



HAL
open science

**Conception d'un algorithme de coordination hybride de groupes de robots sous-marins communicants.
Application : acquisition optique systématique et détaillée des fonds marins**

Seifallah Ben Saad

► **To cite this version:**

Seifallah Ben Saad. Conception d'un algorithme de coordination hybride de groupes de robots sous-marins communicants. Application : acquisition optique systématique et détaillée des fonds marins. Système multi-agents [cs.MA]. Université de Bretagne occidentale - Brest, 2016. Français. NNT : 2016BRES0052 . tel-01505280v2

HAL Id: tel-01505280

<https://theses.hal.science/tel-01505280v2>

Submitted on 13 Apr 2017

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.

THÈSE / UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE BRETAGNE OCCIDENTALE

- *Mention : STIC / Automatique*
École Doctorale SICMA

Présentée par

Ben Saad Seifallah

Préparée à l'ENSTA Bretagne
Equipe OSM, Lab-STICC UMR CNRS 6285

Conception d'un algorithme de
coordination hybride de groupes
de robots sous-marins
communicants

Application : acquisition optique
systématique et détaillée des
fonds marins



Thèse soutenue le 14 septembre 2016

Devant le jury composé de :

Lionel LAPIERRE

Maitre de conférence, HDR, LIRMM / *rapporteur*

Nacer Kouider M'SIRDI

Professeur des Universités, HDR, Aix Marseille Université et
polytechnique Marseille / *rapporteur*

François CHARPILLET

Directeur de recherche, INRIA / *Examineur*

Luc JAULIN

Professeur des Universités, ENSTA Bretagne / *Examineur*

Frédéric DAMBREVILLE

Docteur, HDR, direction générale de l'armement / *directeur de thèse*

Benoit ZERR

Enseignant Chercheur, HDR, ENSTA Bretagne / *encadrant*

Ecole Doctorale Santé, Information, Communications,
Mathématiques, Matière (ED SICMA)

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE
BRETAGNE OCCIDENTALE

Présentée par

Ben Saad Seifallah

Pour obtenir le titre de Docteur de l'Université de Bretagne
Occidentale

Conception d'un algorithme de
coordination hybride de groupes de
robots sous-marins communicants

Travaux préparés au laboratoire STIC/OSM(Ocean Sensing and
Mapping), ENSTA Bretagne (ex :ENSEITA), Brest

Résumé

Cette thèse présente l'étude d'une stratégie de coordination hybride d'un groupe de robots sous-marins pour la recherche d'objets de petites dimensions ou de singularités sur les fonds marins. Chaque robot est équipé d'un module de perception utilisant la librairie de traitement d'image OpenCV qui lui permet d'apercevoir les autres éléments de la meute ainsi que l'environnement d'évolution de la mission. Cette stratégie hybride est constituée de deux phases : une phase de mise en formation géométrique et une phase d'acquisition des données vidéo. La première phase s'appuie sur des algorithmes de type "essaims" alors que la seconde se fonde sur une méthode hiérarchique de coordination. En cas de perte de la formation, le groupe de robots quitte le mode hiérarchique et reprend le mode essaim pour se reformer. Ces changements de modes sont contrôlés par une machine à états finis. Avant d'entamer une expérimentation en grandeur nature, la méthodologie et les algorithmes de coordination doivent être testés et validés par simulation. Dans ce contexte, un simulateur basé sur le logiciel Blender a été conçu de façon à ce qu'il tienne compte des différentes contraintes liées à l'évolution des robots dans l'environnement sous-marin. Les résultats de simulation d'une meute de 3 AUVs montrent la capacité de notre stratégie à optimiser l'exécution d'une mission d'acquisition vidéo par un groupe de robots autonomes contrôlés par la vision et coordonnés par une stratégie hybride.

MOTS-CLÉS : Coopération multi-robots, Stratégie de coordination, Contrôle de la formation, Architectures de commande, Simulateur multi-robot, Contrôle visuel.

Abstract

In the underwater environment, the needs of data acquisition have significantly increased over the last decades. As electromagnetic waves show poor propagation in sea water, acoustical sensing is generally preferred. However, the emergence of small and low cost autonomous underwater vehicles (AUV) allow for rethinking the underwater use of optical sensors as their small coverage can be significantly improved by using a fleet of coordinated underwater robots. This paper presents a strategy to coordinate the group of robots in order to systematically survey the seabed to detect small objects or singularities. The proposed hybrid coordination strategy is defined by two main modes. The first mode relies on a swarm algorithm to organize the team in geometrical formation. In the second mode, the robot formation is maintained using a hierarchical coordination. A finite state machine controls the high level hybrid strategy by defining the appropriate coordination mode according to the evolution of the mission. Before sea validation, the behavior and the performance of the hybrid coordination strategy are first assessed in simulation. The control of individual robots relies on visual servoing, implemented with the OpenCV library, and the simulation tool is based on Blender software. The dynamics of the robots has been implemented in a realistic way in Blender by using the Bullet solver and the hydrodynamic coefficients estimated on the actual robot. First results of the hybrid coordination strategy applied on a fleet of 3 AUV's, show execution of a video acquisition task by a group of autonomous robots controlled by vision and coordinated by a hybrid strategy. **KEYWORDS :** Multi-robot cooperation, coordination, formation control, control architectures, visual control simulator.

Remerciements

A l'issue de la rédaction de ce manuscrit, je suis convaincu que la thèse est loin d'être un travail solitaire. En effet, je n'aurais jamais pu réaliser ce travail doctoral sans le soutien d'un grand nombre de personnes dont la générosité, la bonne humeur et l'intérêt manifestés à l'égard de ma recherche m'ont permis de progresser dans cette phase délicate de "l'apprenti-chercheur".

Je tiens tout d'abord à remercier le directeur de cette thèse, Monsieur Frédéric Dambreville Docteur à la direction générale de l'armement, pour avoir accepté de diriger cette thèse.

Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à Monsieur Benoit Zerr, Docteur, Enseignant-Chercheur à l'ENSTA Bretagne pour avoir encadré cette thèse et m'avoir permis de la réaliser dans les meilleures conditions. Je tiens particulièrement à le remercier de la liberté d'action qu'il m'a donnée à chaque étape de cette aventure. J'espère avoir été digne de la confiance qu'il m'avait accordée et que ce travail est finalement à la hauteur de ses espérances. Quoi qu'il en soit, j'ai beaucoup appris à ses côtés et je suis très honoré de l'avoir eu comme encadrant. Mes vifs remerciements s'adressent à Monsieur Irvin Probst, Enseignant-Chercheur à l'ENSTA Bretagne pour ses conseils et ses remarques constructives et discussions fructueuses le long de ces trois années de thèse.

Je tiens à remercier les membres de mon jury, **Monsieur Lionel Lapierre** Maître de conférence à l'université de Montpellier, Monsieur Kouider Nacer M'SIRDI, Professeur des Universités à Aix Marseille Université et polytechnique Marseille d'avoir donné de leur temps et accepté de rapporter ce manuscrit.

Je tiens également à remercier Monsieur Luc Jaulin, Professeur des universités à l'ENSTA Bretagne et Monsieur Francois Charpillet, Directeur de recherche, à l'INRIA à Rennes d'avoir accepté d'examiner ce travail de thèse.

Je remercie tous mes collègues de bureau : Ahmed, Alan, Amine, Ayda, Ayemric, Helmi, Imen et Ridha tous les membres de l'équipe OSM à l'ENSTA Bretagne.

Enfin, à titre personnel je tiens à remercier mes parents et mes frères et soeurs de m'avoir soutenus toutes ces années et qui ont fait de mon bonheur leur raison de vivre et qui ont sacrifié tant pour que j'en sois là aujourd'hui.

Table des matières

Résumé	ii
Abstract	iv
Remerciements	vi
Liste des figures	xiii
Liste des tableaux	xvii
Abréviations	xix
Introduction générale	1
1 Etat de l'art	5
1.1 La robotique sous marine	5
1.1.1 Introduction	5
1.1.2 Historique	6
1.1.3 Les véhicules sous-marins	9
1.1.3.1 Les sous-marins	9
1.1.3.2 Les robots sous-marins	9
1.1.3.3 Les véhicules sous-marins téléopérés (Les ROV) . .	10
1.1.3.4 Les véhicules sous-marins autonomes (Les AUV) .	11
1.1.4 Les applications des robots sous marins	15
1.1.4.1 Le secteur industriel	15
1.1.4.2 Le secteur militaire	15
1.1.4.3 L'environnement	15
1.1.4.4 Les applications Scientifiques	16
1.2 Les systèmes multi-robot	17
1.2.1 Introduction	17
1.2.2 Du mono-robot aux multi-robots	20
1.2.3 Différentes applications des systèmes multi-robots	22
1.2.4 Les systèmes multi-robots sous marins	22
1.3 Architectures de coordination et stratégie de coopération dans un SMR	24

1.3.1	Introduction	24
1.3.2	Architectures de coordinations	26
1.3.2.1	Architecture de coordination centralisée	26
1.3.2.2	Architecture de coordination décentralisée	28
1.3.2.3	Architecture de coordination hybride	30
1.3.3	Objectifs et mécanismes de coopération dans un SMR	31
1.3.3.1	La coopération dans les SMR	31
1.3.3.2	Mécanismes de coopération dans les SMR	33
1.3.3.3	Tâches coopératives et missions multi-robots	34
1.3.4	Navigation en formation d'un SMR	35
1.3.5	Qu'est ce qu'une formation (La nature comme source d'inspiration)	39
1.3.6	Le contrôle de la navigation en formation en robotique	41
1.3.6.1	Les robots terrestres	42
1.3.6.2	Les robots aériens	42
1.3.6.3	Les robots sous-marins	43
1.3.7	Application sous-marine des systèmes multi-robots en formation	44
1.3.8	Les critères d'évaluations de la navigation en formation	47
1.3.8.1	Stabilité, fiabilité, sensibilité, flexibilité	47
1.3.8.2	Temps d'exécution	48
1.3.9	Communication	48
1.3.9.1	Communication sous-marine	50
1.3.10	Naviguation	52
1.3.10.1	Planification de trajectoire	52
1.3.10.2	Évitement d'obstacles	53
1.4	Conclusion	54
2	Proposition d'une nouvelle stratégie de coordination hybride	56
2.1	Introduction	56
2.2	Rappel de la mission : cartographie des fonds sous-marins par un groupe de robots équipés de capteurs optiques	57
2.2.1	Stratégie de coordination	58
2.2.1.1	Contexte	58
2.2.1.2	Différentes tâches avec divers modes de coordination	59
2.2.1.3	Proposition d'une stratégie de coordination hybride	61
2.2.1.4	Mécanisme de passage d'un mode de coordination à un autre	62
2.3	Gestion de la coordination hybride	64
2.4	Mise en formation en mode essaim	67
2.4.1	Choix de la formation géométrique	67
2.4.2	Algorithme de mise en formation en "V" pour un groupe de trois robots	70
2.4.3	Généralisation de l'algorithme de mise en formation à $2n+1$ robots	73

2.5	Maintien de la formation en mode hiérarchique	78
2.5.1	Principe de fonctionnement du mode hiérarchique (exemple un essaim de 3 robots)	78
2.5.2	La désignation d'un leader	78
2.5.3	L'alignement du cap suivant la direction de navigation	79
2.5.4	La navigation en groupe par asservissement visuel	79
2.5.5	Généralisation du mode hiérarchique	82
2.6	Communication	83
2.7	Conclusion	85
3	Contrôle et commande par vision	87
3.1	Introduction	87
3.2	Le capteur optique dans le contexte sous marin et les spécificités des images sous marines	89
3.2.1	Vidéos et images sous marines	89
3.2.2	Problèmes spécifiques aux images sous marines	90
3.3	La détection et la reconnaissance d'objets par vision dans le domaine sous marins	92
3.3.1	Du sonar au caméra	92
3.3.2	Les contraintes et les avantages liés à l'utilisation du capteur optique pour les robots sous marins	93
3.4	Méthodes et algorithmes de vision utilisés en robotique sous marine	94
3.4.1	Le rôle de la vision dans la robotique mobile	94
3.4.2	L'existant dans l'utilisation de la vision dans la robotique sous marine	96
3.4.3	Les méthodes de détection et de reconnaissance d'objet clas- siques (formes, couleurs)	97
3.5	L'algorithme de traitement d'image proposé	100
3.5.1	Présentation de la chaine de traitement d'image proposée	100
3.5.2	Pré-traitement de l'image sous marine	101
3.5.3	Localisation des robots	103
3.5.4	Extraction des barre-codes	106
3.6	Conclusion	108
4	Plateforme d'expérimentation	110
4.1	Introduction	111
4.2	Contexte	111
4.3	Modélisation des AUVs	115
4.3.1	présentation de l'unité robotique utilisé en expérimentation(AC- ROV)	115
4.3.2	présentation de l'unité robotique utilisé en simulation (Le CISCREA)	117
4.3.3	Conventions et hypothèses de base	118
4.3.3.1	Cinématique	118
4.3.3.2	Dynamique	120

4.4	L'architecture du simulateur	124
4.4.1	La couche physique	125
4.4.2	La couche rendu	127
4.4.3	La couche de contrôle	127
4.4.4	L'interaction entre les AUVs et le simulateur	128
4.4.4.1	principe de fonctionnement du simulateur	128
4.5	Conclusion	129
5	Analyse et discussion des résultats	132
5.1	Introduction	132
5.2	Validation des algorithmes de vision par expérimentation	133
5.2.1	Plateforme expérimentale	134
5.2.2	Principe et objectif de la mission	134
5.2.3	Loi de commande par asservissement visuel utilisé	135
5.2.4	Méthodes de calcul du barycentre de la cible	136
5.2.4.1	technique de seuillage	136
5.2.4.2	technique de conversion RGB HSV	138
5.2.4.3	technique de séparation des canaux r g et b	140
5.2.4.4	technique de suivi d'objet selon un modèle de cor- respondance	142
5.2.4.5	technique choisie	144
5.3	Étude des caractéristiques en simulation de la stratégie de coordina- tion hybride	147
5.3.1	Stabilité, convergence et robustesse de l'algorithme de mise en formation V (mode essaim)	147
5.3.1.1	Évaluation de l'erreur de convergence	147
5.3.1.2	Évaluation du temps de convergence	151
5.3.1.3	Étude de la robustesse de la procédure de mise en formation	152
5.3.1.4	Évaluation du taux de convergence	154
5.4	Stabilité et convergence du mode hiérarchique	154
5.5	Stabilité, convergence et robustesse de la stratégie de coordination hybride	158
5.6	conclusion	170
	Conclusions et perspectives	172
A	Support logiciel : OpenCv	176
A.1	Historique	176
A.2	Qu'est-ce que OpenCV ?	177
A.3	Applications	178
B	Support logiciel Blender	180
B.1	Qu'est ce que c'est Blender ?	180

B.2	Les caractéristiques et fonctionnalités de Blender	181
C	La vision comme source d'information	183
C.1	La vision comme source d'information	183
C.1.1	Caractéristique de l'image numérique	183
C.1.2	La vision humaine comparé à la vision artificielle	185
C.1.3	Les espaces de représentation des couleurs RGB et HSV . . .	188
D	Publications et conférences	190
	Bibliographie	192

Table des figures

1.1	Le sous-marin de Bushnell	7
1.2	Les premiers sous marins autonomes. (a)Le SPURV (USA,1977), (b)L'epaulard (France,1967).	8
1.3	Les différents types de véhicules sous-marins.	10
1.4	Exemple de robot ROV. (a)L2ROV, du LIRMM, (b)Victor 6000, de l'Ifremer.	12
1.5	Exemples d'AUV grand fond. (a)AstrX et IdefX, Ifremer, (b)Daurade, ECA/GESMA.	12
1.6	Exemples d'AUV côtiers.(a)Remus, d'hydroid robot camera, (b)Lirmia2, LAFAMIA/LIRMM	13
1.7	Exemples de planeurs sous-marins. (a)IKA Seaglider, iRobot, (b)SeaExplorer, ACSA, (c)Slocum glider, Teledyne/WHOI, (d)global view.	14
1.8	Exemples de systemes biomimétriques. (a)"flat-fish" (Yamamoto), (b)Angels (IRCCYN/Mines de Nantes)	14
1.9	Tâches sous-marines fréquentes,(a)vérification de la santé des algues,(b)détection de fissures,(c)exploration des épaves,(d)détection d'objet sur le fond marin.	17
1.10	Exemples de systèmes mono-robot.(a)NAO, (b)BIGDOG, (c)ASIMO, (d)MER-A	21
1.11	Exemples d'application des SMR. (a) dans le domaine de l'agricul- ture, (b) comme outil de divertissement.	23
1.12	Le projet ASIMOV.	23
1.13	Des comportements collectifs dans la nature, (a)Une harde de san- gliers prenant la fuite,(b)une colonie de fourmis se déplaçant en groupe,(c)une meute de loups en chasse,(d)un banc de poissons détecte un prédateur.	37
1.14	Analogie entre le déplacement des patrouilles d'avions militaires et les oiseaux migrateurs volant en formation "V".	41
1.15	Une formation d'AUV pour le suivi de grandeurs physiques (source : http://www.grexproject.eu).	44
1.16	Une meute de robots sous-marin, (a) en formation triangle, (b) en formation ligne.	46
1.17	déplacement d'un SMR en formation pour uen mission de surveillance (source : [pC13]).	46
1.18	Navigation en formation ligne d'un SMR sous marin [sou14].	47

2.1	La machine à état finis responsable du contrôle de la stratégie de coordination hybride.	63
2.2	La structure de la machine à états finis.	64
2.3	Les trois étapes du mode essaim (building the formation mode). . .	71
2.4	Les rendus des caméras de chacun des robots du groupe à la fin de la mise en formation géométrique. (a) la camera du premier robot, (b)la camera du deuxième robot, (c)la camera du troisième robot,(d) vue extérieure des 3 robots à la fin de la mise en formation en triangle équilatéral résultant de la coordination en mode essaim.	74
2.5	Les étapes de la mise en formation géométrique en mode essaim ("building the formation"mode) pour une flottille de cinq robots, (a) phase de recherche de voisins, (b) détermination du centre de la formation, (c) définition du système de coordonnées locale à la formation, (d) allocation des IDs, (e) la mise en formation avec les voisins potentiels, (f) formation en V stable	75
2.6	Le calcul des paramètres lx_i , ly_i et d_i par rapport à un robot i du groupe	76
2.7	La disposition géométrique des robots au début de la phase d'acquisition vidéo (mode hiérarchique)	80
2.8	Vue d'une meute de trois robots naviguant en formation pour une mission acquisition video	80
2.9	construction d'une base stéréo par trois robots en mode hiérarchique.(a) rendue de la caméra du robot suiveur gauche, (b)rendue de la caméra du robot suiveur droite, (c) : traitement de l'image du robot maître afin de déterminer les consignes de trajectoire à envoyer aux robots esclaves.	81
2.10	Vue d'une meute de sept robots naviguant en formation en mode hiérarchique	82
3.1	Exemple d'images sous marines.[Baz08]	91
3.2	les robots CICSCREA munient de leurs barre-code dans des scènes sous marine.	99
3.3	construction d'une base stéréo par trois robots en mode hiérarchique.(a) rendue du camera du robot suiveur gauche, (b)rendue du camera du robot suiveur droite, (c) : traitement de l'image du robot maître afin de déterminer les consignes de trajectoire à envoyer aux robots esclaves, (c) : Schéma explicatif de la disposition des robots pour une acquisition vidéo.	101
3.4	La chaîne de traitement d'image.	102
3.5	Resultats du traitement d'image effectuer par le leader,(a)Conversion RGB/HSV,(b)Résultat final de l'identification et la localisation des autres robots, (c)binarization par rapport au jaune,(d)resultat du Top-Hat Black filter.	104
3.6	Exemples de résultats de l'étape de localisation des robots dans une scène sous marine.	105

