. In ACM/IEEE international Conference on Human-Robot interaction, Arlington, USA, 2007. 95
- [Guénard *et al.* 2007] N. Guénard, T. Hamel et R. Mahony. *A Practical Visual Servo Control for a Unmanned Aerial Vehicle*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Rome, Italie, 2007. 115
- [Haliyo *et al.* 2006] S. Haliyo, F. Dionnet et S. Régnier. *Controlled rolling of micro objects for autonomous micro manipulation*. Int. Journal of Micromechatronics, vol. 3, no. 2, pages 75–101, 2006. 109
- [Hamel & Mahony 2002] T. Hamel et R. Mahony. *Visual servoing of an underactuated dynamic rigid-body system*. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 18, no. 2, pages 187–198, April 2002. 115
- [Han *et al.* 2000] S.H. Han, W.H. Seo et J. Lee. *Image-Based Visual Servoing Control of a SCARA Type Dual-Arm Robot*. In 2000 IEEE Int. Symposium on Industrial Electronics, pages 517–522, 2000. 107
- [Hart *et al.* 1968] P.E. Hart, N.J. Nilsson et B. Raphael. *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths*. Systems Science and Cybernetics, IEEE Transactions on, vol. 4, no. 2, pages 100–107, july 1968. 39
- [Hashimoto & Kimura. 1993] K. Hashimoto et H. Kimura. *LQ optimal and nonlinear approaches to visual servoing*. In K. Hashimoto, editeur, Visual Servoing, volume 7 of *Robotics and Automated Systems*, pages 165–198. World Scientific Press, 1993. 114
- [Hashimoto & Noritsugu 2000] K. Hashimoto et T. Noritsugu. *Potential problems and switching control for visual servoing*. In Intelligent Robots and Systems, 2000. (IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on, volume 1, pages 423–428 vol.1, 2000. 114
- [Hill & Park 1979] J. Hill et W. T. Park. *Real Time Control of a Robot with a Mobile Camera*. In 9th International Symposium on Industrial Robot, Washington (DC), USA, 1979. 111

- [Horaud & Monga 1995] R. Horaud et O. Monga. *Vision par ordinateur, outils fondamentaux. Traité des nouvelles technologies, série Informatique*. Hermès, Paris, 1995. 46
- [Huang *et al.* 2005] C.M. Huang, J.H. Jean, Y.S. Cheng et L.C. Fu. *Visual tracking and servoing system design for circling a target of an air vehicle simulated in virtual reality*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005. 115
- [Huang *et al.* 2009] Haibo Huang, Dong Sun, James K. Mills et Shuk Han Cheng. *Robotic cell injection system with position and force control : toward automatic batch biomanipulation*. IEEE Trans. Robot., vol. 25, no. 3, pages 727–737, 2009. 109
- [Hutchinson *et al.* 1996] S. Hutchinson, G.D. Hager et P.I. Corke. *A tutorial on visual servo control*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 5, pages 651–670, October 1996. 111, 116
- [Hynes *et al.* 2006] P. Hynes, G. Dodds et A. Wilkinson. *Uncalibrated visual servoing of a dual arm robot for MIS suturing*. In IEEE Int. Symp. on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pages 204 – 209, Pisa, Italy, 2006. 107, 115
- [Jerian & Jain 1991] C. Jerian et R. Jain. *Structure from Motion : A Critical Analysis of Methods*. IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics, vol. 21, no. 3, pages 572–588, Mai 1991. 83
- [Joon-Kil *et al.* 2006] K. Joon-Kil, K. Do-Wan, C. Seung-Joon et W. Sang-Chul. *Image-based visual servoing using sliding mode control*. In International Joint Conference, Bexcon, Korea, 2006. 96
- [Kanoun *et al.* 2011] O. Kanoun, F. Lamiraux et P.B. Wieber. *Kinematic control of redundant manipulators : generalizing the task priority framework to inequality tasks*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 27, no. 1, pages 1–9, June 2011. 51
- [Katsura *et al.* 2003] H. Katsura, J. Miura, M. Hild et Y. Shirai. *A view-based outdoor navigation using object recognition robust to changes of weather and seasons*. In IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, USA, September 2003. 37
- [Kazemi *et al.* 2009] M. Kazemi, K. Gupta et M. Mehrandezh. *Global path planning for robust visual servoing in complex environments*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Kobe, Japan, 2009. 114
- [Kazemi *et al.* 2010] M. Kazemi, K. Gupta et M. Mehrandezh. *Path-Planning for Visual Servoing : A Review and Issues*. In G. Chesi et K. Hashimoto, éditeurs, Visual Servoing via Advanced Numerical Methods. Springer Verlag, 2010. 113, 114
- [Kermorgant & Chaumette 2011a] O. Kermorgant et F. Chaumette. *Avoiding joint limits with a low-level fusion scheme*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS’11, San Francisco, USA, September 2011. 52, 114
- [Kermorgant & Chaumette 2011b] O. Kermorgant et F. Chaumette. *Combining IBVS and PBVS to ensure the visibility constraint*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS’11, San Francisco, USA, September 2011. 67, 113
- [Kermorgant & Chaumette 2011c] O. Kermorgant et F. Chaumette. *Multi-sensor data fusion in sensor-based control : application to multi-camera visual servoing*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 4518–4523, Shanghai, China, May 2011. 114
- [Khadraoui 1996] D. Khadraoui. *La Commande Référencée Vision pour le Guidage Automatique de Véhicules*. PhD thesis, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, 1996. 115
- [Khalfaoui 2009] Souhaïel Khalfaoui. *Asservissement visuel coordonné pour un manipulateur mobile à deux bras*. Master’s thesis, Université Pierre et Marie Curie, 2009. 107, 108