3.7	Exemples de résultats de l'étape extraction des barre-codes des robots dans une scène sous marine.	107
4.1	Le robot AC-ROV SP 50 et les différents composants de son système de contrôle.[hc]	116
4.2	Le robot CISCREA et son modèle 3D.	118
4.3	Les repères Ned-frame et B-frame du robot sous marin [YCM ⁺ 14].	119
4.4	Architecture globale de la plateforme de simulation.	126
4.5	La chaine de contrôle du robot	128
4.6	Schéma représentatif du principe d'échange d'information entre le simulateur et les AUVs.	129
5.1	Environnement et matériel d'expérimentation.(a) La piscine de l'ENSTA Bretagne, (b) La plateforme expérimentale,(c) Les AC-ROVs en expérimentation.	134
5.2	Image acquise durant le centrage de la boîte jaune illustrant l'erreur entre le centre de la cible et le centre de l'image	135
5.3	Résultat de la technique de seuillage pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) image réelle, (b)image convertit en niveaux de gris, (c) : image seuillée, (d) : image résultat.	137
5.4	Résultat de la technique de conversion rgb/hsv pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) image réelle, (b)image convertit en niveaux de gris, (c) : image seuillée, (d) : image résultat.	139
5.5	Résultat de la technique de séparation des canaux R,G et B pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) :canal bleue de l'image réelle, (b) :canal vers de l'image réelle, (c) :canal rouge seuillé, (d) :canal bleue seuillé, (e) : canal vert seuillé, (f) : canal rouge seuillé (g) :image résultante de l'addition logique, (h) :image résultat, (i) :image réelle.	141
5.6	Résultat de la technique de conversion rgb/hsv pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) image réelle, (b)image convertit en niveaux de gris, (c) : image seuillée, (d) : image résultat.	144
5.7	L'évolution de la norme de l'erreur E (5.1) lorsque la méthode de conversion RGB/HSV est utilisée	145
5.8	L'évolution de la norme de l'erreur E (5.1)lorsque la méthode de séparation des canaux RGB est utilisée	145
5.9	L'évolution de la norme de l'erreur E (5.1) lorsque la méthode de seuillage est utilisée	146
5.10	Exemples de mise en formation triangle en mode essaim à partir de trois configurations initiales différentes (a), (b)et(c)	148
5.11	L'évolution des erreur individuelles de chaque robot (rouge,vert,bleue) et l'erreur globale (noir) durant la mise en formation. Résultats pour trois configurations initiales différentes des robots : (a), (b) et (c).	150
5.12	L'influence de la valeur de l'erreur globale initiale final au cours des essais sur l'erreur globale finale.	151

5.13	L'évolution la valeur de l'erreur globale final au cours des essais en simulation.	152
5.14	Estimation de la Durée d'exécution de procédure de mise en formation en fonction de l'erreur globale initiale.	153
5.15	Évaluation du taux de convergence de l'algorithme de mise en formation triangle.	155
5.16	Les différents loi d'asservissement Visuel appliqué par le leader sur les deux robot suiveur pour l'acquisition vidéo ne mode hiérarchique.	157
5.17	L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation sans perte de communication.	160
5.18	L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation sans perte de communication.	161
5.19	L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation sans perte de communication.	162
5.20	L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation avec perte de 80 % de communication.	163
5.21	L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation avec perte de 80 % de communication.	164
5.22	L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation avec perte de 80 % de communication.	164
5.23	L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation avec perte de 40 % de communication.	165
5.24	L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation avec perte de 40 % de communication.	166
5.25	L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation avec perte de 40 % de communication.	166
5.26	L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation avec perte de 20 % de communication.	167
5.27	L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation avec perte de 20 % de communication.	168
5.28	L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation avec perte de 20 % de communication.	168
5.29	L'influence de la perte de communication entre les AUVs sur $ecart_{moyen}$	169
A.1	Logo d'OpenCv	177
B.1	Exemples d'objets prédéfinis en Blender	180
C.1	Spectre de la lumière visible	184
C.2	Synthèse additive des couleurs	185
C.3	Image des composants de l'oeuil humain [ZMP01],[ZM]	185
C.4	(a) Cube des couleurs représentant l'espace RGB, (b) le triangle de Maxwell représentant l'espace RGB normalise.	188

Liste des tableaux

4.1	Les caractéristiques de l'AC-ROV	117
4.2	Les caractéristiques du CISCREA	118
4.3	Notation des variables relatifs au robot sous marins	119
4.4	Nomenclature des notations utilisées dans le modele de l'AUV	121
4.5	Les valeurs des différents paramètres hydrodynamique	123
4.6	La valeur de la force d'amortissement pour des différents vitesses linéaires	124

Abréviations

SMR	S ystème M ulti R obots
GESMA	G roupe d' É tudes S ous- M arines d' A tlantique
IRCCYN	I stitut de R echerche en C ommunications et C ybernétique de N antes
ECA	É tudes et C onstructions A éronautiques
LIRMM	L aboratoire d' I nformatique, de R obotique et de M icroélectronique de Montpellier
LAFMIA	F rench- M exican L aboratory of I nformatics and A utomatic C ontrol
GPS	G lobal P ositioning S ystem
Ifremer	I nstitut F rancais de R echerche pour l' É xploitation de la M er
AUV	A utonomous U nderwater V ehicle
ASV	A utonomous S urface V ehicle
ROV	R emotely O perated V ehicle
SONAR	S ound N avigation A nd R anging

Introduction générale

La mise en oeuvre d'un groupe de robots sous-marins parfaitement coordonnés qui se comportent comme une seule entité, constitue un défi scientifique majeur. La communication est un élément essentiel à la coordination des robots, elle peut être caractérisée par deux facteurs : le débit de communication et le volume d'information à communiquer. La communication est un élément essentiel à la coordination des robots, elle peut être caractérisée par deux facteurs : le débit de communication et le volume d'information à communiquer. La communication est un élément essentiel à la coordination des robots, elle peut être caractérisée par deux facteurs : le débit de communication et le volume d'information à communiquer.

Dans le monde sous-marin, l'optimisation de la communication passe par une réduction du débit d'information et donc une augmentation des traitements réalisés de façon autonome à bord des robots. Pour notre application, les traitements consistent à extraire une information de haut niveau à partir de l'analyse de séquence d'images vidéo (vision). Dans le principe, cette démarche peut être adaptée à d'autres types de capteurs sous-marins (acoustique, magnétique, optique cohérente). La bonne coordination du groupe requiert donc l'étude de stratégies de communication bat-débit assurant le contrôle du groupe et des méthodologies de coordination (hiérarchique, essaim, hybride) capable de s'adapter en temps réel à l'environnement sous-marin (Perte d'un robot, dégradation des performances des capteurs ou de la communication). Le placement dynamique optimal des robots est aussi étudié afin d'assurer la mission le plus efficacement possible. L'objectif de la mission du groupe de robots est la couverture systématique du fond marin par un capteur acoustique ou optique. Dans une première approche focalisée sur la

méthodologie de coordination, le choix du capteur s'est porté sur une caméra vidéo sous-marine, beaucoup plus facile à mettre en oeuvre et beaucoup moins onéreuse qu'un sonar sectoriel haute fréquence. Aussi, considérant les caractéristiques désirées dans notre application (mise en formation géométrique, acquisition systématique de données vidéo) une méthodologie unique de coordination n'est pas optimale car les actions à réaliser par le groupe sont de natures très différentes lors des différentes phases de la mission. Une architecture hybride de coordination, contrôlée par un automate à états finis, indique au groupe de robot le mode de coordination le plus approprié à la phase de la mission en cours de réalisation. Par exemple, si l'un des robots se perd, l'ensemble des robots utilise un mode essaim pour reconstituer la formation. En revanche, lorsque la formation est stable, les robots opèrent selon un mode hiérarchique pour l'acquisition des données vidéo. Avant de tester en mer ces stratégies de coordination, un outil de modélisation a été développé à partir du logiciel Blender, simulant à la fois l'environnement sous-marin, les capteurs optiques et la dynamique des robots. Chaque robot est un script python interagissant avec l'environnement Blender, commun à l'ensemble du groupe. Les robots modélisés correspondent aux mini-AUV's CISCREA de l'ENSTA Bretagne. Une technique de type LI-FI est adoptée pour la communication et, afin de faciliter l'identification, chaque AUV est muni d'un barre-code lumineux.

L'originalité de ce travail est de proposer une stratégie de coordination hybride qui s'adapte aux spécificités des tâches dans mission et qui indique au groupe de robot le mode de coordination le plus approprié à chaque phase de la mission en cours de réalisation. L'approche consiste à considérer l'image sous marine comme la seule source d'information sur l'environnement, ce qui a permis de développer des algorithmes de traitement d'image qui arrive à dépasser les contraintes du monde marin. Ensuite, pour la simulation, nous avons conçu une plateforme pour améliorer les résultats enregistrés par notre système multi-robot lorsqu'on implémente la stratégie hybride dessus.

Ce manuscrit se compose d'une introduction générale, de cinq chapitres et d'une conclusion générale.

Le **premier chapitre** consiste à introduire les systèmes multi-robots mobiles

en générale et ceux du domaine sous marins en particulier. Ensuite, nous nous intéressons aux différentes architectures de coordination et aux avantages et inconvénients de chacune d'elles. Le **second chapitre** sera consacré introduire la stratégie de coordination proposée dans cette thèse. En premier lieu, nous décrirons les objectifs de l'application marine visée et nous analyserons ses caractéristiques afin de définir des stratégies de coordination adéquates. Le **troisième chapitre** illustre les concepts principaux de traitement d'images sous marines nécessaire pour le contrôle par vision des robots. Il présente le développement d'algorithmes de reconnaissance d'objets en vidéo sous-marine, avec une attention particulière apportée aux robots sous marins. Le **quatrième chapitre** est consacré à l'étude, la conception et la réalisation d'une plateforme de simulation de véhicules sous marins autonomes. Nous nous focalisons particulièrement sur la simulation d'une flottille de robots CISCREA. Enfin, le **dernier chapitre** est consacré à la présentation des résultats des essais en simulation, nous évaluons aussi les performances de la stratégie hybride proposée avec ces deux modes de fonctionnement en essaim et hiérarchique.

Une conclusion générale et des perspectives à ce travail de thèse seront exposées à la fin de ce manuscrit.

Chapitre 1

Etat de l'art

1.1 La robotique sous marine

Ce chapitre est consacré à un état de l'art sur les systèmes multi-robots mobiles en général et ceux du domaine sous-marin en particulier. Nous commencerons par l'historique des robots sous marins ainsi que leurs applications dans divers domaines, nous nous intéresserons ensuite aux systèmes multi-robots, leur apparition et leurs applications et nous allons nous concentrer en particulier sur l'étude des systèmes multi-robots sous-marins. Par la suite, nous nous focaliserons principalement sur les architectures de coordination et les stratégies de coopération qui leurs sont dédiées, leurs types et leur classification. Enfin, une attention particulière est accordée à la navigation des systèmes multi-robots en formation.

1.1.1 Introduction

Couvrant environ les deux tiers de la terre, l'océan a un grand effet sur l'existence future de tous les êtres humains. Environ trente-sept pour cent de la population mondiale vit à moins de 100 km de l'océan. Malgré cela, les chercheurs et les scientifiques en robotique se sont davantage concentrés sur l'exploration de l'environnement terrestre et l'étude des phénomènes atmosphériques. L'exploration des

profondeurs et l'exploitation de ses ressources constituent un enjeu économique majeur et un défi auquel les technologies actuelles ne permettent pas encore de répondre. Par exemple, on estime qu'il y a environ 2000 milliards de tonnes de nodules de manganèse sur le plancher de l'océan Pacifique près des îles hawaïennes. Les chercheurs ont découvert aussi, en utilisant des submersibles habités, qu'une grande quantité de dioxyde de carbone provient des fonds marins et des groupes d'organismes extraordinaires vivant dans des zones hydrothermales.

Les robots sous-marins y compris les véhicules téléguidés et les drones sous-marins autonomes peuvent nous aider à mieux comprendre les enjeux environnementaux marins, à protéger les ressources océaniques contre la pollution et à les utiliser efficacement pour le bien-être humain.

1.1.2 Historique

L'histoire des véhicules sous-marins n'est pas récente. On peut citer par ordre chronologique l'évolution de la recherche dans ce domaine.

On rapporte les premières tentatives à la mise en oeuvre pratique de cette idée dès l'époque d'Alexandre le Grand qui, d'après Aristote, avait développé un submersible primitif pour des missions de reconnaissance en 322 av. J.-C. Une machine similaire avait été développée en Chine vers 200 av. J.-C.

Durant l'ère moderne, l'Anglais William Bourne a effectué un premier pas vers le concept de véhicule sous-marin en 1578, en concevant un modèle étanche pouvant être alimenté en oxygène. Mais ses idées ne dépassèrent pas le stade de la conception.

Entre 1620 et 1624, le hollandais Cornelis Van Drebbel aurait navigué à quelques mètres sous les eaux de la Tamise. Il finira en 1664 par proposer un premier véhicule sous-marin avançant à l'aide de 12 rameurs équipés de rames spéciales. Ayant une forme ovoïde, il a pu être actionné de façon à réaliser des mouvements verticaux. Il a même été testé expérimentalement.

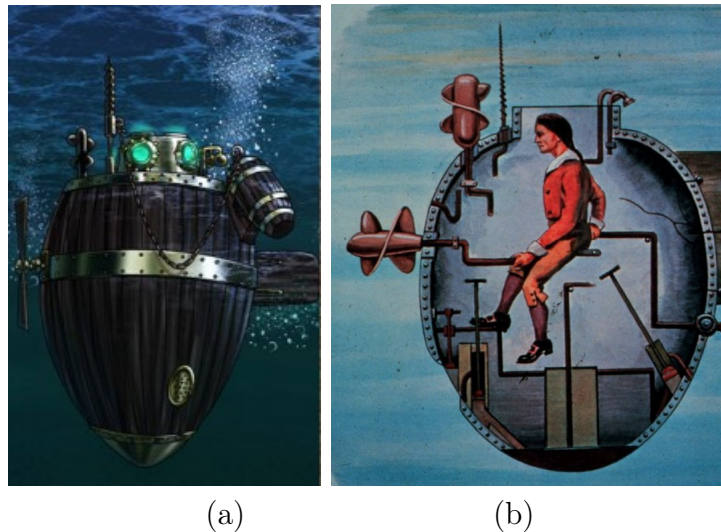


FIGURE 1.1 : Le sous-marin de Bushnell

En 1776, le premier véhicule sous-marin américain 'Turtle' a été présenté par David Bushnell et son frère (voir la figure 1.1). Construit en acier, il pouvait se déplacer de façon autonome. C'est le premier à être, d'une part équipé d'hélices pour sa propulsion et d'autre part d'une valve pour l'immersion et la remontée en surface. Il constitua le premier submersible autonome engagé dans un combat naval [Lio06].

Depuis cette époque, les véhicules sous-marins ont fortement évolué du point de vue de leur source de puissance. La recherche visait à se passer de la propulsion humaine et à exploiter d'autres sources d'énergie. Le Plongeur de la Marine nationale française, lancé en 1863, est le premier sous marin équipé d'un moteur à air comprimé et de 23 réservoirs de 180 PSI de pression (12 bar).

En 1888, Le Gymnote fut le premier submersible de la marine française, doté d'un moteur électrique de 55 CV alimenté par 564 accumulateurs. D'une apparence lisse et fuselée, le Gymnote mesurait 18 m de long. Son diamètre, en sa partie la plus large, était à peine de 2 m. Bien que construit pour une utilisation militaire, le Gymnote fut ensuite affecté à des missions expérimentales.

L'espagnol Isaac Peral a construit le premier sous-marin pleinement opérationnel en énergie électrique. Testé en mer le 8 septembre 1888, il possède deux torpilles, de nouveaux systèmes pour l'air, une hélice et des gouvernes, devançant ainsi

les sous-marins futurs. Malgré la courte durée de vie de ses batteries, il pouvait atteindre 10 noeuds sous l'eau.

Avec le changement de siècle, le développement et l'usage des sous-marins a évolué d'une façon impressionnante. Avec l'émergence de nombreuses technologies et innovations comme la généralisation du périscope sur la majorité des sous-marins de l'époque et la prédominance de la propulsion Diesel-électrique au niveau énergétique, le rythme d'adoption de sous-marins par de nombreuses marines s'est fortement accéléré. Dans les années 1950, l'énergie nucléaire commence à remplacer la propulsion Diesel-électrique. Les premiers véhicules sous-marins autonomes ont été développés au cours des années 60-70 [Spi07] [Lio06][MJ91] avec :

- Le SPURV (Self-Propelled Underwater Research Vehicle, USA, 1977) : pesant 480 kg, il pouvait atteindre une vitesse 2.2 m/s durant 5 heures à la file avec une capacité d'immersion maximale de 3000 m. Il a été utilisé pour faire des mesures de conductivité et de température appliquées à la modélisation de vagues [Lio06](voir la figure 1.2(a)).
- L'épaulard (France, 1976) : pesant 3 tonnes, il pouvait atteindre une vitesse de 12 noeuds durant 7 heures d'affilée avec une capacité d'immersion maximale de 6000 m et garder une liaison acoustique avec la surface[MJ91](voir la figure 1.2(b)).

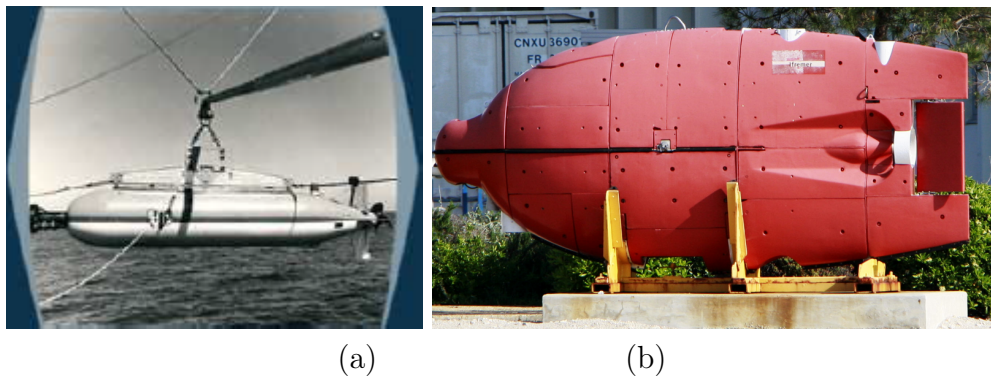


FIGURE 1.2 : Les premiers sous marins autonomes. (a)Le SPURV (USA,1977), (b)L'épaulard (France,1976).

1.1.3 Les véhicules sous-marins

Depuis la fin du XX^e siècle, les véhicules sous-marins ont fortement évolué d'un point de vue technologique. On peut les classer en deux catégories : les sous-marins et les robots sous-marins, dont nous allons faire un rapide état des lieux. Ils représentent également les ancêtres des véhicules sous-marins en activités régulières dans le monde entier [Alt03], [Dan02].

1.1.3.1 Les sous-marins

La première catégorie des véhicules sous-marins sont les submersibles et les sous-marins :

- Les sous-marins sont des véhicules de grandes dimensions manoeuvrés par un équipage, qui peut y résider durant la période de mission, notamment dans un contexte militaire.
- Les submersibles sont de petite taille et sont destinés à l'exploration des grandes profondeurs. Leurs principales missions ont été : la recherche de sources hydrothermales dans les océans ; les interventions sur des épaves ; etc.

1.1.3.2 Les robots sous-marins

Un robot sous-marin est un véhicule sous-marin inhabité. Il est à la fois propulsé d'une façon automatique et équipé d'une source d'énergie embarquée ou fournie par son bateau porteur. Il peut être contrôlé à distance (généralement filoguidé) ou autonome. Ces robots sont rapides en acquisition des données et ont une grande capacité à sécuriser tout type d'informations (physique, acoustique, visuelle) sous forme numérique selon leurs capacités de stockage et de traitements. Certains ont été utilisés comme plateforme équipée de préleveurs ou de divers capteurs. Ceci fait de leur usage une source potentielle de progrès scientifique et industrielle. La communauté robotique utilise souvent l'acronyme américain "UUV" ("Unmanned Underwater Vehicle") pour ces véhicules. Le degré d'autonomie (décision /énergie) de ces robots est défini par la nature de sa liaison avec la surface (voir la figure

1.3). Nous pouvons alors décider d'une première classification déclinée en deux catégories de véhicule sous-marins : les véhicules téléopérés reliés par un câble à la surface et les véhicules autonomes reliés par un lien acoustique.

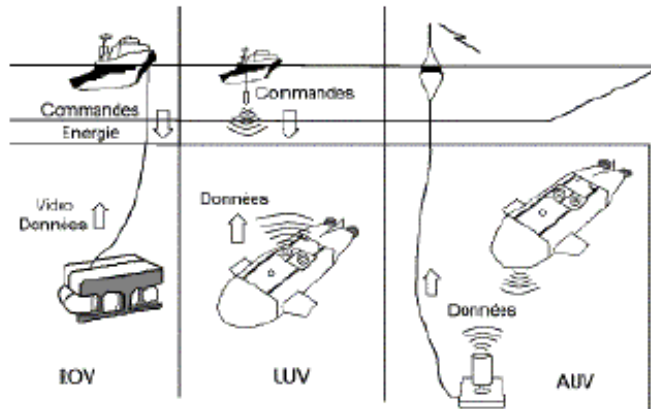


FIGURE 1.3 : Les différents types de véhicules sous-marins.

Nous ferons alors un état des lieux des différents types de robots existants dans chaque catégorie.

1.1.3.3 Les véhicules sous-marins téléopérés (Les ROV)

Ce sont des engins commandés par un opérateur à travers une station au sol ou sur un bateau. Ils sont reliés à la surface par l'intermédiaire d'un câble par lequel transitent les commandes moteurs, l'énergie et les données acquises [CCMM]. La présence du câble induit des perturbations sur la dynamique du robot et complexifie son contrôle, ce qui perturbe sa stabilité et affecte sa capacité à accomplir parfaitement les tâches demandées (voir la figure 1.3). Sa présence permet toutefois une récupération plus aisée du véhicule. Quelques exemples de ROV peuvent être cités comme "l'observer" (du Subsea Tech) ainsi que le "L2ROV" (du LIRMM) (voir la figure 1.4(a)). Ainsi, les caractéristiques des ROVs sont les suivantes [Lio06] :

- Ils sont généralement sur-actionnés.
- Ils ont la capacité de stationner en un point fixe [Spi07].
- Ils sont reliés à la surface par un ombilical.

Dans la plupart des modèles, ils sont aussi munis de caméras et parfois de bras manipulateurs leur donnant ainsi une grande capacité à manipuler les objets. Ainsi ils peuvent effectuer des opérations complexes comme :

- la maintenance des structures sous-marines : le ROV H2000 de la société Eca-Hytec, muni de 2 bras manipulateurs, est capable d'effectuer des changements de pièces.
- des inspections en profondeur (1000m) dans l'industrie offshore : ROV Victor 6000 de l'Ifremer (voir la figure 1.4(b)).
- l'inspection et le déminage.

1.1.3.4 Les véhicules sous-marins autonomes (Les AUV)

Contrairement aux ROV, ces véhicules ne sont pas munis d'un câble de connexion et ils transportent leur propre énergie. Ils sont conçus pour effectuer des opérations qui demandent un degré important d'autonomie. Pour éviter une rupture subite de la tâche, l'opérateur peut intervenir dans la boucle de décision et de commande à travers un lien acoustique (voir la figure 1.3). Ainsi, les caractéristiques de ces engins sont surtout les suivantes [Lio06] :

- Ils sont liés à la surface par un lien acoustique,
- Ils embarquent leur propre énergie ainsi que leur unité de contrôle/commande et de gestion de la consommation énergétique,
- Ils sont généralement sur-actionnés.

les AUVs (Autonomous Underwater Vehicles) :

Un AUV est un robot doté d'un système de localisation et de navigation vers un objectif. Il est totalement autonome, programmé préalablement pour réaliser un scénario de mission prédéfini [CCMM][YAM06]. A partir de quelques centaines de mètres de profondeur, la structure, les dimensions et les caractéristiques des AUV changent. Les AUV peuvent ainsi être répertoriés en 2 classes selon la profondeur limite d'immersion atteinte. Nous parlerons alors d'AUV côtiers et d'AUV grands fonds.

Les AUV grands fonds : AstrX et IdefX de l'Ifremer et Daurade de l'ECA/-GESMA (voir la figure 1.5(b) et 1.5(a)).

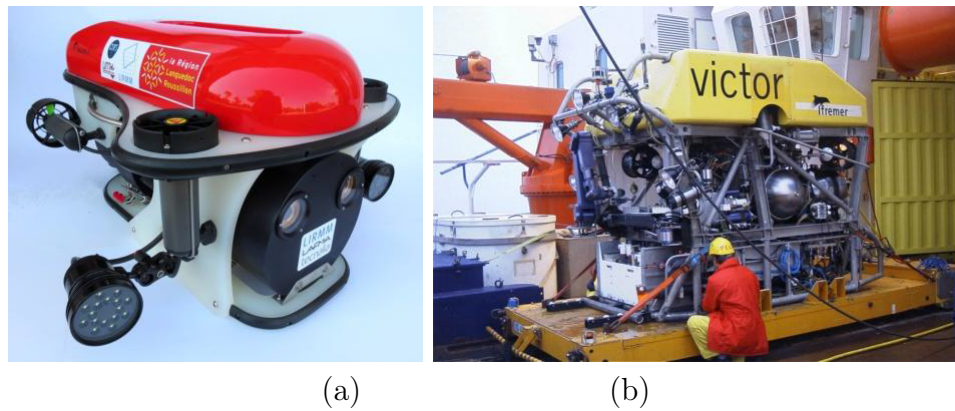


FIGURE 1.4 : Exemple de robot ROV. (a)L2ROV, du LIRMM, (b)Victor 6000, de l'Ifremer.

Les AUV grands fonds, ces engins conçus pour explorer les profondeurs des océans ont, en général, une grande autonomie énergétique, un poids et des dimensions importantes qui nécessitent une logistique assez lourde.

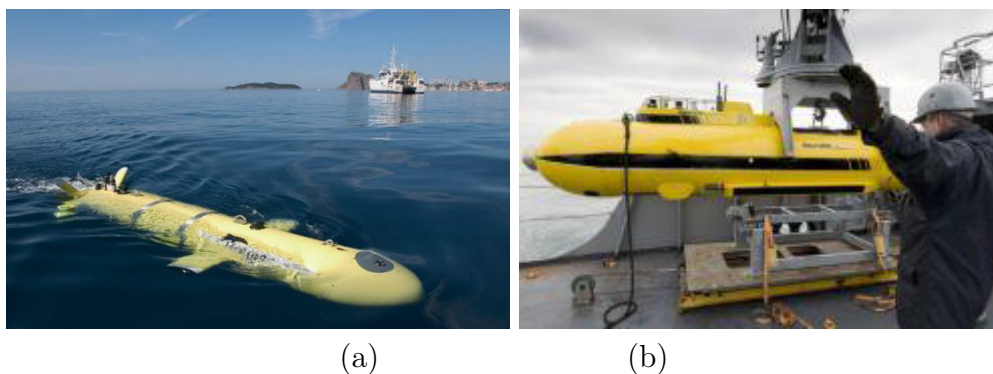


FIGURE 1.5 : Exemples d'AUV grand fond. (a)AstrX et IdefX, Ifremer, (b)Daurade, ECA/GESMA.

Les AUV côtiers : Remus (USA) d'Hydroid, Gavia d'Hyfmind et Lirmia2 issus d'une collaboration entre le Lirmm et LAFMIA (voir la figure 1.6(b) et 1.6(a)).

De petite taille, ces véhicules ne nécessitent pas de logistique à mettre en oeuvre. Ils sont totalement autonomes et capables de déterminer leur position absolue afin de naviguer vers un objectif. Ils sont l'outil indispensable pour les missions en eaux peu profondes. Les caractéristiques des AUVs côtiers sont les suivantes [Lio06] :

- Ils sont sous-actionnés.

- Ils sont totalement autonomes et l'opérateur ne peut pas intervenir dans leurs prises de décision.
- Ils ont un axe de déplacement privilégié suivant la direction de leur propulseur.

Ils sont généralement utilisés dans des missions d'observations (vidéo, sonar), mesures, océanographie, déminage.

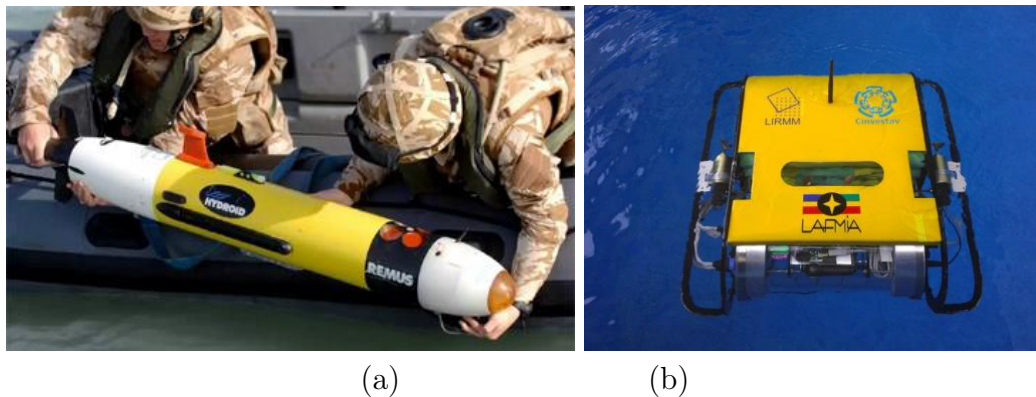


FIGURE 1.6 : Exemples d'AUV côtiers.(a)Remus, d'hydroïde robot caméra, (b)Lirmia2, LAFAMIA/LIRMM

- *Les planeurs sous-marins (Les gliders)* : Slocum glider de Teledyne/WHOI, le 1KA Seaglider de iRobot et SeaExplorer d'ACSA (voir la figure 1.7(c), 1.7(b) et 1.7(a)).

Généralement les planeurs ne sont pas équipés d'un moteur. C'est un véhicule autonome, qui d'une part se déplace par la variation de sa flottabilité ce qui crée une force verticale de propulsion qui produit une vitesse relative par rapport au fluide. D'autre part, il règle sa direction de navigation par des ailes et un palan. Le déplacement de leur masse interne leur permet de se contrôler en roulis et en tangage. Lorsque le planeur sous-marin est en surface, le transfert de données acquis pendant la mission est établi. Ils sont utilisés dans des missions militaires ou dans la recherche en océanographie physique.

- *Les systèmes biomimétiques* : La conception de ces robots sous-marins s'inspirent de la dynamique et de la forme physique des animaux marins (poissons, mollusques) et font émerger de nouvelles technologies (figure 1.8) [CCMM],[Lio06].

Les études ont montré qu'une conception inspirée de la nature peut conduire à une meilleure efficacité et une consommation réduite d'énergie [Lio06]. Des exemples de

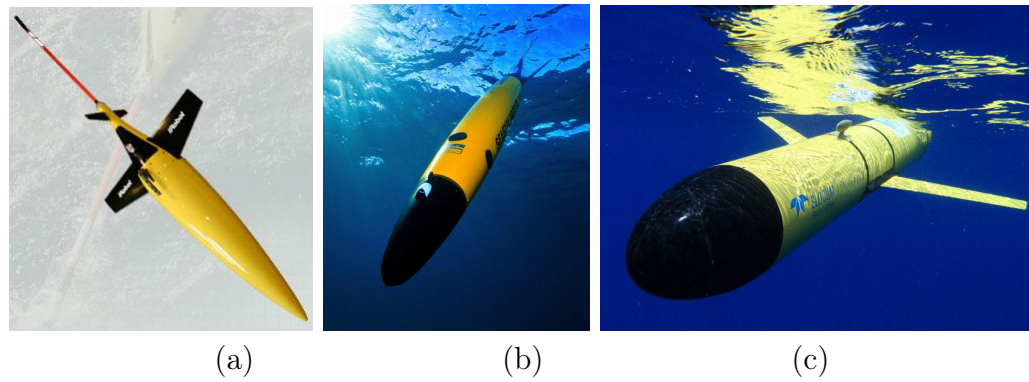


FIGURE 1.7 : Exemples de planeurs sous-marins. (a) iKA Seaglider, iRobot, (b) SeaExplorer, ACSA, (c) Slocum glider, Teledyne/WHOI, (d) global view.

conceptions et de réalisations spécifiques ont vu le jour comme dans le cas du robot flat-fish [YAM06] [CCMM] qui s'inspire de la forme et du comportement d'une raie (figure 1.8(b)). Un autre exemple de conception biomimétique est le projet Octopus, parrainé par l'Union européenne, où des fonctionnalités de tentacules de poulpe pour la propulsion sont répliquées pour obtenir un véhicule flottant avec des capacités de manipulation d'objets [LMM⁺09]. Le robot poisson de l'Ircynn/EMN a, quant à lui, été conçu pour détecter les obstacles conducteurs en créant un champ électrique et en mesurant ces déformations (voir figure 1.8(b)).

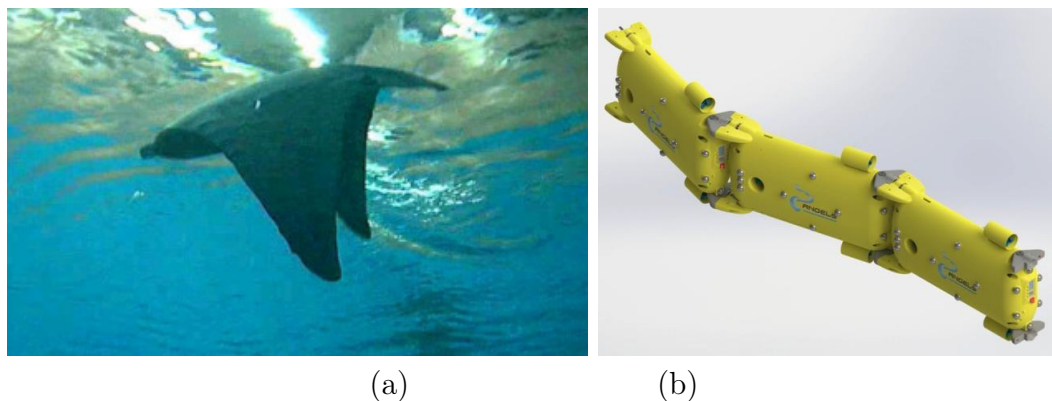


FIGURE 1.8 : Exemples de systèmes biomimétiques. (a) "flat-fish" (Yamamoto), (b) Angels (IRCCYN/Mines de Nantes)

1.1.4 Les applications des robots sous marins

1.1.4.1 Le secteur industriel

Le secteur industriel et surtout énergétique utilise les atouts des robots sous-marins pour réaliser certaines tâches comme :

- l’inspection de réacteurs nucléaires et de barrages hydro-électriques [Lio06] .
- l’aide à la pose de pipelines ou de câbles et l’inspection des structures marines [Spi07].
- la détection et l’exploitation des différents gisements présents dans les océans [Lio06].

1.1.4.2 Le secteur militaire

Une application importante des robots sous marins est la détection et la destruction de mines sous-marines. La surveillance des ports est aussi une autre activité en pleine émergence ; elle permet de détecter l’intrusion d’un corps ennemi (plongeurs ou véhicules sous-marins) dans les ports. À cette fin, des robots autonomes peuvent être organisés en patrouilles à l’entrée du port. Enfin, les robots sous-marins peuvent être utilisés pour l’espionnage, la détection et la délimitation de champs de mines, le remorquage de systèmes d’écoute et la mise en oeuvre de contre-mesures acoustiques ou électroniques.

1.1.4.3 L’environnement

Les robots sous-marins ont aussi un rôle important dans la protection de l’environnement. Ils peuvent contribuer à identifier les différents types de pollutions (dégazages, fuite de pétrole). Ceci à travers l’inspection des coques de navire en cas de fuite de carburant ou autres. Ils peuvent également être équipés de capteurs biochimiques dans le but d’identifier la nature et la source du polluant. Dans certains cas aussi, l’acquisition d’images vidéo avec des AUVs peut permettre une

estimation de l'état de santé de zones naturelles préservées. Pour l'étude des changements climatiques, les ROVs peuvent avoir comme mission le dépôt de capteurs sous-marins dans le fond. En particulier, le robot peut remplacer l'homme pour une surveillance autonome sous les banquises sans risquer sa vie dans des zones glaciales.

1.1.4.4 Les applications Scientifiques

La robotique sous-marine intervient dans une grande variété de projets de recherche [Lio06].

- L'étude des courants océaniques, des phénomènes biologiques en haute mer et les principaux changements dans l'écosystème.
- La détection des tsunamis et des volcans de l'océan.
- La Cartographie des fonds marins.
- L'archéologie sous-marine (exploration des épaves et des trésors)
- Le contrôle du débit et l'analyse des sources d'eau douce sous-marines (amplitude, ordre de grandeur, salinité)

Dans un système constitué d'un seul robot sous marin les applications fréquentes et les tâches les plus répandues sont (voir figure 1.9) :

- La recherche d'objet (boîtes noires, mines [SBS06]),
- La surveillance et la mesure des champs magnétiques dans les câbles d'alimentation et les coques de navires [PCB⁺10]),
- La détection de fissures (barrages [RCRG10], sécurité préventive) et des mesures (hydrothermales [YJBB07], chimiques [PRS06]),
- La vérification de la santé des organismes (des algues) et la surveillance des récifs coralliens [ACL⁺11]),
- Collecte de données océanographiques [FLM⁺04].

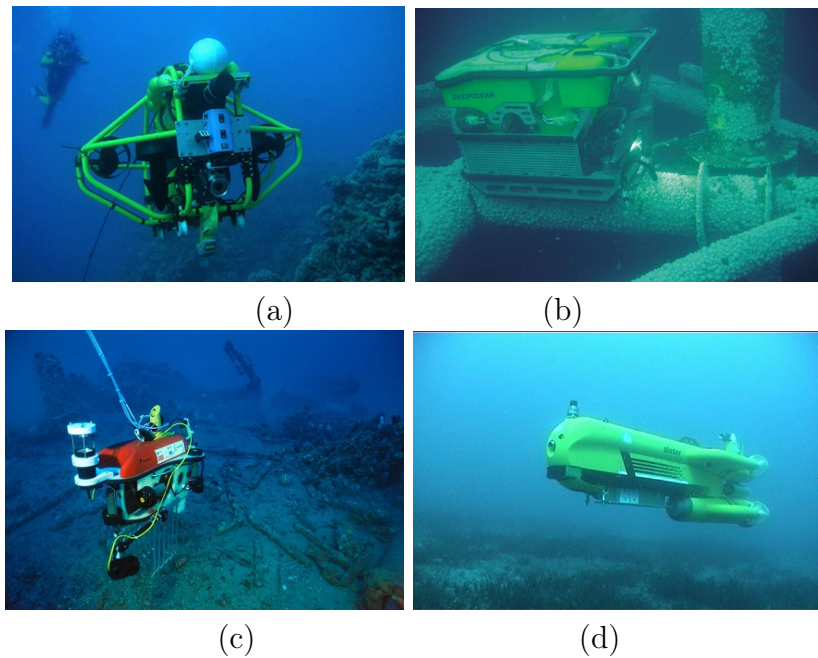


FIGURE 1.9 : Tâches sous-marines fréquentes, (a) vérification de la santé des algues, (b) détection de fissures, (c) exploration des épaves, (d) détection d'objet sur le fond marin.

1.2 Les systèmes multi-robot

1.2.1 Introduction

La robotique étudie les systèmes électromécaniques, particulièrement les robots, dans le but de les actionner et les contrôler par le biais d'un ensemble de logiciels, leur conférant une intelligence artificielle. Ce domaine met en jeu de plusieurs disciplines comme l'électronique, la mécanique, l'automatique et l'informatique. Sa complexité s'accroît avec le passage aux systèmes multi-robots (SMRs) [LW01], [SK08]. L'avancement de ces études s'est accompagné de progrès motivants de nouvelles orientations de la communauté scientifique et industrielle vers l'utilisation des systèmes multi-robots :

- Motivations relatives à la qualité des résultats de missions : la réalisation d'un gain remarquable au niveau du temps d'exécution d'une tâche et l'amélioration de la qualité d'exécution de celle-ci.

- Motivation relative aux circonstances de déroulement de la mission : la garantie de la réalisation de la mission).

Une des qualités des SMR est la distribution des capteurs et des modules de communication sur les entités robotiques, ce qui rend le système plus tolérant à certains défauts de fonctionnement (une panne ou la perte d'un robot) et diminue le risque de l'arrêt systématique de la mission. Bien que l'utilisation d'un seul robot paraît une solution plus simple, celle-ci présente des contraintes liées à la structure et le contrôle du robot qui peuvent, selon la tâche attribuée, vite devenir complexes et encombrantes. Cependant, l'utilisation d'un groupe de robots mobiles entraîne aussi l'apparition de nouvelles contraintes liées à l'interaction de plusieurs entités dans le même environnement. La prise en compte de ces aspects est indispensable pour contrôler un SMR.