- [Khatib *et al.* 1997] M. Khatib, H. Jaouni, R. Chatila et J.-P. Laumond. *Dynamic path modification for car-like nonholonomic mobile robots*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 490–496, Albuquerque, New Mexico, USA, April 1997. 38
- [Khatib 1986] O. Khatib. *Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots*. The Int. Journal of robotics Research, 1986. 40
- [Khatib 1996] M. Khatib. *Contrôle du mouvement d'un robot mobile par retour sensoriel*. PhD thesis, LAAS-CNRS, 1996. 40
- [Kim & Menq 2005] J.H. Kim et C.H. Menq. *Direct visual servo control achieving nanometer resolution in X-Y-Z*. In Int. Conf. On Mechatronics, Taipei, Taiwan, Juillet 2005. 109, 115
- [Kobilarov *et al.* 2006] M. Kobilarov, G. Sukhatme, J. Hyams et P. Batavia. *People tracking and following with mobile robot using an omnidirectional camera and laser*. In International Conference on Robotics and Automation, Orlando, USA, 2006. 95
- [Koditschek 1987] D. Koditschek. *Exact robot navigation by means of potential functions : some topological considerations*. In International Conference on Robotics and Automation, pages 1–6, Raleigh, NC, USA, 1987. 40
- [Koenig & Likhachev 2002] S. Koenig et M. Likhachev. *Improved fast replanning for robot navigation in unknown terrain*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 698–975, Washington DC, USA, May 2002. 38
- [Koenig & Likhachev 2005] S. Koenig et M. Likhachev. *Fast replanning for navigation in unknown terrain*. Robotics, IEEE Transactions on, vol. 21, no. 3, pages 354 – 363, june 2005. 38
- [Kragic & Christensen 2002] Danica Kragic et Henrik I Christensen. *Survey on Visual Servoing for Manipulation*. Rapport technique, Computational vision and active perception laboratory, 2002. 115
- [Kralník & Přeučil 2008] T. Kralník et L. Přeučil. *A simple visual navigation system with convergence property*. In Libor Preucil Herman Bruyninckx et Miroslav Kulich, éditeurs, Springer Tracts in Advanced Robotics, volume 44. Springer Verlag, 2008. 41, 88, 115
- [Krupa *et al.* 2003] A. Krupa, J. Gangloff, C. Doignon, M.F. de Mathelin, G. Morel, J. Leroy, L. Soler et J. Marescaux. *Autonomous 3-D positioning of surgical instruments in robotized laparoscopic surgery using visual servoing*. Robotics and Automation, IEEE Transactions on, vol. 19, no. 5, pages 842 – 853, oct. 2003. 115
- [Kwon *et al.* 2005] H. Kwon, Y. Yoon, J. Byung Park et A. C. Kak. *Person Tracking with a Mobile Robot using Two Uncalibrated Independently Moving Cameras*. In Robotics and Automation, 2005. ICRA '05. IEEE International Conference on, 2005. 95
- [Kyrki *et al.* 2004] V. Kyrki, D. Kragic et H. Christensen. *New shortest-path approaches to visual servoing*. In IROS'04, pages 349–355, Octobre 2004. 67
- [Kyrki *et al.* 2006] V. Kyrki, D. Kragic et H. Christensen. *Measurement errors in visual servoing*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 54, no. 10, pages 815–827, 2006. 113
- [Kyrki 2009] V. Kyrki. *Control uncertainty in image-based visual servoing*. In Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on, pages 1516 –1521, may 2009. 113
- [Lamiriaux *et al.* 2004] F. Lamiriaux, D. Bonnafoos et O. Lefebvre. *Reactive path deformation for non-holonomic mobile robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 20, no. 6, pages 967–977, December 2004. King-Sun Fu Memorial Best Transactions on Robotics Paper Award 2004. 38, 39