Cette section illustre des études existantes sur ces systèmes et les thématiques de recherche impliquées.

Au début des années 1990, la notion de systèmes multi-robots (SMR), a vu une évolution exponentielle en terme d'étude et d'utilisation, notamment dans des applications regroupant des robots mobiles homogènes. Cependant, ces dernières années ont vu l'émergence de nouvelles applications des SMR avec l'association des notions de coopération, de coordination et de communication. C'est ainsi que de multiples projets ont vu le jour. Dans ce domaine, les scientifiques se sont intéressés principalement à deux axes de recherche primaires : la résolution des problèmes de réalisation rencontrés et l'adaptation des solutions présentées dans les travaux existants à la complexité des missions.

Les systèmes multi-robots ont été le sujet d'étude d'un grand nombre de travaux de recherche et ont donné lieu à différentes classifications. Une première classification a été présentée par [DJMW96]. Elle a permis d'établir une répartition des systèmes multi-agents selon deux paramètres : les caractéristiques de la communication dans le groupe et la capacité de calcul de chaque unité. Ils présentent également une énumération des résultats réalisés dans ce domaine afin d'illustrer l'utilité des SMR dans divers domaines et de démontrer qu'un ensemble multi-robots sera plus efficace

qu'un seul robot sur certaines applications, comme le projet COMET [OFC⁺04] où un groupe de robots aériens communicants a été conçu pour l'exploration des milieux naturels.

Dans les travaux de Stone et Veloso [SV00], les SMR ont été classifiés en quatre catégories selon les types de robots utilisés et leurs capacités de communication : des robots homogènes non communicants, des robots hétérogènes non communicants, un groupe hybride où interviennent des robots homogènes communicants et des robots hétérogènes communicants. Par ailleurs, Stone et Veloso y illustrent différents scénarios et décrivent des travaux existants du domaine. Le projet ACTRESS [AMI89] est l'un des projets qui a été mis en place dans le cadre de cette thématique. Il avait pour but de concevoir un groupe hétérogène pour effectuer des tâches du type boîte-poussant.

Dans le même contexte, Farinelli et un groupe de chercheurs [FIN04] ont souligné les avancements des travaux réalisés dans le domaine de la coopération et la coordination des systèmes multi-robots au cours des années 2000. Ils proposent une classification des systèmes multi-robots fondée sur la notion de coordination, selon la dimension de l'espace de coordination et celle de l'espace des configurations du robot.

Par ailleurs, un aperçu de la littérature en robotique mobile coopérative a été donné dans [CFKM95]. Les auteurs classent la littérature selon cinq catégories correspondant à divers points de vue qui sont : l'origine de la coopération, l'architecture de coordination du groupe, le conflit de ressources dans le groupe, les mécanismes et les techniques de coopération. Ils présentent également les contraintes découlant des limitations technologiques (communication, puissance) et les difficultés possibles selon le milieu d'évolution dans l'ensemble des travaux existants. Des projets ont découlé à partir de ces thèmes et nous pouvons citer à titre d'exemples les projets MURDOCH [GM] et GOFER [CCL⁺90a] qui mettent en évidence la planification des tâches dans un SMR et l'architecture de coordination responsable de la répartition des rôles.

D'autre part, Arai et un groupe de chercheurs [APP02] ont identifié les thèmes de recherche dans le domaine qui ont par suite été accompagnés par la réalisation de projets : les approches d'inspiration biologique (CEBOT [FUKA92]), la communication, les architectures de contrôle, les stratégies de coordination, la localisation et l'exploration des milieux d'évolution(M+ [BA99]), la détection/le transport et la manipulation d'objets.

1.2.2 Du mono-robot aux multi-robots

Lorsqu'une mission est menée par un seul robot, un unique robot est mis en interaction avec son environnement [SV00]. Ce robot est souvent lourd en technologie, onéreux à mettre en oeuvre et doté de systèmes de calcul puissants. Malgré le rendement élevé que peut avoir un système mono-robot, certaines tâches restent très complexes, voire impossibles à réaliser. Cette limitation de tâche a encouragé la communauté scientifique à mettre en oeuvre des approches multi-robots, telle que MER-A, RHINO [JBT95], ASIMO[SWA⁺02], BigDog [Rai] et NAO [GHB⁺09] (voir figure1.10).

Contrairement à un système mono-robot, l'utilisation d'un système multi-robots présente plusieurs avantages. D'abord, les systèmes multi-robots présentent une meilleure capacité de répartition spatiale. D'autre part, le déploiement de ces systèmes engendre un gain au niveau du temps d'exécution d'une tâche [BMF⁺00] et de l'énergie consommée durant celle-ci [WV10]. L'origine de la robustesse de ces systèmes vient surtout du partage d'informations entre les robots. Ceci offre d'une part une tolérance aux pannes résultants de la redondance de l'information et d'autre part une efficacité pour se localiser mutuellement au cours de la mission [FBKT00][MFP02][RB02].

Un système mono-robot est parfois sur-actionné, doté de capteurs de haute précision et équipé d'une grande capacité de traitement et de calcul ce qui le rend coûteux et complexe. Dans ce contexte, non seulement les SMR présentent des coûts inférieurs

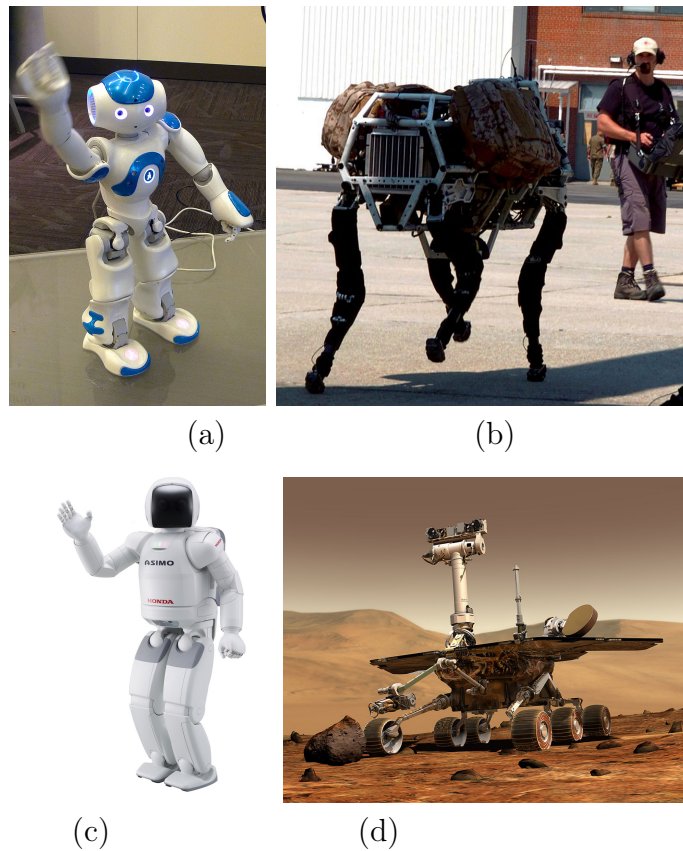


FIGURE 1.10 : Exemples de systèmes mono-robot.(a)NAO, (b)BIGDOG, (c)ASIMO, (d)MER-A

à ceux de systèmes mono-robot mais encore ils sont plus simples à déployer dans le sens de la manoeuvrabilité, du réglage et de la maintenance.

De plus, dans un système multi-robots, il est possible d'utiliser des unités homogènes [dah09][WV10] ou hétérogènes [AMI89],[BDD⁺08], dans le cadre de répartition des tâches. Ceci permet l'adaptation des capacités des robots à la tâche contributive et améliorera le rendement collectif au fil de la mission.

Parker [LEP03] a souligné les motivations fondamentales de la recherche en systèmes multi-robots. Elles se résument dans :

- la capacité à résoudre des problèmes qui sont intrinsèquement distribués dans l'espace, dans le temps ou dans la fonctionnalité,
- la capacité à résoudre des problèmes plus rapidement grâce au parallélisme,
- la capacité à augmenter la robustesse des solutions par la redondance.

1.2.3 Différentes applications des systèmes multi-robots

Actuellement, les systèmes multi-robots sont un centre d'intérêt majeur de la recherche en robotique. Une des principales motivations pour l'utilisation de ces systèmes est l'idée que les SMR peuvent accomplir des tâches qu'un seul robot ne peut pas effectuer.

En 1989, Fukuda a été l'un des premiers à travailler sur cette thématique (robotique cellulaire [FNKB89]). Dans les années 90, d'autres organismes se sont intéressés à l'étude des SMR. Des chercheurs du MIT [BMMM90][Mat92] travaillant dans le domaine ont pu concevoir un SMR de vingt robots mobiles. Les universités de Stanford [CCL+90b] et Carnegie Mellon [Nor90] se sont investies aussi dans cette recherche.

Ainsi, plusieurs SMR ont vu le jour et ont été utilisés pour diverses missions. À titre d'exemples, nous pourrions citer des missions de sauvetage [Dav02], [Yam99], d'exploration [BMSS05], [WR00], [RB07], de divertissement avec des équipes de football robotisées [CFR06], et même dans l'agriculture [Rob13]. Les SMR sont également été utilisés dans des applications militaires [MRH13] (voir figure 1.11). Nous citons à titre d'exemple l'utilisation d'un groupe de robots mobiles dans le but d'élaborer une cartographie de cet environnement [BMSS05], chaque robot explorant alors une partie différente de la carte, et établissant une carte partielle qui servira à construire la carte globale.

1.2.4 Les systèmes multi-robots sous marins

Il existe deux grandes catégories de SMR sous-marins ainsi classées : hétérogène ou homogène (en matière de structure matérielle et logicielle).

Le cas du projet ASIMOV est un exemple représentatif d'un SMR hétérogène [POS+00] où un ASV coopère avec un AUV en tant que relais de communication

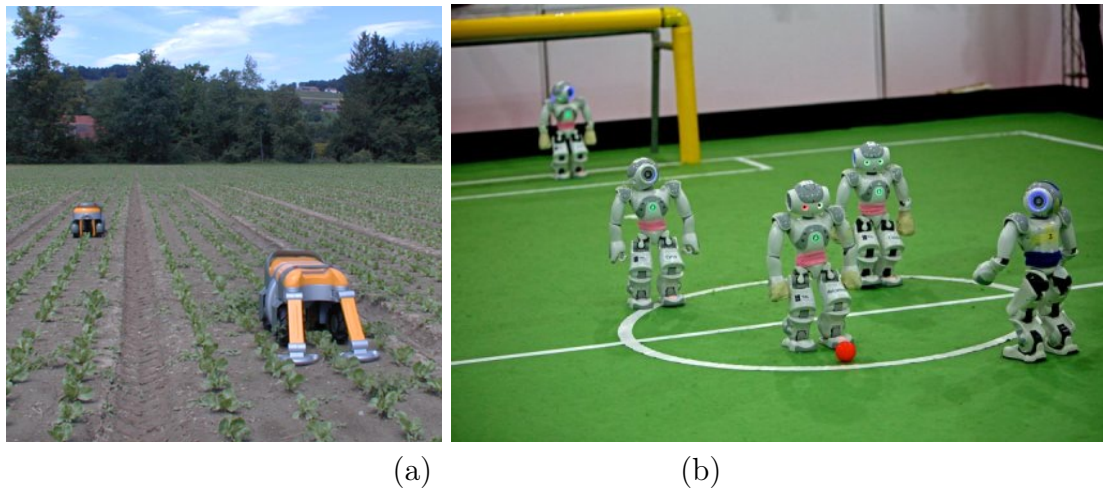


FIGURE 1.11 : Exemples d'application des SMR. (a) dans le domaine de l'agriculture, (b) comme outil de divertissement.

mobile. L'ASV est équipé d'un GPS et d'un lien acoustique destiné aux communications verticales. l'AUV fournit les données de la mission à l'ASV et inversement l'ASV transmet les données GPS à l'AUV (voir figure 1.12).

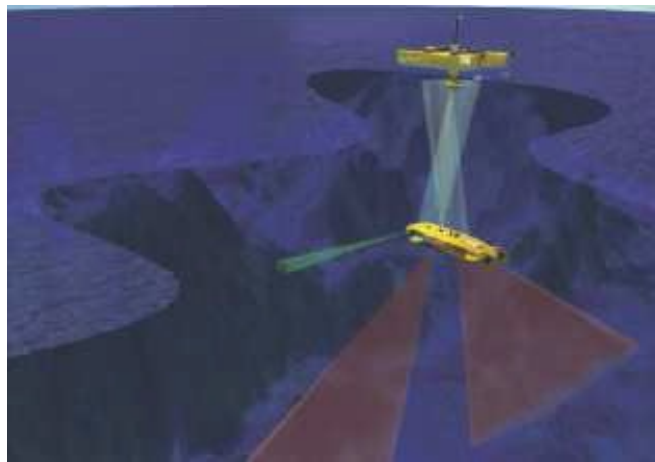


FIGURE 1.12 : Le projet ASIMOV.

Deux architectures sont utilisées dans la littérature : l'architecture délibérative va réorganiser l'ensemble des robots lors d'un changement dans l'environnement ; l'architecture réactive délègue l'adaptation aux changements de l'environnement à chaque robot suivant une approche individuelle en cohérence avec l'objectif global.

Ces dernières années, ces missions ont pu fournir des résultats meilleurs en terme de temps d'exécution et de qualité de données en utilisant des SMR sous marins, nous pouvons citer par exemple :

- les travaux de Fiorelli [FLM⁺04] pour le suivi de gradient de température ou de salinité par une flottille de planeurs,
- les expérimentations de Schultz [SHK⁺03] sur la localisation de panache et le suivi de gradient (relevés CTD, eau douce) à l'aide d'une flottille d'UUV et sur la cartographie 3D avec des AUV,
- des essais par simulation ont été aussi réalisés par Baccou [BJCR01] pour l'inspection de pipeline et détection des fuites,
- les travaux de Okamoto [OFEW04] pour la détection des mines et la surveillance du fond marin par une flottille d'AUV.

1.3 Architectures de coordination et stratégie de coopération dans un SMR

1.3.1 Introduction

Le but de notre travail de recherche est l'élaboration d'une architecture et d'une stratégie de coordination pour un groupe de robots sous-marins autonomes et coopérants. Afin d'explorer l'état de l'art et positionner nos contributions dans le cadre des architectures de coordinations et des stratégies de coopération, il nous faut en premier lieu exposer certains éléments sur les notions de coopération et de coordination dans un SMR.

L'intérêt de l'étude des SMR ne porte pas sur la manière dont un robot du groupe gère une tâche donnée mais sur la manière dont le groupe arrive à résoudre les différents problèmes qu'il rencontre.

En effet, un SMR ne doit pas seulement être vu comme un ensemble d'entités robotiques (homogènes ou hétérogènes) évoluant dans un même environnement

de travail, mais plutôt comme un système qui repose sur une réelle coopération des unités les unes avec les autres. Un des points importants dans le domaine des SMR est la résolution collective d'une mission et plus exactement la coordination des comportements des robots du SMR. La valeur de la coopération dans un SMR réside dans le bon choix de l'architecture de coordination du groupe conduisant à la réussite de la tâche à accomplir. Nous allons donner les définitions de la coopération et de la coordination, ces notions étant parfois difficiles à différencier.

La coopération : La coopération est une notion très importante dans un SMR. Sa mise en oeuvre devient indispensable à partir du moment où un robot a besoin de coopérer avec autrui pour réaliser une tâche demandée, parce qu'il ne peut l'accomplir par lui-même [DM90] ou pour laquelle il n'a pas la capacité ou les outils nécessaires. Certains chercheurs l'ont défini aussi, comme étant l'attitude des agents à travailler en commun et à s'engager dans un but commun [FP95] ce qui les oblige à coopérer. Enfin, nous pouvons dire que c'est un type de dynamique collective qui aboutit à un état émergent bénéfique au comportement global du groupe au fil de la mission [Len96]. La qualification d'un comportement comme coopératif se fait selon deux critères : l'interdépendance des agents et le nombre de communications effectuées. La coopération implique évidemment d'avoir une bonne coordination entre les robots.

La coordination : Pour garantir la cohérence globale dans le comportement d'un SMR et sa convergence vers une solution au problème posé, il est nécessaire de coordonner les différentes actions du groupe. Ceci sous-entend que les agents doivent mettre en place une architecture de coordination (distribuée ou hiérarchique) adaptée au mécanisme de coopération du groupe. En d'autres termes, le groupe aura son propre système de prise de décision et les robots échangeront aussi des informations pertinentes dans le cadre de la coordination. La coordination est une méthode indispensable pour agencer de manière cohérente les interventions de chacune et définir une relation d'ordonnancement et de dépendance entre les actions des robots. Pour certains scientifiques, la principale fonction de la coordination est de trouver, parmi un ensemble de comportements d'agents qui interagissent, une collection de comportements qui réalise d'une façon satisfaisante les objectifs

communs. Le degré de coordination reflète dans quelle mesure les agents peuvent éviter des activités accessoires afin d'arriver au but global.

1.3.2 Architectures de coordinations

La prise de décision est un processus aboutissant au contrôle du robot en fonction des objectifs à réaliser. Il permet à chaque robot du groupe d'avoir une politique d'action pour réaliser les objectifs attribués sur le plan individuel. Chaque processus de décision définit une succession d'actions optimisant les gains espérés.

Dans le cadre des systèmes multi-robots où la coordination des actions repose sur une allocation d'objectifs (ou de tâches), l'autonomie du groupe dépend de la capacité de chacun des robots à prendre les bonnes décisions pour accomplir les tâches individuelles attribuées permettant une réalisation efficace de la mission globale. On peut conclure que l'évaluation de la coordination d'un SMR dépend essentiellement de l'efficacité du processus de prise de décision, au sein du groupe, afin de garantir l'accomplissement le plus parfait des actions demandées à l'échelle de chaque unité robotique, ce qui induit la réussite de la mission à l'échelle du groupe. Le mode de prise de décision dans le groupe se définit à travers l'architecture de coordination de celui-ci. Il consiste à organiser le processus de prise de décision. Dans un système multi-robot, il peut être centralisé dans une unité robotique du groupe ou bien distribué sur tous les robots du groupe. On distingue alors deux types d'architecture de coordination : centralisée ou décentralisée.

1.3.2.1 Architecture de coordination centralisée

Dans le cas d'une architecture centralisée, l'un des robots du groupe est désigné comme Robot superviseur (superviseur dans [ACL⁺11] ou planificateur central dans [Nor93]), les autres sont appelés des robots «suiveurs». Celui-ci gère et contrôle le déroulement de la mission. En effet, il est responsable de la prise des décisions relatives à la mission et de la communication avec les autres éléments du groupe. Ce robot optimise la coordination des robots, collecte les informations globales

concernant l'environnement ainsi que les autres entités du groupe et surveille l'accomplissement de la mission. Par ailleurs, non seulement le superviseur calcule et communique les consignes de commande aux robots suiveurs mais il déclenche aussi le mode de fonctionnement adéquat de chaque entité à chaque étape de la mission.

Cette architecture a l'avantage de permettre l'emploi de robots suiveurs à faible puissance de calcul et n'embarquant qu'un nombre très réduit de capteurs nécessaires à un fonctionnement optimal. Par conséquent, réduire le cout du SMR [SXYW05]. Cependant, cette architecture exige la concentration des capteurs au niveau du superviseur ce qui lui permet une meilleure prise de décision et lui offre une vision globale sur l'environnement d'évolution et la tâche à réaliser [SXYW05].

Dans les architectures de contrôle centralisées, la manière de coordonner les actions entre le superviseur et les robots suiveurs peut être comparée à celle de groupements sociaux, notamment animaux ou encore humains dans certains aspects sommaires (la communication, la hiérarchie, etc.).

Néanmoins, un simple dysfonctionnement au niveau du robot superviseur peut engendrer l'échec de l'ensemble du système. Dans ce cas, il est nécessaire de mettre en place un nouvel agent de contrôle central. Alternativement, l'échec de la restauration du contrôle central implique une équipe inopérante, par conséquent l'abandon de l'ensemble des tâches. L'architecture centralisée a du mal à s'adapter au facteur échelle. Bien qu'elle soit efficace pour une meute de petite taille, elle devient inefficace pour un grand nombre de robots, en particulier en raison de la surcharge importante de communication. Ce problème persistera même en utilisant des outils d'optimisations. Par conséquent, cette architecture est inadaptée aux environnements dynamiques dans lesquels apparaissent des défaillances dans les communications.