- [Laumond 2001] J.-P. Laumond, editeur. La robotique mobile. IC2 SYSTEMES AUTOMATISES. Hermès Sciences Publication, 2001. 38
- [Lee *et al.* 2005] W.S. Lee, H.R. Kim, Y.T. Kim, Y.T. Jung et S.H. Han. *A Study on Visual Feedback Control of a Dual-Arm Robot with Eight Joints*. In IEEE Int. Conf. on Control, Automation and System, Gyeonggi-Do, Korea, 2005. 107
- [Lepetit & Fua 2006] V. Lepetit et P. Fua. *Monocular Model-Based 3D Tracking of Rigid Objects*. Found. Trends. Comput. Graph. Vis, vol. 1, no. 1, pages 1–89, 2006. 74
- [Li *et al.* 2001] X. D. Li, G. Zong et S. Bi. *Development of global vision system for biological automatic micro-manipulation system*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 127–132, 2001. 109
- [Lippiello *et al.* 2005] V. Lippiello, B. Siciliano et L. Villani. *Eye-in-Hand/Eye-to-Hand Multi-Camera Visual Servoing*. In 44th IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference, Sevilla, Spain, December 2005. 114
- [Lopes & Koditschek 2007] Gabriel Lopes et Daniel Koditschek. *Visual servoing for nonholonomically constrained three degree of freedom kinematic systems*. International Journal of Robotics Research, vol. 26, no. 7, pages 715–736, 2007. 114
- [López-Nicolás *et al.* 2010] G. López-Nicolás, N. R. Gans, S. Bhattacharya, C. Sagüés, J.J. Guerrero et S. Hutchinson. *An Optimal Homography-Based Control Scheme for Mobile Robots with Nonholonomic and Field-of-View Constraints*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, vol. 40, no. 4, pages 1115 – 1127, 2010. 114
- [Ma & Hutchinson 2010] W. Ma et S. Hutchinson. *Gradient Projection Methods for Constrained Image-based Visual Servo*. In Visual servoing via advanced numerical methods. Springer Verlag, 2010. 114
- [Mahony *et al.* 2002] R. Mahony, P. Corke et F. Chaumette. *Choice of image features for depth-axis control in image-based visual servo control*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'02, volume 1, pages 390–395, Lausanne, Switzerland, October 2002. 114
- [Malis & Chaumette 2002] E. Malis et F. Chaumette. *Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods*. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 18, no. 2, pages 176–186, April 2002. 113
- [Malis & Rives 2003] Malis et Rives. *Robustness of image-based visual servoing with respect to depth distribution errors*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, 2003. 113
- [Malis *et al.* 1999] E. Malis, F. Chaumette et S. Boudet. *2 1/2d visual servoing*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 15, pages 238–250, Avril 1999. 67, 113
- [Malis *et al.* 2000] E. Malis, F. Chaumette et S. Boudet. *Multi-cameras visual servoing*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'00, volume 4, pages 3183–3188, San Francisco, California, USA, April 2000. 114
- [Malis *et al.* 2001] E. Malis, G. Morel et F. Chaumette. *Robot control using disparate multiple sensors*. Int. Journal of Robotics Research, vol. 20, no. 5, pages 364–378, May 2001. 114
- [Malis 1998] E. Malis. *Contribution à la modélisation et à la commande en asservissement visuel*. PhD thesis, Université de Rennes 1, IRISA, Novembre 1998. 113
- [Mansard & Chaumette 2005] N. Mansard et F. Chaumette. *A new redundancy formalism for avoidance in visual servoing*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'05, volume 2, pages 1694–1700, Edmonton, Canada, August 2005. 67, 114

- [Mansard & Chaumette 2007] N. Mansard et F. Chaumette. *Task sequencing for sensor-based control*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, no. 1, pages 60–72, Février 2007. 58, 114
- [Mansard *et al.* 2007] N. Mansard, O. Stasse, F. Chaumette et K. Yokoi. *Visually-guided grasping while walking on a humanoid robot*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'07, pages 3041–3047, Roma, Italy, April 2007. 115
- [Mansard *et al.* 2009] N. Mansard, A. Remazeilles et F. Chaumette. *Continuity of varying-feature-set control laws*. IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 54, no. 11, pages 2493–2505, November 2009. 52, 67
- [Mansard 2006] N. Mansard. *Enchaînement de tâches robotiques*. PhD thesis, Université de Rennes I, 2006. 38, 39, 40, 51, 52, 53, 58
- [Marchand & Chaumette 2002] E. Marchand et F. Chaumette. *Virtual visual servoing : A framework for real-time augmented reality*. In G. Drettakis et H.-P. Seidel, éditeurs, EUROGRAPHICS 2002 Conference Proceeding, volume 21 of *Computer Graphics Forum*, pages 289–298, Saarebrücken, Germany, September 2002. 115
- [Marchand & Hager 1998] E. Marchand et G.D. Hager. *Dynamic Sensor Planning in Visual Servoing*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, Mai 1998. 67
- [Marchand *et al.* 1996] E. Marchand, F. Chaumette et A. Rizzo. *Using the task function approach to avoid robot joint limits and kinematic singularities in visual servoing*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Osaka (Japan), Novembre 1996. 52
- [Marey & Chaumette 2010a] M. Marey et F. Chaumette. *A new large projection operator for the redundancy framework*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'10, pages 3727–3732, Anchorage, Alaska, May 2010. 51
- [Marey & Chaumette 2010b] M. Marey et F. Chaumette. *New strategies for avoiding robot joint limits : Application to visual servoing using a large projection operator*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, IROS'10, pages 6222–6227, Taipei, Taiwan, October 2010. 53, 114
- [Martinet & Thibaud 2000] P. Martinet et C. Thibaud. *Automatic Guided Vehicles : Robust Controller Design*. Image Space Autonomous Robots, vol. 8, pages 25–42, 2000. 115
- [Martinet 1999] P. Martinet. *Comparison of visual servoing techniques : experimental results*. In European Control Conference, 1999. 112, 113
- [Matsumoto *et al.* 1996] Y. Matsumoto, M. Inaba et H. Inoue. *Visual navigation using view-sequenced route representation*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota, April 1996. 41, 88
- [Matthies *et al.* 1989] L. Matthies, T. Kanade et R. Szeliski. *Kalman Filter-based Algorithms for Estimating Depth in Image Sequences*. Int. Journal of Computer Vision, vol. 3, no. 3, pages 209–238, 1989. 84
- [Mebarki *et al.* 2010] R. Mebarki, A. Krupa et F. Chaumette. *2D ultrasound probe complete guidance by visual servoing using image moments*. IEEE Trans. on Robotics, vol. 26, no. 2, pages 296–306, April 2010. 115
- [Mezouar & Allen 2002] Y. Mezouar et P.K. Allen. *Visual servoed micropositioning for protein manipulation tasks*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, volume 2, Octobre 2002. 109, 115

- [Mezouar & Chaumette 2002] Y. Mezouar et F. Chaumette. *Avoiding self-occlusions and preserving visibility by path planning in the image*. Robotics and Autonomous Systems, vol. 41, no. 2, pages 77–87, Novembre 2002. 40, 67, 114
- [Mezouar & Chaumette 2003] Y. Mezouar et F. Chaumette. *Optimal camera trajectory with image-based control*. Int. Journal of Robotics Research, IJRR, vol. 22, no. 10, pages 781–804, October 2003. 114
- [Mezouar et al. 2002] Y. Mezouar, A. Remazeilles, P. Gros et F. Chaumette. *Image interpolation for image-based control under large displacement*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, ICRA'02, volume 3, pages 3787–3794, Washington DC, USA, May 2002. 41
- [Mezouar et al. 2007] Y. Mezouar, M. Prats et P. Martinet. *External hybrid vision/force control*. In International Conference on Advanced Robotics, ICAR'07, August 2007. 114
- [Miyabe et al. 2003] T. Miyabe, A. Konno et M. Uchiyama. *Automated Object Capturing with a Two-arm Flexible Manipulator*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, 2003. 107, 115
- [Morbidi & Prattichizzo 2009] F. Morbidi et D. Prattichizzo. *Range estimation from moving camera : an Immersion and Invariance approach*. In IEEE 2009 International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, May 2009. 84, 87
- [Morel et al. 2005] G. Morel, P. Zanne et F. Plestan. *Robust visual servoing : bounding the task function tracking errors*. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, vol. 13, no. 6, pages 998 – 1009, nov. 2005. 113
- [Morin & Samson 2003] Pascal Morin et Claude Samson. *Practical stabilization of driftless systems on lie groups : The transverse function approach*. IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no. 9, pages 1496–1508, September 2003. 114
- [Nageotte et al. 2006] F. Nageotte, P. Zanne, C. Doignon et M. ; de Mathelin. *Visual Servoing-Based Endoscopic Path Following for Robot-Assisted Laparoscopic Surgery*. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 2364 – 2369, Beijing, China, October 2006. 115
- [Nakamura 1990] Y. Nakamura. Advanced robotics : Redundancy and optimization. Addison-Wesley, 1990. 51
- [Ogawa et al. 2005] N. Oku Ogawa, K. Hashimoto et M. Ishikawa. *Microrobotic Visual Control of Motile Cells Using High-Speed Tracking System*. IEEE Trans. Robot., vol. 21, no. 4, pages 704–712, 2005. 109, 115
- [Ohya et al. 1998] A. Ohya, A. Kosaka et A. Kak. *Vision-based navigation by a mobile robot with obstacle avoidance using a single-camera vision and ultrasonic sensing*. IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 14, no. 6, pages 969–978, 1998. 114
- [Oliensis 2002] J. Oliensis. *Exact Two-Image Structure from Controlled Motion*. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 24, no. 12, pages 1618–1633, Décembre 2002. 83
- [Osa et al. 2010] T. Osa, C. Staub et A. Knoll. *Framework of automatic robot surgery system using Visual servoing*. In Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, pages 1837 –1842, oct. 2010. 115
- [Ouadah et al. 2009] N. Ouadah, V. Cadenat, F. Boudjema et M. Hamerlain. *Image based robust visual servoing on human face to improve human/robot interaction*. In ECMR, Mlini/Dubrovnik, Croatia, Septembre 2009. 95