De nombreux travaux de la littérature appartiennent à la catégorie des systèmes centralisés [CRL03], [TP05], [TK05], [WSB08], [YJC10], [YJC12], [YJAC12].

L'éventail des tâches possibles à travers cette architecture donne lieu à une diversité d'applications en robotique. On peut citer à titre d'exemples les travaux de Mariottini [MPPD05] et de De la Cruz et Carelli où un système de contrôle centralisé a été conçu pour la mise en formation géométrique d'un groupe de robots non holonome.

Dans les travaux d'Huang [HFQG06], une stratégie de coordination centralisée a été également instaurée pour permettre la mise en place et le maintien d'une formation désirées dans le but de suivre une trajectoire définie par le robot superviseur durant la navigation. Des robots suiveurs peu coûteux ont été utilisés. Ils étaient équipés de capteurs à capacité de détection minimale et d'une unité de calcul simple.

Dans le même contexte, Harmati et Saffiotti [HS09] proposent une coordination centralisée pour le contrôle d'une meute de robots hétérogènes. Dans ce travail, un problème de suivi de cible sans collision, est traité au moyen de la théorie des points d'équilibre.

Mehrjerdi, Saad et Ghommem [MSG11] ont proposé et testé un algorithme de coordination centralisée pour un suivi intelligent de trajectoire pour un groupe de robots mobiles en utilisant un modèle flou. Le modèle flou conçu emploie deux comportements : le suivi de trajectoire et la coordination pour permettre aux robots de se déplacer en formation suivant une trajectoire bien déterminée à l'avance.

1.3.2.2 Architecture de coordination décentralisée

L'architecture de contrôle distribuée est essentiellement inspirée des êtres vivants en société. Elle se base sur la distribution du contrôle sur plusieurs entités coopérantes afin de réaliser une tâche. Le projet CEBOT (CELLular roBOTics System) [FNKB89] est une preuve concrète de cela. Celui-ci s'inspire de la réorganisation des cellules d'un organisme biologique pour assimiler des entités robotiques à des cellules couplées entre elles et les rendre continuellement reconfigurables, afin de répondre aux exigences de l'environnement. D'autres systèmes s'inscrivant dans le cadre des systèmes distribués peuvent être trouvés dans la littérature [YAB01a], [CTL⁺06a].

Dans les architectures distribuées, il n'existe aucun agent superviseur. Les ressources (capteurs, unités de calcul, etc.) sont distribuées sur tous les éléments du SMR. Tous les robots sont égaux en matière de contrôle et tous sont individuellement autonomes dans leur processus de prise de décision. Chaque robot connaît ses propres capacités, possède une vue locale du monde au travers de ses capteurs et une vue des états des autres robots au travers d'un processus de partage d'information. Chaque robot n'utilise alors que ses propres capteurs et sa propre unité de calcul et de traitement. Il doit aussi pouvoir communiquer et partager des informations avec les autres robots afin de les informer et s'informer sur la progression de la mission.

La réduction de la charge de communication sur la formation est un des avantages de cette méthode, car elle permet d'éviter que chaque entité robotique diffuse son statut de mouvement chaque incrément de temps. La distribution du contrôle permet de briser les contraintes rencontrées dans une architecture centralisée, et conduit ainsi à une mise en oeuvre d'un contrôle beaucoup plus simple et surtout plus fidèle au modèle du système [Ado05].

La robustesse de cette architecture à l'échec ou à la perte d'un des robots du groupe et sa qualité à être moins affectée par des erreurs de communication ou de calcul sont les principaux avantages de ce type d'approche.

Dans cette architecture, n'importe quel robot peut estimer le comportement des autres robots dans la formation réduisant ainsi la dépendance d'un élément particulier aux autres pour prendre des décisions.

Dans ce contexte, diverses études sur les systèmes distribués peuvent être trouvées dans la littérature. M+ [BA99] est un exemple type d'un SMR utilisant une architecture dans laquelle chaque robot possède sa propre connaissance du monde et peut décider de ses actions futures en tenant compte de son rôle et de la tâche à accomplir.

Dans une autre étude, Feddema et un groupe de chercheurs [FLS02b] se sont concentrés plutôt sur l'étude de l'observabilité structurelle et la contrôlabilité du système, ainsi que sur la stabilité des systèmes de contrôle décentralisés.

Dans les travaux de Defoort [DKF⁺09] une architecture de coordination décentralisée a été implémentée sur un groupe de robots mobiles soumis à des contraintes imposées par les capteurs et le réseau de communication, afin de naviguer dans un milieu inconnu. Un planificateur de trajectoire a été conçu pour éviter les obstacles. L'avantage de l'algorithme proposé est que chaque véhicule nécessite seulement la connaissance locale de ses véhicules voisins.

Dans les études de Lee et Chong [LC09a], un contrôleur de mise en formation géométrique pour une équipe de robots mobiles anonymes a été proposé. Il est basé sur la coopération décentralisée pour d'une part la mise en place et le maintien de celle-ci et d'autre part pour l'exécution de tâches spécifiques grâce à un système de coordonnées relatifs calculés par chaque robot.

1.3.2.3 Architecture de coordination hybride

Une comparaison entre les deux architectures nous conduit au bilan suivant.

Dans les architectures centralisées, l'entité superviseuse dispose d'informations globales sur l'environnement, ce qui l'aide à la prise de décision et à la coordination des actions entre les éléments du SMR.

D'une part, elle est responsable du contrôle du groupe et elle gère d'autre part la communication de toutes les entités robotiques. Ceci signifie que le SMR dépend entièrement de cette entité. C'est dans ces deux facteurs que réside la limitation de ce type d'architecture car un dysfonctionnement du superviseur ou une incapacité à assurer une de ces deux fonctions engendreront l'interruption de la tâche et l'échec de la mission.

Les architectures décentralisées quant à elles, répondent mieux à la problématique des environnements inconnus ou dynamiques et ont de meilleurs résultats en termes de fiabilité, de flexibilité, d'adaptabilité et de robustesse. Elles se basent sur la distribution du contrôle (prise de décision et commande) et des ressources d'information et de calcul sur plusieurs entités coopérantes et communicantes. La robustesse de cette architecture réside dans son adaptabilité à l'échec ou à

la perte de robots du groupe, ainsi qu'aux problèmes de communication ou de calcul. Cependant, l'absence d'un superviseur et d'une information globale sur l'environnement et l'état global du groupe rend la coordination des robots et l'optimisation de l'exécution de la tâche de plus en plus difficile.

Lounis Adouane [Ado05] a résumé les avantages et les inconvénients de chacune des architectures dans le tableau 1.1. En comparant les deux architectures, il ne se dégage pas d'argument prédominant pour privilégier une architecture par rapport à une autre, cela dépend de la nature et du contexte de réalisation de la mission confiée au SMR. Lorsque l'on veut améliorer la coordination et la coopération dans les SMR, la question n'est plus de favoriser le choix d'une des deux approches mais plutôt comment concevoir une architecture innovante qui bénéficie des avantages des architectures centralisée et décentralisée. C'est dans ce contexte qu'une architecture intermédiaire est apparue, l'architecture hybride.

En pratique, beaucoup de SMR utilisent des architectures de coordination hybrides. Par exemple, dans [BLH01b], [DFK⁺02a],[FLS02b], [SBS05], des robots pourtant décisionnellement autonomes, sont soumis néanmoins ponctuellement à un planificateur central.

L'élaboration d'une architecture hybride pour contrôler ou coordonner un groupe de robots autonome, nécessite la prise en compte de la nature de la mission et l'étude des différents aspects de la mission (les étapes d'exécutions, la nature de l'environnement, la qualité de la communication). Elle se base sur l'adaptation de l'architecture aux besoins de la tâche. Elle attribue le contrôle adéquat (centralisé ou décentralisé) à chaque étape d'exécution de la tâche à réaliser.

1.3.3 Objectifs et mécanismes de coopération dans un SMR

1.3.3.1 La coopération dans les SMR

Dans n'importe quel domaine d'application, la question fondamentale, à se poser avant de concevoir un SMR, est la manière de faire coopérer efficacement les

robots pendant une mission afin de réaliser des taux de réussite de plus en plus élevés [LEP03]. La coopération est le point-clé pour exploiter le potentiel des SMR [GM02].

Un SMR est considéré coopératif, si les robots chargés d'accomplir une tâche coordonnent leurs actions en interagissant dans le même environnement et en partageant des ressources communes. Une bonne coopération dans un SMR doit impérativement améliorer l'efficacité d'exécution de la tâche par rapport à celle offerte par un seul robot.

Nous citerons les diverses applications des SMR coopérants comme l'exploration spatiale [HPTO⁺03], le maintien de formation de robots ou d'avions militaires [BA98], le transbordement dans les ports et aéroports [AFH⁺98], les convois de robots pour le transport urbain de passagers [BTMM05], la navigation et le sauvetage sous-marins [BLF09], etc.

En général, la coopération se base sur deux notions : la communication et la coordination. Les robots doivent communiquer pour échanger des informations et coordonner leurs actions dans le but d'accomplir une mission commune globale [Arr06].

Ainsi, dans n'importe quel SMR coopérant, la présence de canal communication entre les entités robotiques est une condition indispensable. La sûreté de celui-ci et la suffisance de son débit permet de mettre en place un mécanisme de coopération robuste et efficace.

Deux types de communication entre les robots peuvent être distingués selon la source des données communiquées. Si l'information provient de l'environnement, celle-ci est dite explicite et elle est assurée par les capteurs. Elle permet à la fois d'alléger la quantité de données transmises et le degré d'abstraction des informations ainsi échangées. En revanche, étant utilisée seule, elle ne convient pas pour des mécanismes complexes de coopération. Si les données sont requises par le biais d'échanges entre les robots, la communication est dite implicite. Celle-ci est efficace pour des missions nécessitant une coopération sophistiquée. Cependant, sa qualité

dépend du débit de données qu'elle peut transmettre et de sa continuité à travers une mission. Avec l'avancement des technologies de communication, les robots d'aujourd'hui sont équipés de moyens de communication sans fil haut débit qui leur fournit un moyen de communication presque sûr. Par conséquent, Il faut recourir aux communication explicite et implicite.

1.3.3.2 Mécanismes de coopération dans les SMR

Afin d'accomplir une tâche collective, des mécanismes ont été développés à partir de la coopération entre les robots dans un SMR. Pour aborder le sujet de coopération des robots mobiles, trois démarches sont proposées dans la littérature qui décrivent les mécanismes employés dans ce domaine. Chacun d'eux traite la coopération d'une façon différente [Ado05].

Le premier mécanisme se base sur une approche qui cherche à reproduire les comportements des animaux, insectes, etc. Nous citons à titre d'exemples, la navigation en formation "V" des avions de chasse et des oiseaux durant la saison de migration pour parcourir de longues distances. Dans ce contexte, des études ont été développées, dans lesquelles les chercheurs se sont inspirés de la nature et spécialement des activités de certaines espèces vivantes organisées en société (oiseaux, poissons, fourmis, abeilles, etc). Le but de ces travaux est d'une part la compréhension des règles d'interaction de ces espèces au sein du groupe et d'autre part l'implémentation de ces types de comportements sur des SMR. Cette démarche a pu enrichir le domaine de la robotique coopérative par l'introduction des architectures de contrôles comportementales [Bro86], [Ark98]. Ainsi, dans [Mat95], des actions de fourragement, rassemblement en troupes, dispersions inspirées de sociétés vivantes ont été reproduites sur de véritables robots mobiles.

Le deuxième mécanisme se base sur une approche purement informatique. Il bénéficie ainsi des apports qu'elle peut apporter au domaine de la robotique coopérative à travers l'intégration de la notion d'intelligence artificielle distribuée sur des agents coopératifs. Cette approche tient compte plus de l'aspect conceptuel de la coopération qu'à celui des contraintes physiques des robots dans leur environnement. En

revanche, l'absence d'une modélisation de ces contraintes en simulation complique le passage à l'expérimentation réelle, vu que la dynamique du robot ainsi que son interaction physique avec l'environnement n'est pas prise en compte.

Le troisième mécanisme, contrairement aux approches informatiques et celle inspirée des sociétés vivantes, se base sur l'utilisation des modèles cinématiques et dynamiques des robots et de leur environnement prenant ainsi en compte les contraintes réelles existantes. Cela offre la possibilité de tester les performances du contrôle établi pour un SMR. Ainsi, cette approche a été considérée la plus apte à la mise en oeuvre effective de ses résultats.

1.3.3.3 Tâches coopératives et missions multi-robots

À présent, la recherche en robotique s'oriente de plus en plus vers la réalisation de missions relativement complexes pour les robots. Auparavant, les tâches étaient relativement simples pour qu'un seul robot puisse l'effectuer, comme trouver un chemin, éviter les obstacles et naviguer. Maintenant, avec l'utilisation des SMR, les robots sont désormais censés aller au-delà de ces tâches, il faut qu'ils puissent effectuer des missions aux tâches multiples, qui doivent être réalisées en simultanés ou dans l'ordre. Ces missions complexes nécessitent un bon choix de l'architecture de coordination, de la stratégie de coopération, des techniques de la gestion des ressources et du processus de prise de décision.

Les résultats, réalisés sur les systèmes multi-robots ces dernières années, ont donné naissance à plusieurs types d'applications robotiques. Dans ce contexte, plusieurs exemples de missions peuvent être citées. Elles comprennent le maintien de formation en navigation [KSGS⁺08], la navigation dans des zones fermées [ASKK08], les patrouilles de surveillance [JFLG11] [AUS11] [DFCI⁺09] ainsi que la recherche d'objets et les missions de sauvetage [MTN⁺08].

1.3.4 Navigation en formation d'un SMR

Avec un champ d'application large, la navigation en formation est une des tâches qui attire depuis quelques années de plus en plus de roboticiens. Cette tâche est accomplie par un groupe de robots mobiles naviguant tout en maintenant une forme géométrique prédéfinie (ligne, colonne, triangle). Elle consiste en un déplacement du groupe comme une seule entité, en respectant les positions et les orientations relatives entre les robots, définissant ainsi la formation géométrique désirée. L'établissement de celle-ci peut se faire à partir de positions initiales, prédéfinies ou aléatoires, au début, voire au fil de la mission et elle est maintenue au cours du mouvement du groupe.

Ce genre de navigation est utile dans de nombreuses tâches de coopération telles que la cartographie, le transport, la manipulation d'objets ou l'évitement d'obstacles.

La navigation coordonnée ou le mouvement d'un groupe de robots est l'un des sujets les plus étudiés dans le domaine des SMR mobiles. Lors d'une intervention dans un environnement inconnu ou un espace limité et durant une tâche collaborative nécessitant l'organisation et la coopération, les mouvements des robots doivent être coordonnés de manière efficace. Cet aspect se révèle très important lorsqu'il s'agit de gérer le déplacement d'une formation de robots. Pour cela, des architectures de coordination et des stratégies de contrôle ont été proposées dans la littérature [Ben11]. Dans le cadre des missions de navigation en convois, une flotte de robots doit atteindre une position tout en maintenant une certaine géométrie dans le placement mutuel des robots. Dans cette tâche, les principaux défis à relever sont la mise en place de la formation géométrique souhaitée et son maintien pendant le déplacement, cela même en présence de perturbations liées à l'environnement d'activité ou à la dynamique du robot. Cette mise en oeuvre peut être assurée avec [GH08] ou sans [BALM10] considérée une hiérarchie entre les robots. Dans des essais réels, cette navigation coordonnée nécessite des ressources de calcul rapide, afin que la vitesse de navigation et la configuration géométrique puissent être maintenues.

La navigation d'un SMR est basée sur une des références géométriques car la plupart des actions effectuées par des robots mobiles exigent une localisation. Si la localisation en elle-même est un sujet de recherche actif, elle est également un élément essentiel dans la coordination de la navigation lorsqu'il s'agit des SMR. La possibilité d'utiliser l'environnement comme référence est complétée pour, un SMR par la connaissance potentielle de la position relative de chaque robot.

Le contrôle d'une formation exige que chaque robot détermine et maintienne sa position géométrique dans la formation. Pour cela, trois méthodes de mise en formation ont été utilisées par les roboticiens : Unité-Centrale-Référencée (Unit-Center-Referenced), Chef-Référencé (Leader-Referenced) et Voisin-Référencé (Neighbour-Referenced) [BA98]. Dans chacune des méthodes, chaque robot du groupe détermine sa position par rapport à un élément de référence différent. Dans la méthode "Unité-Centrale-Référencée", cet élément est le centre de l'ensemble du groupe. Par contre, dans les méthodes Chef-Référencé et Voisin-Référencé, celui-ci détermine son emplacement respectivement par rapport au robot leader et à un robot considéré comme voisin.

Dans la littérature, diverses approches ont été proposées pour mettre en place une stratégie de coopération permettant la navigation en formation d'un groupe de robots mobiles. Les principales approches sont : l'approche hiérarchique, l'approche comportementale et les approches basées sur les structures virtuelles.

– **L'approche hiérarchique**

Dans cette approche, un ou plusieurs robots de la formation sont considérés comme des robots guides qui mènent la mission, et les autres sont appelés suiveurs. Généralement, le guide évolue sur une trajectoire prédéfinie tandis que les autres robots suiveurs le suivent avec une certaine posture (distance et orientation) relative. Ainsi, quand le guide suit sa trajectoire, les suiveurs utilisent sa position et son orientation pour calculer leurs propres consignes. Plusieurs contributions ont été apportées en utilisant cette démarche. On peut citer à titre d'exemple les travaux [DFK⁺02a], [TPK04], [LRS06], [GH08], [GL12], [CGM06]. Cependant, quelques inconvénients limitent l'utilisation de cette stratégie. Son principal défaut est son manque de robustesse face à une défaillance au niveau du robot guide.

– L'approche comportementale

Cette stratégie est inspirée du mouvement collectif de certaines espèces animales, qui leur permet de combiner leurs sens et d'augmenter ainsi leur chance de détecter leurs prédateurs ou la nourriture (voir figure 1.13).

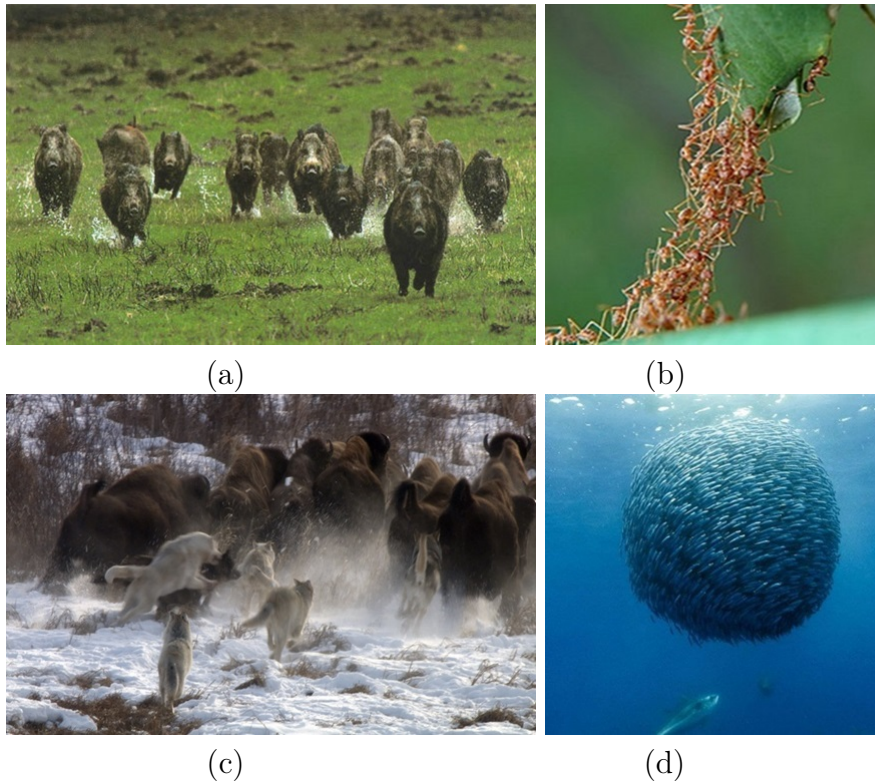


FIGURE 1.13 : Des comportements collectifs dans la nature, (a) Une harde de sangliers prenant la fuite, (b) une colonie de fourmis se déplaçant en groupe, (c) une meute de loups en chasse, (d) un banc de poissons détecte un prédateur.