- [Ouadah *et al.* 2011] N. Ouadah, V. Cadenat, F. Lerasle, M. Hamerlain, T. Germa et F. Boudjema. *A Multi-Sensor-Based Control Strategy for Initiating and Maintaining Interaction Between a Robot and a Human*. *Advanced Robotics*, vol. 25, no. 9–10, pages 1249–1270, 2011. 95, 96, 97
- [Ouadah 2011] N. Ouadah. *Le contrôle visuel appliqué dans la robotique mobile*. PhD thesis, Ecole Nationale Polytechnique d’Alger, Octobre 2011. 83, 95
- [Park & Lee 2003] J. H. Park et Y. J. Lee. *Robust visual servoing for motion control of the ball on a plate*. *Mechatronics*, vol. 13, pages 723–738, 2003. 96
- [Parvin *et al.* 1996] B. Parvin, D.E. Callahan, W. Johnston et M. Maestre. *Visual servoing for micro manipulation*. In *Int. Conf. on Pattern Recognition*, volume 3, Detroit, Août 1996. 109, 115
- [Pillarisetti *et al.* 2006] A. Pillarisetti, M. Pekarev, A. D. Brooks et J. P. Desai. *Evaluating the role of force feedback for biomanipulation tasks*. In *Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems*, Washington, DC, USA, 2006. 109
- [Pissard-Gibollet & Rives 1995] R. Pissard-Gibollet et P. Rives. *Applying visual servoing techniques to control a mobile hand-eye system*. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, Mai 1995. 56
- [Pissard-Gibollet 1993] R. Pissard-Gibollet. *Asservissement Visuel d’un Robot Mobile*. PhD thesis, École des Mines de Paris, Paris (France), Décembre 1993. 45, 46, 49, 53, 56, 112, 115, 120
- [Podsedkowski 1998] L. Podsedkowski. *Path planner for nonholonomic mobile robot with fast replanning procedure*. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, volume 4, pages 3588–3593, Leuven, Belgium, May 1998. 38
- [Prajoux 1979] R.E. Prajoux. *Visual tracking*. In D. Nitzan et al, éditeur, *Machine intelligence research applied to industrial automation*, pages 17–37. SRI International, 1979. 112
- [Prats *et al.* 2007] M. Prats, P. Martinet, A. Del Pobil et S. Lee. *Vision/force coupling in task-oriented grasping and manipulation*. In *IROS*, 2007. 114
- [Quinlan 1994] S. Quinlan. *Real-Time modification of collision-free paths*. PhD thesis, Stanford University, Computer Science Department, December 1994. 38
- [Remazeilles & Chaumette 2007] A. Remazeilles et F. Chaumette. *Image-based robot navigation from an image memory*. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 55, no. 4, pages 345–356, April 2007. 39
- [Remazeilles *et al.* 2006] A. Remazeilles, N. Mansard et F. Chaumette. *Qualitative Visual Servoing : application to the visibility constraint*. In *IROS’06*, Beijing, China, Octobre 2006. 67
- [Remazeilles 2004] A. Remazeilles. *Navigation à partir d’une mémoire d’images*. PhD thesis, Université de Rennes I, 2004. 37, 38, 39, 40, 41, 88, 115
- [Rives & Azinheira 2004] P. Rives et J.R. Azinheira. *Linear structures following by an airship using vanishing point and horizon line in a visual servoing scheme*. In *International Conference on Robotics and Automation, ICRA’04*, New Orleans, USA, May 2004. 115
- [Royer *et al.* 2007] E. Royer, M. Lhuillier, M. Dhome et JM Lavest. *Monocular Vision for Mobile Robot Localization and Autonomous Navigation*. *International Journal of Computer Vision*, vol. 74, no. 3, pages 237–260, 2007. 38, 88
- [Samson *et al.* 1991] C. Samson, M. Le Borgne et B. Espiau. *Robot control : The task function approach*. Oxford science publications, 1991. 47, 49, 50, 51, 57, 70, 112
- [Samson 1992] C. Samson. *Path following and time-varying feedback stabilization of a wheeled mobile robot*. In *ICARCV*, Singapore, Septembre 1992. 61