Avant que les roboticiens ne s'intéressent à ce sujet, le comportement collectif des animaux a attiré l'attention des biologistes [Par82] [Cou09]. Ils ont voulu découvrir et étudier la dynamique de comportement et de voisinage des individus durant un mouvement collectif chez ces espèces.

Parmi les premiers travaux techniques sur ces stratégies, *le modèle distribué de comportement* proposé par Reynolds [Rey87]. Bien que Reynolds ait été spécialisé en infographie, son travail a inspiré les chercheurs en robotique et en intelligence artificielle qui ont reproduit ces types de comportement collectif à travers l'application de la théorie de Reynolds [Rey87] sur de vrais robots ou des agents simulés.

Cette théorie suppose que si chaque robot du groupe accomplit ses tâches élémentaires en se basant uniquement sur sa perception locale de chaque entité et en respectant des règles bien définies, un comportement collectif peut émerger, créant ainsi un comportement global inattendu au niveau du groupe.

En introduisant d'autres contraintes (autonomie, communication) au niveau de l'application de la théorie de Reynolds, la stratégie comportementale s'est rapprochée de conditions réelles. Afin de mettre en oeuvre ces mouvements collectifs selon les modèles collectifs de comportement [OS06] [AAC10], chaque entité du groupe doit suivre les règles suivantes :

- Évitement de collisions : éviter les collisions avec les voisins proches et des éléments de l'environnement d'évolutions,
 - Mise en correspondance de la vitesse : faire correspondre la vitesse avec celles des entités considérées comme voisines,
 - Centrage de la flotte : tendance à rester près de voisins proches et de garder la symétrie de la géométrie de la formation.
- **Structure virtuelle**

La méthode par structure virtuelle, voire guide virtuel, consiste à remplacer le robot guide de l'approche hiérarchique, par un leader virtuel. En début de mission, chaque unité de la formation connaît la trajectoire de la mission qui est celle du meneur virtuel lui-même. Un des principaux inconvénients de cette stratégie est l'augmentation du risque de collision entre les agents, car il n'y a pas de retour sur l'état de la formation. Par ailleurs, la trajectoire prédéfinie de la mission diminue l'autonomie de la formation [CGM06].

Leonardo et Fiorelli [LF01] présentent une illustration de cette méthode en soumettant chaque entité robotique à un champ de potentiel, agissant comme une force. Le potentiel sera répulsif de rapprochement entre voisins afin d'éviter les collisions, et attractif en présence d'une structure virtuelle afin de maintenir la formation. Le concept de structures virtuelles a été appliqué aussi par [LT97] pour le maintien de formation. A cette fin, chaque robot est commandé de façon à

respecter des contraintes géométriques imposées par rapport au voisinage et à un cadre de référence.

– **Autres approches**

Dans le même contexte, une nouvelle approche se basant uniquement sur la vision a été proposée. Nous citons ainsi les travaux de [VSS03] considérant le contrôle de la formation comme une tâche d'asservissement effectuée par les robots suiveurs à l'aide d'une vision omnidirectionnelle afin de suivre le robot guide. Pour estimer la position et la vitesse de celui-ci, le robot suiveur utilise la segmentation de mouvement. L'application de cette approche exige une importante capacité de calcul pour la détection et l'identification des robots, ce qui augmente le coût du système. Se basant sur la vision, d'autres chercheurs ont appliqué cette approche dans le but d'estimer la position relative et l'orientation du robot guide [FM02], [MLGV02], [CC04a]. Il y a aussi une variété de travaux qui se concentrent sur la question de planification de mouvement [BC04] et les architectures de contrôle [FDK001] des SMR en formation.

1.3.5 Qu'est ce qu'une formation (La nature comme source d'inspiration)

La notion de comportement collectif dans les systèmes multi-robots se définit par similitude avec le principe de travail collectif dans notre société.

Ce comportement représente généralement une réponse à une influence ou à un stimulus commun dans des situations particulières [Ren99]. Dans la mise en oeuvre d'un système multi-robots [DJMW96], nous pouvons distinguer deux sous-catégories de comportements collectifs associées à deux notions, la coopération et la compétition.

- Les comportements compétitifs : dans ce type de comportement, les robots sont en compétition les uns contre les autres pour des intérêts individuels en concurrence avec les intérêts du reste du groupe,

- Les comportements coopératifs ou collaboratifs : dans ce type de comportement, les robots interagissent les uns avec les autres pour un intérêt commun et prennent en considération les contraintes de chacun afin d'améliorer le résultat global.

Les comportements qui nous intéressent sont de type coopératifs. Ils se basent sur deux notions importantes qui sont la coopération et la coordination.

La coordination : son rôle principal est d'organiser les actions de chaque robot afin qu'ils respectent l'ordre des tâches sur le plan global. La performance globale du système est directement influencée par la qualité de la coordination et particulièrement par la qualité du contrôle de l'exécution des mouvements de chaque robot impliqué afin de réaliser sa propre tâche et de contribuer à la réussite de la tâche globale.

La coopération : elle vise à créer une interaction entre des robots qui travaillent dans un intérêt commun [BG91]. Des robots en coopération possèdent par définition un but commun, qui donne lieu à des sous-tâches qui seront attribuées à chaque robot. Pour évaluer le besoin à la coopération pour la réalisation d'une mission, Parker [Par94] a proposé le concept de couverture, qui est un indice du niveau de coopération requis pour l'accomplissement d'une tâche : plus la couverture est grande, moins les tâches ne nécessitent de coopération. En revanche, si la couverture est faible, alors une réelle coopération est nécessaire.

La formation est un cas particulier de coopération. Au cours d'un déplacement en formation, les robots conservent un objectif commun qui est dans la plupart des cas une position à atteindre ou une trajectoire à réaliser. Bien adapté à la navigation d'un groupe de robots, ce type de déplacement se fait généralement dans des espaces restreints ou inconnus où les robots partageront des buts et des contraintes.

Au cours d'un déplacement en formation, des relations de distance entre les robots peuvent être imposées ce qui définit la configuration géométrique du groupe dans l'espace. Celles-ci, peuvent avoir un objectif esthétique lors des meetings aériens (voir figure 1.14) mais leur intérêt principal est l'amélioration de l'efficacité et de la sécurité du groupe. Ce comportement a été inspiré du déplacement en formation des oiseaux migrateurs. Ils se déplacent le plus souvent en respectant une forme



FIGURE 1.14 : Analogie entre le déplacement des patrouilles d'avions militaires et les oiseaux migrateurs volant en formation "V".

géométrique en V pour parcourir de très grandes distances. Cette configuration vise à améliorer leurs performances en terme d'endurance (voir figure 1.14). Les études en aérodynamique ont effectivement montré que les perturbations créées par l'oiseau de tête réduisent les efforts à fournir par ceux qui le suivent. Ils conservent une formation géométrique bien définie pour accroître l'efficacité aérodynamique et pour réduire la consommation d'énergie. En outre, chaque oiseau utilise la distance et l'angle qui le séparent de son voisin afin de se situer par rapport au groupe et maintenir la formation. A ses débuts, la navigation en formation a été étudiée principalement sur une base théorique en raison du manque de puissance de calcul suffisante pour les simulations [SY99],[SS83]. Dans les dernières années, des études sur des robots réels ont été publiés [BH00a]. La plupart des chercheurs se sont concentrés sur des questions relatives à la communication dans un SMR ou à la réalisation expérimentale d'une navigation en groupe coordonné [CP02],[FM02]. Au cours des dernières années, la communauté des roboticiens montre un intérêt croissant pour le sujet, cela se traduisant par un nombre croissant de publications.

1.3.6 Le contrôle de la navigation en formation en robotique

L'utilisation d'une formation ne se limite pas à un type de robot. Il existe divers systèmes où ce type de contrôle est mis en oeuvre.

1.3.6.1 Les robots terrestres

Différents aspects des déplacements en formation ont été étudiés. Pour démontrer l'efficacité de différentes méthodes de contrôle de formation, deux types de robots ont été largement utilisés : les robots mobiles holonomes [BA98] et non holonomes [DOK98]. Dans le même contexte, des expérimentations ont été réalisées pour tester des algorithmes de contrôle de formation [BA98] sur des véhicules militaires Hummer.

La coordination et la coopération entre plusieurs robots autonomes afin de se déplacer en formation ont été également le centre d'intérêt de plusieurs études comme dans le cadre du projet Martha [AFH⁺98] ou dans les travaux de Svestka et Overmars [ŠO98]. De nouvelles architectures de contrôles de SMR en formation ont été proposées, nous citons à titre d'exemples l'architecture de contrôle hybride proposée par *Ahmed ben zerrouk* sur les robots khepra III de la société K-team [BAM14].

Sur une échelle plus grande, les techniques de navigation en formation ont été utilisées dans les travaux d'Horowitz et Varaiya [HV00] pour la gestion automatique du trafic routier de façon à maintenir un espacement seuil entre les véhicules sur les voies rapides ; cela permet de fluidifier le trafic tout en assurant la sécurité des personnes. Différents types de robots ont été utilisés et différents aspects de cette thématique ont été étudiés dans d'autres travaux [CL94], [SS96],[SY99],[Wan91]

1.3.6.2 Les robots aériens

Les recherches menées sur les drones aériens par les roboticiens et les automaticiens ne cessent de s'accroître et de se diversifier. En travaillant en groupe, le potentiel de ces petites machines volantes s'avère gigantesques surtout à travers le déplacement en formation.

Avec l'implémentation des techniques de contrôle du vol en formation, une multitude d'applications ont vu le jour comme : la surveillance de sites sensibles, la gestion

des risques naturels, la protection de l'environnement, l'intervention dans des sites hostiles, la gestion des grandes infrastructures et la cartographie. Une application classique est la détection et la surveillance des feux de forêts [OLM⁺05].

Ces techniques ont été aussi utilisées pour réduire l'espacement entre les avions, notamment en approche autour des aéroports [Hai04], de façon à fluidifier le trafic aérien et augmenter la capacité de ces aéroports sans augmenter leur taille.

1.3.6.3 Les robots sous-marins

L'une des raisons principales de l'utilisation des robots sous-marins en formation réside dans leur capacité à couvrir de grandes surfaces efficacement. Pour cela, les véhicules sous-marins sont couramment invités à effectuer des missions d'enquête [HKH10] pour une variété d'applications. Dans les travaux d'Arrichiello [Arr06] plusieurs cargos avec des équipages réduits ont pu réaliser la navigation automatique en formation dans des zones de grand trafic (à l'approche des zones portuaires). Il existe par ailleurs des initiatives plus originales, telles que le contrôle de formation de robots poissons biomimétiques [SYW06].

Dans la littérature, diverses approches de contrôle de formation ont été testées en robotique sous-marine. Dans [BVO08], la technique DE champs potentiels a été utilisée pour le contrôle de trajectoire en simulation avec une flotte de planeurs et le maintien de la formation par l'approche de structure virtuelle. Dans [SHK⁺03] des essais ont été menés pour tester un algorithme de déplacement en formation sur une flottille d'UUVs afin d'effectuer une cartographie 3D du fond marin.

Il existe aussi une autre approche de contrôle qui utilise l'information diffusée à partir d'une source externe pour permettre aux véhicules sous-marins participant à la formation de générer des trajectoires cohérentes en maintenant leur configuration géométrique [SBS05].

Une approche hiérarchique a été validée dans [EBOA04] à travers une plateforme de simulation pour la navigation en formation d'une flottille de torpille.

1.3.7 Application sous-marine des systèmes multi-robots en formation

Dans le domaine sous-marin, plusieurs applications ont bénéficié des avantages du contrôle en formation des SMR. Nous trouvons dans la littérature des architectures de coordinations multiples permettant de dépasser les problèmes liés à la communication, la commande ou encore la coopération dans l'environnement marin.

Nous pouvons citer à titre d'exemple les travaux de Martins [MAS03] qui proposent de coordonner en formation triangle un SMR hétérogène pour le suivi de grandeur physico-chimique (le gradient de température ou de salinité). Pour cela une commande coordonnée pour trois véhicules et un bateau de surface a été mise en place. Équipé de GPS et de balises, le bateau positionne la flottille et chaque robot se déplace par rapport aux autres en connaissant la distance qui le sépare des autres et les distances entre les autres robots. Ainsi le SMR suit le gradient de mesure en respectant la formation géométrique.

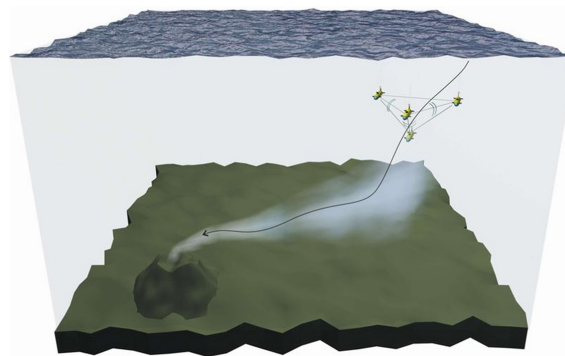


FIGURE 1.15 : Une formation d'AUV pour le suivi de grandeurs physiques (source : <http://www.grexproject.eu>).

[BJCR01] propose un algorithme de positionnement pour plusieurs véhicules par rapport à un véhicule leader pour des missions d'inspection de pipeline et de cartographie. Les robots n'ont besoin que d'un faible nombre de capteurs (un modem acoustique et les capteurs nécessaires à la navigation à l'estime). Connaissant la profondeur du véhicule leader, les véhicules followers, s'alignent sur la même

profondeur et gardent une distance prédéfinie par rapport à celui-ci afin de maintenir la formation au fil de la mission.

Stilwell [Sti02] propose un algorithme de contrôle de flottilles décentralisé en considérant la contrainte de limitation des communications. Il utilise des techniques de commande standard avec un système de commande à deux boucles de retour (une interne à chaque robot, une externe pour la flottille). L'objectif est de contrôler la moyenne et la variance de la position des robots afin de maintenir une formation désirée pour le suivi de trajectoire ou d'une grandeur chimique (voir figure 1.15), en dépit de la communication réduite au sein des unités du groupe. Ces travaux ont été utilisés aussi pour la recherche et la détection d'objets, la surveillance des fonds marins et la cartographie.

Okamoto [OFEW04] propose aussi une architecture décentralisée (Leader-Follower) pour flottille d'AUVs dans le but de rechercher des mines. Le robot leader utilise un système de guidage de type waypoint durant sa navigation, tandis que les robots suiveurs maintiennent une distance et une orientation spécifiques par rapport aux véhicules voisins et au robot leader (figure 1.16(a)). Les simulations ont montré l'efficacité de la navigation en formation à réaliser la tâche en termes de temps d'exécution et de surface couverte. Un des problèmes de ce type d'application est l'échange de position entre les robots pour effectuer un demi-tour. Pour résoudre ce problème, une mise en formation ligne droite est appliquée pour que la flottille réussisse à effectuer une trajectoire en râteau durant le demi-tour (figure 1.16(b)).

Spiwak [Spi07] a basé ses travaux sur une commande décentralisée reposant sur le principe Leader-Follower. Chaque robot est muni d'un générateur de trajectoires fournissant à celui-ci un chemin optimal à chaque instant tout en maintenant dans une formation géométrique(en colonne). La formation peut changer de configuration géométrique au fil de la mission pour éviter des obstacles ou pour d'autres raisons (voir figure 1.17).

Dans le travail de Thomas Sousselier [sou14] la conception et la validation d'un algorithme de mise en formation d'essaim de micro-robots submersibles équipés de sonars ont été proposées dans le cadre d'une mission de guerre des mines. Ces

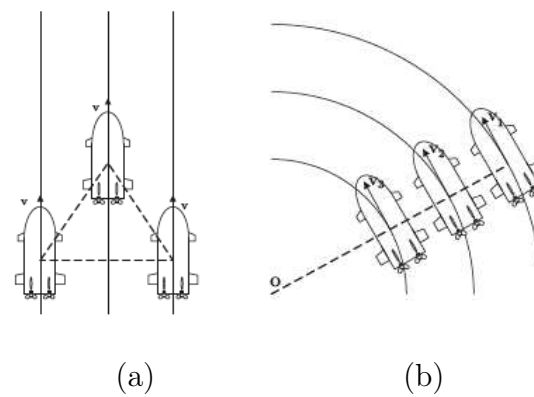


FIGURE 1.16 : Une meute de robots sous-marin, (a) en formation triangle, (b) en formation ligne.

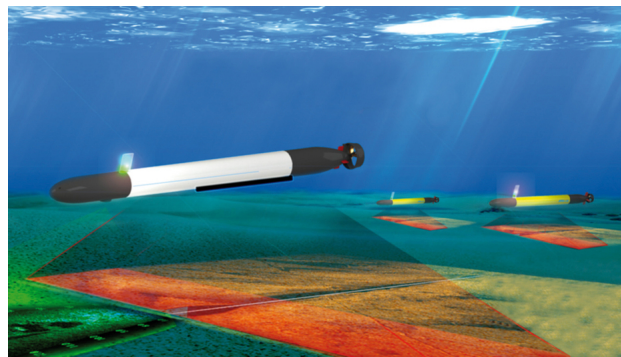


FIGURE 1.17 : déplacement d'un SMR en formation pour un mission de surveillance (source : [pC13]).

robots sont équipés d'une unité de calcul et de traitement afin de détecter, classifier et identifier les objets sous-marins. Les robots commencent la mission avec des positions aléatoires, puis s'alignent sur un axe perpendiculaire à l'axe de navigation et chaque engin régule son mouvement de façon à respecter une distance qui le sépare de son voisin, prédéfinie au début de la mission(voir figure 1.18).

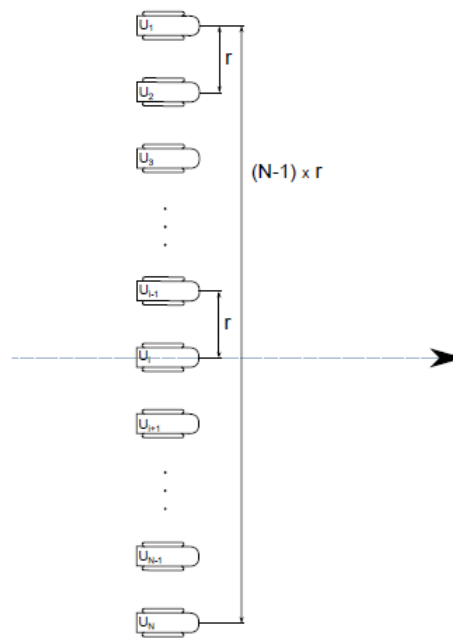


FIGURE 1.18 : Navigation en formation ligne d'un SMR sous marin [sou14].

1.3.8 Les critères d'évaluations de la navigation en formation

1.3.8.1 Stabilité, fiabilité, sensibilité, flexibilité

La stabilité et la fiabilité sont les critères les plus importants dans le fonctionnement d'un SMR, en particulier durant la navigation en formation.

- la stabilité d'un SMR réside dans sa capacité à revenir naturellement dans une position d'équilibre et à corriger sa configuration géométrique après avoir subi une perturbation
- la fiabilité d'un SMR en navigation est la capacité de son architecture de coordination à assurer les déplacements désirés, à maintenir la formation et à accomplir la tâche désirée.

La sensibilité et la flexibilité d'un SMR sont des critères qui permettent d'évaluer la robustesse des algorithmes de contrôle de formation.

- la sensibilité d'un SMR en navigation est l'influence que peut avoir la défaillance ou la perte d'un robot (défaillance ou panne de capteurs) au fil de la mission sur la capacité d'un SMR à accomplir la tâche
- la flexibilité d'un SMR en navigation en formation est l'influence de l'ajout d'un robot au groupe, au cours de la mission sur le maintien de la formation dans sa configuration géométrique et la capacité du système à intégrer une nouvelle entité dans sa stratégie de coordination.

1.3.8.2 Temps d'exécution

Le temps d'exécution d'une tâche est un des facteurs principaux dans l'évaluation du rendement d'un SMR naviguant en formation. Plus le SMR réalise ses objectifs dans une durée réduite, plus la stratégie de coordination pour le déplacement en formation est considérée comme rentable. L'augmentation du nombre de robots dans un SMR ne signifie pas forcément la diminution du temps d'exécution d'une tâche. Par exemple, pour cartographier un environnement, l'augmentation de la taille du SMR permet de couvrir une surface plus large. En revanche, dans une mission où il faut pousser un objet lourd, l'élargissement de la taille de l'SMR crée des conflits au sein du groupe, ce qui ralentit l'accomplissement de la tâche.

1.3.9 Communication

Étant un moyen fondamental pour réussir la coordination dans un groupe de robots, la communication apparaît souvent comme un comportement rationnel dans les environnements multi-robots. Dans le contexte des SMRs, la communication représente un mode d'interaction entre les robots permettant, d'une part de partager les informations relatives à la position, à l'état de l'environnement et aux données des capteurs avec les autres unités du SMR. D'autre part, chaque robot peut avoir une vision globale sur le groupe en obtenant des informations sur les intentions, les objectifs et les actions de chacun des autres robots. Par conséquent,

la communication permet au robot de tenir compte de ces paramètres dans sa prise de décision et par suite dans son comportement individuel.

La qualité de communication dans un SMR est liée principalement à la qualité de l'information à la réception (avec perte ou sans perte d'information) et le délai d'envoi d'un message. Ces deux paramètres dépendent du support physique de communication (onde acoustique, onde radio, onde électromagnétique, lien WIFI) et de l'environnement d'évolution du SMR. Dans certains travaux les informations communiquées sont souvent considérées comme précises. Toutefois, dans le cas des systèmes coopératifs, les problèmes intrinsèques liés à la communication sont susceptibles d'affecter les performances du système et même de le rendre instable.

Avant d'étudier la communication sous marine, nous allons décrire brièvement les communications basées sur des ondes électromagnétiques (radio fréquences et optiques), qui sont les modes les plus communs pour l'échange de données chez les SMR terrestres et aériens.

Comme leur utilisation dans l'eau est limitée à de rares applications, la deuxième partie de cette section traite de la communication acoustique qui est l'outil le plus couramment utilisé sous l'eau. Le moyen de communication sans fil le plus employé pour les robots terrestres et les drones aériens sont les ondes électromagnétiques notamment dans le spectre ultra-haute fréquence (UHF) autour de 900 MHz ou 2,4 GHz. La communication radio permet à ces véhicules de communiquer sur des distances de quelques mètres.

En raison de la forte atténuation des ondes radio dans l'eau, ce type de communication a été peu utilisé dans le domaine de la robotique sous-marine.

Les premiers systèmes existants sont les systèmes américain Seafarer et russe ZEVS qui sont constitués chacun d'une base transmettant des informations sur les fréquences respectives 76 Hz et 82 Hz. Ce système permet la communication dans un seul sens, vu que c'est difficile de l'embarquer sur le sous marin : de la base au sous marins. Ces systèmes peuvent communiquer sur des longues distances arrivant

à 90km, mais le débit de transmission de données est très faible. Du coup son utilisation se restreint à envoyer un signal au sous-marin pour rejoindre la surface.

Récemment, plusieurs émetteurs-récepteurs ont été développés et fonctionnent dans une bande de fréquences basses (entre 30 kHz et 300 kHz) et peuvent être utilisés pour une communication entre les AUV.

Schill est un groupe de chercheurs qui ont développé un émetteur-récepteur assez petit pour être embarqué sur un AUV avec un débit de données arrivant jusqu'à 8 kbps et une communication sur des distances allant jusqu'à 10 m [SZT04].

Dans les travaux de Schill [SZT04] et Vasilescu [VKR⁺05], un modem optique à faible coût utilisant des LED puissantes (pour l'émission) et des photos diodes ont été testées et ce système a pu atteindre des débits de transmission de données allant jusqu'à 50 kbps sur des distances de 3 m et même de 10 m en cas d'alignement des robots ou d'utilisation de lentilles sur les LED.

Les ondes optiques ont été rarement utilisées dans le domaine sous- marin car elles sont fortement atténuées dans l'eau. De plus, le phénomène de diffusion de la lumière diminue encore la portée maximale possible. Toutefois, de nouvelles études ont commencé à exploiter cet outil et à l'améliorer.

En utilisant un faisceau laser (steered laser beam) comme émetteur et un photomultiplicateur en tant que récepteur, Farr et Chave [FCF⁺06] ont essayé d'augmenter la distance à 100 m ainsi que le taux de transmission à 10 Mbps.

1.3.9.1 Communication sous-marine

Dans le contexte sous-marin, la seule solution permettant de transporter des informations avec des caractéristiques exploitables et de se propager dans l'eau de manière favorable est d'utiliser les ondes acoustiques, qui permettent de compenser la quasi-absence d'ondes électromagnétiques et lumineuses dans l'océan [Lur98]. La quantité de données à transmettre ou à recevoir pour chaque véhicule par onde acoustique est limitée. De plus, les bruits ambiants et les échos parasites sont des

éléments perturbateurs de la communication acoustique. Ceci veut dire que la qualité de communication sous-marine dépend alors des caractéristiques du milieu de propagation et des propriétés physiques de l'onde sonore.

Même si le milieu de communication est très favorable à la propagation des ondes acoustiques, de nombreuses contraintes imposent certaines limitations. Tout d'abord, les signaux sont limités en portée car le signal est atténué dû à l'absorption des ondes sonores dans l'eau. De plus, la propagation de celui-ci est perturbée par les variations de célérité du son et par la réflexion sur la surface ou le fond marin.

En outre, ces ondes sous-marines ne se propagent pas en ligne droite et peuvent suivre des trajets multiples. Par conséquent, il y aura des déformations au niveau des informations transmises. Les propriétés du milieu marin dépendent des variations (géographiques et saisonnières) de la température et de la salinité, du relief du fond, de la houle, des courants et tourbillons et des marées. Les propriétés sont variées et fluctuent dans l'espace et le temps. En conclusion, toutes ces limitations font que les communications dans le domaine de la robotique sous-marine sont soumises à des coupures fréquentes ou des retards.

Ces spécificités du milieu sous-marin font que non seulement la communication entre robots est difficile, mais encore ces derniers ne pourront pas communiquer en même temps. La solution réside alors dans le développement d'une architecture de coordination, qui s'adapte aux pertes de communication, et d'une topologie de communication alternée entre les robots. Par ailleurs, une gestion temporelle des émissions acoustiques, une optimisation de la fréquence de transmission des messages et de la quantité d'information à envoyer est nécessaire, étant donné la possibilité d'avoir une interférence entre l'équipement de communication et les instruments acoustiques des véhicules, tels que le sonar.

1.3.10 Navigation

1.3.10.1 Planification de trajectoire

Le déplacement des SMR ayant une taille qui ne cesse d'augmenter dans de divers types d'environnements exige l'étude de la planification de leurs trajectoires afin d'atteindre leurs cibles finales.

Une des problématiques principales des SMR consiste à permettre au groupe de robots de se déplacer comme une seule entité d'une position à une autre dans leur milieu d'activité. Comme nous l'avons vu, cette problématique sous-entend dans un premier temps, de définir une stratégie de contrôle de navigation en formation. Ensuite, l'objectif consiste à définir un chemin que les robots vont suivre entre une configuration initiale et finale de façon à atteindre leurs cibles tout en évitant les obstacles présents [HSS84]. Au cours de ces dernières décennies, plusieurs chercheurs se sont concentrés sur l'étude de la planification de trajectoires pour les systèmes multi-robots [ŠO98]. Dans ce contexte, des approches ont été proposées pour gérer cette tâche. La définition de chaque trajectoire peut se faire de façon plus ou moins réactive ou délibérative en fonction des approches et des ressources mises en oeuvre.

La planification peut s'effectuer de façon réactive, en cherchant à chaque instant la prochaine configuration cible dans l'espace donné par la perception courante, ou de façon délibérative en établissant l'ensemble des configurations intermédiaires. Une planification délibérative dans un cadre multi-robots doit tenir compte des déplacements des autres robots de façon à ce que les successions de configurations intermédiaires de tous les robots ne génèrent pas de collisions. Il existe aussi différentes approches pour la résolution du problème de la planification de chemin multi-robots : L'approche centralisée, l'approche distribuée et l'approche hybride.

Dans le cadre de l'approche centralisée, la planification se fait en combinant les espaces de configurations de tous les robots [AS91]. Dans le cadre de l'approche distribuée, la définition des trajectoires se fait de manière indépendante sur chaque robot et tient compte de leurs interactions [ELP87] [FPOA98]. Les travaux de [RB08] dans lesquels l'approche centralisée est implémentée pour la planification

du chemin global de tous les robots dans l'environnement de travail et dans lesquels ces trajectoires sont corrigées grâce à une seconde planification distribuée qui se fait localement selon les caractéristiques des obstacles (position et forme).

1.3.10.2 Évitement d'obstacles

Dans le cadre de la planification de trajectoire pour les SMR, un aspect important est l'évitement d'obstacles dans des environnements encombrés ou dynamiques. Ceci nécessite d'implémenter ces comportements de base sur chaque robot du groupe et de les équiper par des capteurs permettant la détection et la localisation (télémètre laser, ultrasons, infrarouges, etc.) dans le but de sécuriser les robots mobiles en cours de navigation. Dans la littérature, deux méthodes d'évitement d'obstacles sont appliquées dans le domaine des SMR.

La première méthode est la méthode des champs de potentiel. Proposée par Khatib et Arkin [[Kha86](#)] [[Ark98](#)], elle est la plus répandue dans la littérature. Elle considère le robot mobile comme un point soumis à divers champs de forces artificielles qui sont définis en fonction des positions respectives des cibles et des obstacles par rapport à la position du robot. Plus précisément, une cible déploie une force virtuelle attractive alors que les obstacles agissent comme des forces virtuelles répulsives. Chaque robot subira la poussée du potentiel résultant. La force d'attraction doit être présente dans tout l'environnement de travail alors que les forces de répulsion vont décroître en s'éloignant de l'obstacle. De cette façon, en cas de présence d'obstacles proches, la force d'attraction sera négligeable par rapport aux forces de répulsions et cette situation sera inversée en cas d'absence d'obstacles.

Cependant, cette méthode comporte des défaillances [[KB91](#)]. Par exemple, dans le cas de présence d'obstacles multiples, de fortes oscillations peuvent se créer dans le mouvement du robot, ce qui affectera tous les robots se trouvant dans son voisinage et fera perdre au groupe la direction et la vitesse de navigation.

Des améliorations apportées à cette approche ont permis l'apparition de nouvelles techniques d'évitement d'obstacle. Dans les travaux de Ge et Huang [[GC02](#)][[Hua09](#)],

la technique du champ de potentiel a été adaptée à la navigation en présence d'obstacles mobiles. Un nouveau paramètre a été pris en compte au niveau du calcul de champ et de la vitesse d'obstacle. Dans le même contexte, d'autres approches découlant des champs de potentiel ont vu le jour. On peut citer à titre d'exemples la méthode des histogrammes par champs de vecteurs (Vector Field Histogram - VFH) introduite par Koren et Borenstein [KB91]. Elle se base sur la navigation par une combinaison des champs de potentiels et des grilles d'occupation. Minguez et Montano [MM00] se sont inspirés des VFH pour mettre en place l'approche de navigation par diagrammes de proximité (Nearness Diagram Navigation - ND) avec l'introduction de la topologie du milieu d'évolution. Une technique d'évitement d'obstacles basée sur des concepts de trajectoires décrits par des équations différentielles, a été proposée par Stuart [SH98]. Nous citons également les approches par Curvature Velocity Method [Sim96], Lane Curvature Method [KS98] et dynamic window [ÖL05].

Dans ce qui suit, nous complétons notre état de l'art en nous intéressant à la navigation en formation et plus particulièrement aux différentes stratégies de coopération et aux architectures de coordination introduites par la littérature pour accomplir cette tâche.

1.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis en premier lieu d'avoir une idée générale sur la robotique sous-marine et ses applications. Étant donné que l'objectif de la thèse est la conception d'un algorithme de coordination de groupes de robots sous-marins communicants, nous nous sommes tout d'abord intéressés aux éléments nécessaires pour le passage d'un système mono-robot à un système multi-robots, à savoir la coordination, la coopération et la communication. L'objectif est évidemment de coordonner les actions des entités robotiques et de tirer profit de la coopération du groupe en prenant en compte les différentes contraintes (caractéristiques de l'environnement, dynamique du robot) afin de justifier l'utilisation d'un système

multi-robots plutôt qu'un système mono-robot. Une fois que le choix du SMR est établi, il faut concevoir les outils, qu'il est nécessaires de mettre en oeuvre dans le groupe. Nous avons pu voir les différentes architectures de coordination existantes dans la littérature. Elles ont été classifiées selon les modes d'implémentation : centralisée (au niveau du superviseur), décentralisée (distribuée sur les entités robotiques) ou hybride. Nous avons pu aussi voir les différents mécanismes de coopération qui peuvent être appliqués par le groupe. Enfin, afin de pouvoir choisir l'architecture de coordination adéquate à notre SMR, nous nous sommes focalisés sur une forme de coopération qui est la navigation en formation et ses spécificités. Nous avons vu les différentes stratégies de coordination utilisées pour cette application dans la littérature, leurs avantages et leurs inconvénients, afin de nous aider à retenir les meilleurs choix pour la stratégie de coordination que nous justifions et proposons dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Proposition d'une nouvelle stratégie de coordination hybride

2.1 Introduction

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différentes classes d'architectures de coordination de groupe de robots dans la littérature et énumérer les avantages et les inconvénients de chacune d'elles. L'un des points essentiels à fixer avant d'élaborer une architecture de coordination pour un SMR, concerne le choix de centraliser le processus de prise de décision [WSB08], [YJC10], [YJC12], [YJAC12], de le distribuer sur les entités robotiques [LC09a], [DKF⁺09], [FLS02b] ou de faire un compromis entre les deux par le biais d'une architecture hybride [BLH⁺01a], [DFK⁺02b], [FLS⁺02a], [SBS05]. En s'appuyant sur ces architectures, une nouvelle approche à la coordination d'un groupe de robots est proposée. Ce chapitre débute par une description des missions sous-marines que devra réaliser le groupe de robots. La nouvelle stratégie de coordination, étudiée et évaluée dans le cadre de ces travaux de thèse, se fonde sur une méthode hybride alternant le mode essaim et le mode hiérarchique en fonction de l'évolution de la mission. L'objectif de ce chapitre est de justifier le choix de cette stratégie et d'expliquer le but de chacun des deux modes de fonctionnement du groupe de robots de robots sous marins.

Nous décrirons la mise en oeuvre de chaque mode et les mécanismes mis en place pour permettre le passage d'un mode à l'autre selon les circonstances de la mission.

2.2 Rappel de la mission : cartographie des fonds sous-marins par un groupe de robots équipés de capteurs optiques

Au cours de ces dernières décennies, la recherche d'objets de petite dimension ou de singularités sur les fonds marins est une activité en fort développement. Pour ces applications, le capteur de référence est le sonar d'imagerie car l'acoustique est le moyen privilégié d'acquisition d'informations sous-marines. Cependant, pour des objets de petite taille ou pour des matériaux dont l'impédance acoustique est proche de celle de l'eau, le sonar peut se révéler inadapté. Dans ce cas, la vidéo sous-marine opérant en optique incohérente, est un capteur tout à fait intéressant.

Les principaux avantages des caméras vidéo sous-marines sont leur faible encombrement, leur consommation réduite et leur coût abordable. Leur principal défaut est leur portée très limitée dans l'eau. Cependant, la combinaison de ces avantages et de ces défauts fait que ce type de capteur est idéal pour l'acquisition détaillée des fonds par un groupe de robots. Le coût limité de ces capteurs est aussi un argument en faveur de leur utilisation sur un groupe de robots, vu qu'il agit directement sur le prix unitaire du robot. Dans ce chapitre, nous allons choisir une stratégie de coordination d'un groupe de robots sous-marins adaptée à la recherche d'objets de petites dimensions ou de singularités sur les fonds marins..

La mise en oeuvre d'un groupe de robots sous-marins parfaitement coordonnés qui se comporte comme une seule entité, constitue un défi scientifique majeur. La communication est un élément essentiel à la coordination des robots, elle peut être caractérisée par deux facteurs : le débit de communication et le volume d'information à communiquer.

Dans le monde sous-marin, l'optimisation de la communication passe par une réduction du débit d'information et donc une augmentation des traitements réalisés de façon autonome à bord des robots. Pour notre application, les traitements consistent à extraire une information de haut niveau à partir de l'analyse de séquence d'images vidéo. Dans le principe, cette démarche peut s'adapter à d'autres types de capteurs sous-marins (acoustique, magnétique, optique cohérente). La bonne coordination du groupe requiert donc, d'une part l'analyse des stratégies de communication bas-débit assurant le contrôle du groupe et d'autre part l'étude des méthodologies de coordination (hiérarchique, essaim, hybride) capables de s'adapter en temps réel à l'environnement sous-marin (perte d'un robot, dégradation des performances des capteurs ou de la communication). Le placement dynamique optimal des robots est aussi étudié afin d'accomplir la mission le plus efficacement possible. L'objectif de la mission du groupe de robots est la couverture systématique du fond marin par un capteur acoustique ou optique. Cette mission comporte deux sous-tâches : la première consiste à la mise en formation des robots et la seconde à son maintien durant la navigation pour assurer l'acquisition systématique de données vidéo.

Dans une première approche focalisée sur la méthodologie de coordination, le choix du capteur s'est porté sur la caméra vidéo sous-marine, beaucoup plus facile à mettre en oeuvre et beaucoup moins onéreuse qu'un sonar sectoriel haute fréquence.

Aussi, considérant les caractéristiques désirées dans notre application (mise en formation géométrique, acquisition systématique de données vidéo), une méthodologie unique de coordination n'est pas optimale, car les actions à réaliser par le groupe sont de natures très différentes lors des deux phases de la mission.

2.2.1 Stratégie de coordination

2.2.1.1 Contexte

Le problème global étant défini comme l'acquisition systématique des fonds marins par un groupe de robots équipés de capteurs optiques, la démarche de définition

de la stratégie de coordination optimale s'appuie sur un découpage de la mission globale en différentes étapes. Pour chacune de ces étapes de mission, l'hypothèse selon laquelle le mode de coordination optimal est avancé peut différer.

Depuis plusieurs années, la recherche dans le cadre des stratégies de coordination dans la robotique coopérative est devenue un centre d'intérêt majeur. Les stratégies proposées dans la littérature ont été testées sur de divers types de tâches.

Une classification de ces stratégies, se basant sur le choix de centraliser le contrôle, et des ressources (capteurs, unités de traitement et de calcul), de le distribuer sur les entités robotiques ou de faire un compromis entre les deux, a été établie dans le chapitre 1.

La distribution des ressources peut être très avantageuse si la mission du groupe devient trop complexe et fastidieuse. En effet, la complication de la tâche du SMR entraîne naturellement la complication du contrôle nécessaire, si bien qu'il devient difficile voire impossible à réaliser par un superviseur [LGMI01]. Par exemple, le simple ajout de nouveaux robots implique directement l'augmentation du volume de traitement et de calcul que le superviseur doit gérer. Beaucoup de travaux en robotique s'inscrivant dans le cadre des systèmes distribués évoquent ce type de problème [JLB94], [Par98], [YAB01b], [CTL+06b].

2.2.1.2 Différentes tâches avec divers modes de coordination

Généralement, le choix d'une stratégie de coordination se fait selon la nature et les spécificités de la tâche à accomplir. Dans notre cas, la mission consiste en deux sections principales :

- mise en formation géométrique.
- navigation avec maintien de la formation géométrique (pour l'acquisition des données).

La mission simple et idéale est séquencée par trois événements :

- Début de la mission (mise à l'eau des robots)
- Stabilisation de la formation (formation géométrique établie)

- Acquisition de données réalisée (fin de l'acquisition)

Afin de garantir la réussite de la mission, il faut tenir compte des facteurs externes et internes au groupe qui peuvent intervenir durant la mission et affecter sa réalisation.