- [Sanderson & Weiss 1980] A.C. Sanderson et L.E. Weiss. *Image based visual servo control using relational graph error signal*. In Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society, Cambridge, UK, Octobre 1980. [112](#)
- [Schramm & Morel 2006] F. Schramm et G. Morel. *Ensuring visibility in calibration-free path planning for image-based visual servoing*. IEEE Trans. Robotics, vol. 22, no. 4, pages 848–854, 2006. [67](#), [114](#)
- [Schramm et al. 2004] Florian Schramm, Guillaume Morel, Alain Micaelli et Anne Lottin. *Extended-2D Visual Servoing*. In International Conference on Robotics and Automation, pages 267–273, 2004. [113](#)
- [Segvic et al. 2009] S. Segvic, A. Remazeilles, A. Diosi et F. Chaumette. *A mapping and localization framework for scalable appearance-based navigation*. Computer Vision and Image Understanding, vol. 113, no. 2, pages 172–187, February 2009. [38](#), [88](#)
- [Shimoda et al. 2005] S. Shimoda, Y. Kuroda et K. Iagnemma. *Potential Field Navigation of High Speed Unmanned Ground Vehicles on Uneven Terrain*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005. [40](#)
- [Shirai & Inoue 1973] Y. Shirai et H. Inoue. *Guiding a robot by visual feedback in assembling tasks*. Pattern Recognition, vol. 5, no. 2, pages 99–106, 1973. [111](#), [115](#)
- [Siciliano & Slotine 1991] B. Siciliano et J.-J. Slotine. *A general framework for managing multiple tasks in highly redundant robotic systems*. In International Conference on Advanced Robotics (ICAR), pages 1211 – 1216, 1991. [51](#)
- [Siegwart & Nourbakhsh 2004] R. Siegwart et I.R. Nourbakhsh. Introduction to autonomous mobile robots. A bradford book, Intelligent robotics and autonomous agents series. The MIT Press, 2004. [37](#), [38](#), [40](#)
- [Sony 2001] Sony. *SONY DFW-VL 500 and DFW-V 500*. Rapport technique, Sony, 2001. [44](#), [117](#)
- [Souères & Cadenat 2003] P. Souères et V. Cadenat. *Dynamical sequence of multi-sensor based tasks for mobile robots navigation*. In SYROCO, Wroclaw, Poland, Septembre 2003. [53](#), [56](#), [57](#), [58](#), [62](#), [63](#), [114](#)
- [Souères et al. 1998] P. Souères, T. Hamel et V. Cadenat. *A path following controller for wheeled robots which allows to avoid obstacles during the transition phase*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Leuven, Belgium, Mai 1998. [62](#)
- [Swain 1999] Ricardo Swain. *Contrôle de tâches référencées vision pour la navigation d'un robot mobile en milieu structuré*. PhD thesis, Université Paul Sabatier Toulouse 3, 1999. [53](#), [115](#)
- [Tahri 2004] O. Tahri. *Utilisation des moments en asservissement visuel et en calcul de pose*. PhD thesis, Université de Rennes I, 2004. [114](#)
- [Tamadazte et al. 2009] B. Tamadazte, N. Le Fort-Piat, S. Dembélé et E. Marchand. *Microassembly of complex and solid 3D MEMS by 3D vision-based control*. In IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Saint-Louis, USA, Octobre 2009. [109](#)
- [Tamadazte et al. 2010] B. Tamadazte, E. Marchand, S. Dembélé et N. Le Fort-Piat. *CAD model based tracking and 3D visual-based control for MEMS microassembly*. The Int. Journal of Robotics Research, IJRR, vol. 29, no. 11, pages 1416–1434, September 2010. [115](#)
- [Tarbouriech & Souères 2010] S. Tarbouriech et P. Souères. *Image-based Visual Servo Control Design with Multi-Constraint Satisfaction*. In Visual servoing via advanced numerical methods. Springer Verlag, 2010. [114](#)

- [Taylor & Ostrowski 2000] C. Taylor et J. Ostrowski. *Robust vision based pose control*. In IEEE International conference on robotics and automation, volume 3, pages 2734–2740, San Francisco, California, USA, 2000. 113
- [Thrun *et al.* 2000] S. Thrun, W. Burgard et D. Fox. *A real time algorithm for mobile robot mapping with applications to multi-robot and 3d mapping*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, USA, April 2000. 37
- [Triggs *et al.* 2000] B. Triggs, P. McLauchlan, R. Hartley et A. Fitzgibbon. *Bundle adjustment - A modern synthesis*. In Vision Algorithms : Theory and Practice. Springer- Verlag, 2000. 84
- [Tsakiris *et al.* 1996] D. P. Tsakiris, C. Samson et P. Rives. *Vision-based time-varying stabilization of a mobile manipulator*. In ICARCV, Westin Stamford (Singapore), Décembre 1996. 60, 115
- [Tsakiris *et al.* 1997] D.P. Tsakiris, P. Rives et C. Samson. *Applying visual servoing techniques to control non-holonomic mobile robots*. In Proceedings of the workshop on new trends in image-based robot servoing (IROS'97), Grenoble, France, September 1997. 60
- [Tsakiris *et al.* 1998] D.P. Tsakiris, P. Rives et C. Samson. The confluence of vision and control, chapitre Extending Visual Servoing Techniques to Nonholonomic Mobile Robots. Springer-Verlag, 1998. 60
- [Utkin 1992] V.I. Utkin. Sliding modes in control optimization. Springer-Verlag, 1992. 96, 97, 99
- [Vahrenkamp *et al.* 2008] N. Vahrenkamp, S. Wieland, P. Azad, D. Gonzalez, T. Asfour et R. Dillmann. *Visual Servoing for Humanoid Grasping and Manipulation Tasks*. In IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pages 406–412, 2008. 115
- [Vassalo *et al.* 2000] R. Vassalo, H. Schneebeli et J. Santos-Victor. *Visual servoing and appearance for navigation*. Robotics and autonomous systems, 2000. 88, 89, 115
- [Victorino & Rives 2004] A.C. Victorino et P. Rives. *An hybrid representation well-adapted to the exploration of large scale indoors environments*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2930–2935, New Orleans, USA, 2004. 37, 38, 39
- [Vitrani *et al.* 2007] M.A. Vitrani, G. Morel, Mitterhofer H. et N. Bonnet. *Robust ultrasound-based visual servoing for beating heart intracardiac surgery*. In ICRA, Roma, Italy, 2007. 115
- [Weiss 1984] L.E. Weiss. *Dynamic visual servo control of robots : an adaptive image-based approach*. PhD thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, 1984. 112
- [Wunsch & Hirzinger 1997] P. Wunsch et G. Hirzinger. *Real-Time visual tracking of 3D objects with dynamic handling of occlusion*. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Albubquerque, Mexico, Avril 1997. 67
- [Zanne *et al.* 2000] P. Zanne, G. Morel et F. Plestan. *Robust Vision Based 3d Trajectory Tracking Using Sliding Mode Control*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, USA, 2000. 96
- [Zanne *et al.* 2003] P. Zanne, G. Morel et F. Plestan. *A robust 3D vision-based control and planning*. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, Taipei, Taiwan, May 2003. 114

Troisième partie

Sélection d'articles

Les cinq publications jointes à ce manuscrit sont les suivantes :

- *Treating image loss using the vision/motion link : a generic framework*. D. Folio, V. Cadenat. Computer Vision, édité par : Xiong Zhihui ; IN-TECH ; 538p., N°ISBN 978-953-7619-21-3, Novembre 2008, Chapitre 4.
- *A comparison of two sequencing techniques to perform a vision-based navigation task in a cluttered environment*. V. Cadenat, D. Folio, A. Durand Petiteville. Accepté dans Advanced Robotics (à paraître courant 2012).
- *Dealing with visual features loss during a vision-based task for a mobile robot*. D. Folio, V. Cadenat. International Journal of Optomechatronics, special issue on visual servoing, Vol. 2, N°3, pp. 185–204, Juillet 2008.
- *A reactive path-following controller to guarantee obstacle avoidance during the transient phase*. V. Cadenat, P. Souères, T. Hamel. International Journal of Robotics and Automation, Vol. 21, N°4, pp. 256–265, 2006.
- *2D visual servoing for a long range navigation in a cluttered environment*. A. Durand Petiteville, S. Hutchinson, V. Cadenat and M. Courdesses. 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, 12–15 décembre 2011, Orlando, FL, USA.

Contribution à la navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteurs

Résumé : Dans ce manuscrit, nous nous intéressons au problème de la navigation d'un robot mobile par commande référencée multi-capteurs. Notre objectif est d'effectuer des tâches de navigation guidées par la vision dans des environnements d'intérieur structurés peu connus, possiblement évolutifs et où l'homme peut être présent. Les missions considérées pourront inclure de longs déplacements et consisteront à positionner le robot vis-à-vis d'un amers ou d'une personne d'intérêt. Leur position dans la scène étant inconnue, ils seront repérés par la vision. Afin de pouvoir réaliser de telles missions, différents problèmes doivent être traités : le mouvement vers le but, l'évitement d'obstacles, le traitement des occultations, la réalisation de longs déplacements. Si les trois premiers points ont un caractère intrinsèquement local, le dernier nécessite des compétences globales.

Les travaux que nous avons menés cherchent à répondre à ces différents problèmes. Tout d'abord, nous nous sommes focalisés sur les aspects « locaux ». Nous avons ainsi exploité l'asservissement visuel 2D pour réaliser la tâche de navigation nominale et permettre au robot de converger vers un amers ou une personne d'intérêt. Cependant, bien que cette technique présente de bonnes propriétés de robustesse, elle ne permet pas à elle seule de traiter efficacement les problèmes de collisions et d'occultations. Une de nos premières contributions a donc consisté en le développement de stratégies de commande garantissant la non collision en présence d'obstacles non occultants. Sur la base de ces résultats, nous nous sommes intéressés à la gestion des occultations et avons développé des algorithmes permettant de reconstruire les indices visuels lorsque ceux-ci sont indisponibles. Nous les avons ensuite couplés à nos stratégies de commande afin que le robot puisse évoluer à partir des indices visuels réels ou reconstruits selon le cas. L'association de ces différentes techniques et algorithmes a permis de réaliser efficacement des tâches de navigation référencées vision en présence d'obstacles occultants et non occultants. Cependant, elle nécessite que l'amer ou la personne d'intérêt soit visible dès le début de la mission, ce qui n'est pas le cas lorsque l'on souhaite réaliser de longs déplacements. Nos dernières contributions sont donc focalisées sur ce problème. Afin de conférer au robot les compétences globales nécessaires, nous avons couplé une carte topologique représentant l'environnement à un algorithme de supervision gérant la stratégie de commande. Le robot est ainsi devenu capable d'effectuer de longs déplacements dans des scènes peu connues. L'ensemble de ces travaux a été validé en simulation et expérimentalement sur les différents robots à disposition. Les résultats obtenus montrent la pertinence de l'approche proposée et ouvrent des perspectives prometteuses dans et hors du contexte de la navigation.

Mots clés : Asservissement visuel, commande référencée multi-capteur, navigation.

A contribution to mobile robots navigation using multi-sensor-based control

Abstract : In this manuscript, we consider the problem of mobile robots navigation using multi-sensor-based control. Our objective is to safely perform vision-based displacements through poorly known indoor environments which may be evolutive and cluttered. The missions to be realized consist in positioning the vehicle with respect to a landmark or a person of interest. To do so, different problems have to be addressed : the motion towards the goal, the obstacle avoidance, the occlusion management, the realization of long range vision-based displacements. If the first three mentioned points are typically local issues, the last one requires to give the robot global skills.

Our works have dealt with each of these problems, but, in a first step, we have only considered local issues. We have thus developed an image based visual servoing (IBVS) allowing to make the robot converge towards either a landmark or a person of interest, thus performing the nominal vision-based task. However, although this kind of control is known for its nice robustness properties, it does not allow to efficiently treat the problems of collisions and occlusions. Therefore, our next contributions have consisted in designing multi-sensor-based control strategies guaranteeing non collision when the environment is cluttered with non occluding obstacles. Then, in the sequel of these results, we have addressed the problem of the image features loss. We have designed algorithms allowing to reconstruct the visual signals when an occlusion occurs. These algorithms have then been coupled to the above mentioned control strategies, allowing to safely perform the navigation task amidst both occluding and non occluding obstacles. At this step, the mission can be realized only if the goal can be perceived from the robot initial configuration, which is not the case for a long range navigation. Our last contributions have tried to answer this problem by giving the vehicle the required global skills. To do so, we have coupled a topological map representing the environment to a supervision algorithm managing the control strategy. In this way, the robot is able to perform vision-based long range displacements in an environment cluttered with both occluding and non occluding obstacles. These works have been validated in simulation and implemented on our robots. The obtained results have shown the efficiency of the proposed approach and have opened new interesting research axes.

Keywords : Visual servoing, multi-sensor-based control, navigation.