Pour cela notre mission peut comporter d'autres sections supplémentaires comme :

- L'évitement d'obstacle
- La reconstruction de la formation suite à la perte temporaire d'un robot

Par conséquent de nouveaux événements vont être pris en compte dans le déroulement de la mission, qui sont :

- Obstacle rencontré
- Obstacle évité
- Perte de formation

Considérant les caractéristiques désirées dans notre application à deux sections (mises en formation géométrique, acquisitions des données vidéo), on s'aperçoit que confier le contrôle du groupe à un superviseur central n'est pas la solution idéale. Par exemple, en cas de perte temporaire d'un robot ou de dégradation des performances des capteurs ou de la communication, la récupération de ce robot peut être difficile voire impossible en cas de perte du robot superviseur.

La mise en formation géométrique est une tâche qui demande que chaque robot se localise, en fonction des informations de l'environnement délivrées par ses propres capteurs et par la communication avec ses voisins. Il est alors judicieux, voire indispensable de doter chaque entité robotique de ses propres outils décisionnels. Aussi, le mode de coordination décentralisé est le plus approprié pour cette section. Ce mode sera contrôlé par un algorithme de type essaim implémenté sur chaque robot du groupe.

La deuxième tâche dans notre application est la navigation en formation et son maintien pour l'acquisition et le traitement de données vidéo. Ceci nécessite la désignation d'un élément superviseur qui dispose de différents types d'informations globales sur l'environnement qui l'aide à prendre des décisions et à gérer la coordination des actions entre les éléments du groupe. Par conséquent, le mode de coordination hiérarchique est le plus approprié pour cette section. Dans ce mode, le robot maître contrôle les mouvements du reste du groupe afin de garantir

le bon déroulement de l'acquisition des données et le maintien de la formation géométrique.

2.2.1.3 Proposition d'une stratégie de coordination hybride

Dans notre application précisée précédemment, le SMR peut rencontrer des difficultés de plusieurs niveaux qui font qu'on peut perdre un élément du groupe en cas d'une panne quelconque sur un des robots ou du passage d'un courant d'eau violent. Le groupe de robots sous-marins peut aussi perdre la formation géométrique en cas d'évitement d'obstacle. Ces deux incidents provoquent l'arrêt de la mission en cas d'un système purement centralisé.

Dans notre approche, nous voulons récupérer cet élément et remettre le groupe en formation pour qu'il poursuive ensuite la mission avec le groupe. Ceci veut dire qu'un passage en mode distribué sera nécessaire à chaque fois que l'on rencontre un incident de ce genre pendant l'acquisition des données vidéo pour remettre la formation en place. Ceci nous permet de conclure que le mode de coordination optimal pour la mise en formation des robots est le mode essaim. En contrepartie, ce mode ne peut pas assurer la coordination de la flottille pour l'acquisition des données vidéo puisque cette tâche nécessite l'existence d'un élément superviseur dans la flottille. Pour celle-ci, le mode hiérarchique est le plus adapté. Les limitations des deux modes sur une des sections de notre application justifie le besoin de mettre en place une stratégie de coordination hybride, tentant à imposer un mode de coordination optimal sur chaque étape de la mission. Nous serons donc dans le cadre d'un contrôle hybride.

La stratégie de coordination hybride vise à diviser la mission globale sur des étapes et à sélectionner l'algorithme de coordination le plus approprié pour chacune d'elles. La façon avec laquelle les robots coordonnent leurs actions pour réussir une des étapes particulières de la mission est appelé un mode de coordination. Ce mode change souvent durant la mission dans le but d'exécuter chaque partie de la mission selon le mode de coordination le plus adapté. Par exemple, un mode peut être dédié à la mise en formation des robots à partir de leurs positions aléatoires lors

de leur mise à l'eau et un autre mode pour maintenir la formation afin d'exécuter la tâche d'acquisition de données.

2.2.1.4 Mécanisme de passage d'un mode de coordination à un autre

Ceci peut être réalisé à travers l'implémentation d'un algorithme embarqué sur chaque robot. Celui-ci aura comme rôle la sélection du meilleur mode de coordination pour une étape donnée de la mission sur chaque robot. La solution proposée est alors de mettre en oeuvre une architecture hybride de coordination, contrôlée par un automate à états finis, indiquant au groupe de robot le mode de coordination le plus approprié à la phase de la mission en cours de réalisation. Par exemple, si l'un des robots se perd, l'ensemble des robots utilise un mode essaim pour reconstituer la formation. En revanche, lorsque la formation est stable, les robots opèrent selon un mode hiérarchique pour l'acquisition des données vidéo. Dans une architecture de coordination hybride telle que décrite précédemment, plusieurs techniques peuvent être utilisées pour séquencer les étapes d'une mission. Une méthode classique pour la mise en place d'une stratégie la coordination dans un SMR est l'utilisation de machines à états finis. Une machine à états finis est un automate dans lequel on retrouve des états et des transitions. Chaque état représente un mode de coordination précis du système dans lequel un certain nombre de modules sont configurés et activés. Dans le cas d'une architecture de type hybride, chaque état est associé à une liste des comportements à activer (mise formation, acquisition de donnés), et ce, avec des paramètres prédéterminés. Les transitions de l'automate permettent au système de changer d'état (mode de coordination) lorsque un événement particulier survient, comme la terminaison d'une tâche ou une perturbation externe. Pour effectuer ces changements de modes, une machine à états finis sera alors mise en place dans l'algorithme embarqué sur chaque robot.

Le concept de machine à états finis, a depuis longtemps, été reconnue comme un élément clé dans le contrôle des systèmes robotique [Bro86]. Le choix d'utiliser un automate à états finis a également été inspiré du travail de Alessandro Marino pour

résoudre les problèmes de contrôle du déplacement en formation pour l'exploration de milieu inconnu avec un SMR [MPAC09].

Cette stratégie hybride est constituée de deux phases : une phase de mise en formation géométrique dite en anglais "Building formation mode" et une phase d'acquisition des données vidéo ou en anglais "Surveying the seabed mode". La première phase s'appuie sur des algorithmes de type «essaims» alors que la seconde se fonde sur une méthode hiérarchique de coordination. En cas de perte ou de déstabilisation de la formation, le groupe de robots quitte le mode hiérarchique et reprend le mode essaim pour se reformer. Ces changements de modes sont contrôlés par une machine à états finis, comme nous avons expliqué au paragraphe précédent (voir la figure 2.1). Les Machines à états finis (FSM en anglais) sont utilisées pour

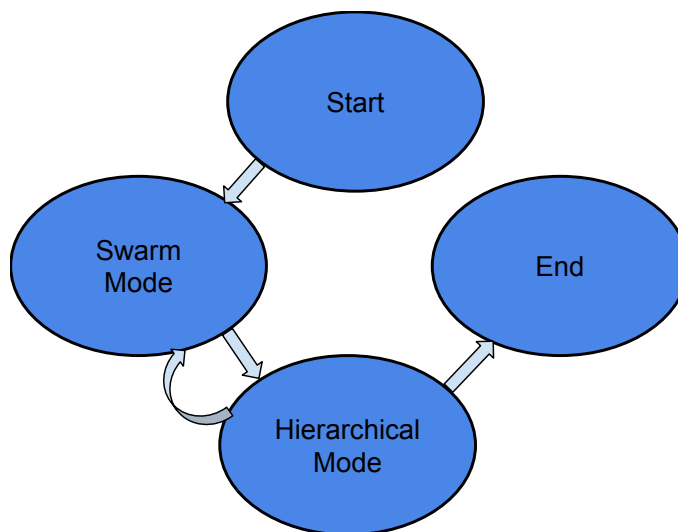


FIGURE 2.1 : La machine à état finis responsable du contrôle de la stratégie de coordination hybride.

décrire des comportements séquentiels liés au contrôle des parties opératives (robot dans notre cas). Cet aspect séquentiel fait intervenir la notion d'état, d'action et de transition ou événement. Dans notre cas, les états représentent les modes de fonctionnement du SMR (essaim ou hiérarchique). Les actions définissent les tâches accordées au robot au sein d'un état permettant la réalisation d'un sous objectif. Enfin, Les événements sont les conditions qui peuvent provoquer une action et éventuellement un changement d'état (conditions extérieures au SMR ou données internes au SMR).

Le principal avantage de l'utilisation d'une machine d'état finis est que d'une part toutes les transitions permettant le passage d'une action à une autre peuvent être explicitement codées. D'autre part, l'efficacité de celle-ci ne diminuera pas en augmentant le nombre d'actions ou en cas d'évolution dans des environnements très dynamiques. Un schéma descriptif détaillant la structure de l'automate d'états finis est montré dans la figure 2.2.

2.3 Gestion de la coordination hybride

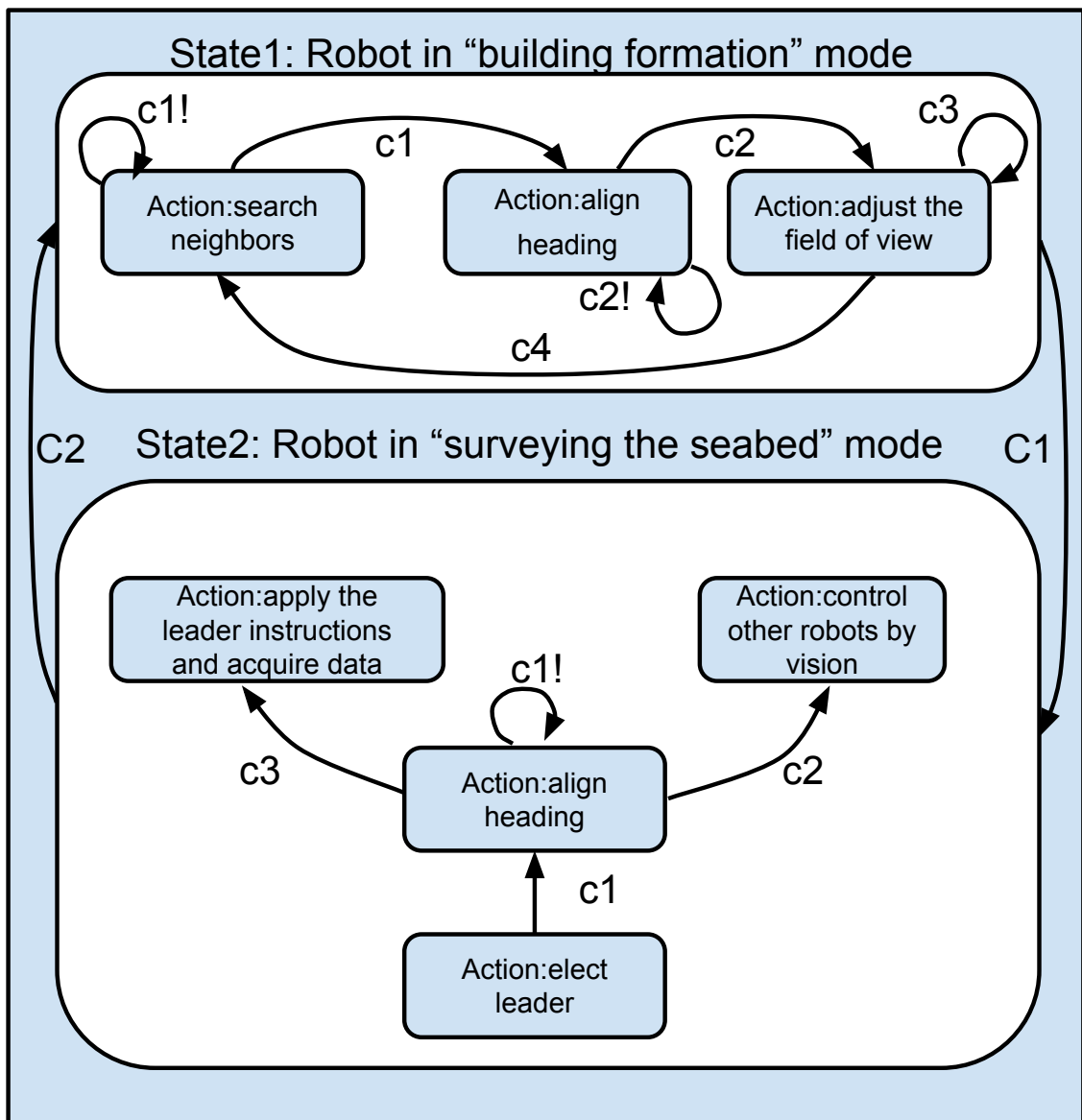


FIGURE 2.2 : La structure de la machine à états finis.

Pour concevoir cette machine à états finis, nous commencerons par définir les états principaux dans la mission, les actions relatives à chaque état et les événements permettant le déclenchement d'une action ou la transition de l'une à l'autre. Tout d'abord, on définit les deux états principaux :

- **State 1** : building formation
- **State 2** : surveying the seabed

Au début de la mission, lorsque les robots sont mis à l'eau, l'Etat 1 est déclenché, nous définissons alors les actions relatives à celui-ci comme suit :

- **Action 1** :search neighbours
- **Action 2** :align heading
- **Action 3** :adjust field view

Pendant la mise en formation, le taux de convergence de celle-ci est calculé. Lorsqu'il descend sous une valeur seuil, celle-ci est considérée comme stable. Un leader est alors élu par le groupe et il commandera hiérarchiquement l'acquisition des données vidéos par les autres robots. Dans le **State 2**, les actions sont définies comme suit :

- **Action 4** :elect leader
- **Action 5** :align heading
- **Action 6** :control other robots by vision
- **Action 7** :apply the leader instructions and acquire data

Ce processus est organisé d'une manière hiérarchique en définissant les états, les actions et les événements de la manière suivante : **State 1** :Si le mode "the building formation mode" est mis en place **ET**

- **(c1)** : Les deux angles de détection de voisins sont calculés et enregistrés **Alors** l'action "search neighbours" est activée **Sinon** l'action "align heading" est déclenchée.
- **(c2)** : Les deux angles de détection de voisins sont enregistrés **Alors** l'action "align heading" est activée **Sinon** l'action "adjust field view" est déclenchée.
- **(c3)** : Les deux robots voisins apparaissent dans le champ de vision du robot **Alors** l'action "adjust field view" est activée.
- **(c4)** : Un ou plus de robots voisins sont absents du champ de vision du robot pendant une durée dépassant un délai seuil d'attente **Alors** l'action "search neighbours" est activée.

Étant dans l'action "adjust field view", chaque robot communique son erreur de positionnement par rapport aux deux autres robots pour établir la formation désirée. Ainsi le taux de convergence vers la formation géométrique désirée est calculé par chacun des robots.

Events C1 : Lorsque le taux de convergence du groupe vers la formation géométrie désirée est inférieur à une valeur de taux seuil pour tous les robots, notre machine d'état responsable de la coordination hybride ordonne la transition de l'état "building the formation state" à l'état "surveying the seabed" et par conséquent la stratégie de coordination de l'SMR passe du mode essaim au mode hiérarchique.

State 2 : **Si** le mode " surveying the seabed " est mis en place **ET**

- Le leader du groupe est désigné **Alors** l'action "align heading" est déclenchée.
- (c1) : Le cap du robot n'est pas aligné avec la direction de navigation **Alors** l'action "align heading" est déclenchée.
- (c2) : Le robot est le leader du groupe **Alors** l'action "control other robots by vision" est activée.
- (c4) : Le robot n'est pas le leader du groupe **Alors** l'action "apply the leader instructions and acquire data" est activée.

Events C2 :**Si** on est dans le cas de perte de formation (perte de robot), l'FSM autorise le passage du mode "surveying the seabed" au mode "building the formation" pour reprendre la mission et éviter son interruption.

Après la définition des états, des événements et des actions, nous avons choisi que dans les deux états 1 et 2 les actions 1,2 et 3 d'une part et 4,5,6 et 7 d'autre part seront exécutées d'une façon séquentielle. Ainsi la transition entre ces actions pourrait être assurée par une machine à états finis. Notre système est alors géré par une machine à états finis hiérarchique ou globale qui assure la transition d'un mode de coordination à un autre. Deux autres machines relatives à chacun des états afin assurera l'enchaînement des actions dans ces derniers. Cependant si par exemple, l'action 1 n'aboutit pas au résultat voulu, le système sera bloqué dans le premier état et un modèle plus compliqué avec une machine à états finis hiérarchique pourrait être utile afin de sortir du blocage. Celle-ci permettra d'ajouter un élément

perturbateur, afin de changer la disposition initiale des robots à leur mise à l'eau pour que l'action 1 puisse aboutir au résultat espéré et ainsi résoudre le problème du blocage.

2.4 Mise en formation en mode essaim

2.4.1 Choix de la formation géométrique

La tâche coopérative peut être considérée comme l'objectif à atteindre par le système multi-robots. Cet objectif change selon l'application désirée ou le type de robot utilisé. La mise en formation géométrique est un cas particulier de coopération. Au cours d'un déplacement en formation, les robots conservent une géométrie bien particulière et assurent la coordination spatiale et temporelle afin d'atteindre un but commun en termes de position à atteindre ou de trajectoire à réaliser. Le maintien en formation au cours d'une mission permet aux robots de dépasser certaines contraintes (évitement d'obstacle, partage de ressources, communication) liées généralement aux performances des robots ou aux caractéristiques du milieu d'évolution. Il existe plusieurs types de formation géométrique lorsqu'on veut coordonner plusieurs robots. On peut citer à titre d'exemple la formation en ligne droite, en colonne, en triangle, en S ou sous forme moléculaire.

Dans le contexte de la mise en formation d'un système multi-robots, les chercheurs partagent la même source d'inspiration qui est la nature et plus précisément le comportement de certaines espèces animales organisées en société comme le cas des fourmis [JHR04], des abeilles [JHR04], des poissons [PMW82] et des oiseaux [TZ13]. On peut citer à titre d'exemple les travaux de Blach et Hybinette [BH00b] sur les robots terrestres. Ils ont utilisé plusieurs configurations géométriques de SMR pour l'évitement d'obstacle. Tantôt ils se sont inspirés de la géométrie des molécules de cristal et tantôt du comportement des fourmis en utilisant la formation en colonne. En revanche, en absence d'obstacle, le déplacement se fait en mettant les robots en ligne droite comme dans le cas de vol de certain type d'oiseaux.

Dans les travaux d'Okamoto [OFEW04], ce dernier propose un algorithme de positionnement pour plusieurs véhicules sous-marins en référence à un véhicule Leader pour former une ligne droite. Les véhicules suiveurs (Followers) maintiennent une distance et une orientation spécifiques par rapport aux véhicules voisins dans une trajectoire en râteau, dans le but de rechercher des mines placées aléatoirement. La formation en ligne droite a prouvé sa supériorité en termes de surface couverte et de temps passé par rapport à un seul véhicule.

Dans les travaux de Li Xiang, Muhammet Fikret Ercan et Yu-Fai Fung[LEF09] les formations en triangle et en ligne ont été implémentées (triangular formation algorithm) sur un groupe de robots terrestres pour l'exploration de l'environnement de travail ainsi que pour l'évitement d'obstacle.

La mise en formation triangle est l'une des formations qui a intéressé les chercheurs, elle est très utile dans les milieux où la communication entre éléments du groupe est difficile (milieu marin ou aérien). Elle a eu une large utilisation sur les différents types de robots (terrestres, sous- marins et aériens).

Pourquoi la navigation en formation triangle ?

Il n'a échappé à personne, que lors de leur migration, les groupes d'oiseaux migrateurs se déplacent le plus généralement en respectant une forme géométrique en triangle (en V). Leur objectif étant de parcourir des distances incroyablement longues, parfois uniquement sur leurs réserves énergétiques, cette configuration vise à améliorer leurs performances en terme d'endurance. Il y a deux raisons pouvant expliquer pourquoi les oiseaux volent dans une formation en V : cela rend le vol plus facile, ou bien ils suivent simplement le chef.

Une étude expérimentale a été menée en Autriche. Un groupe de volontaires dans le cadre du projet de la Waldrappteam (une organisation autrichienne) menée pour réintroduire des ibis chauves du Nord (élevés en captivité) en Europe [PHF⁺14]. Des avions ultra-légers ont été utilisés pour montrer à ces oiseaux la route migratoire de leurs ancêtres de l'Autriche vers l'Italie. Des GPS et des accéléromètres ont été implantés sur 14 jeunes oiseaux en vol. Ils ont pu déterminer la position de vol de chaque oiseau à 30 cm près, et montrer le timing des battements d'ailes de chacun.

Profitant de ces données, une équipe du Royal Veterinary College de l'Université de Londres a pu identifier précisément les interactions entre les individus de la formation et mettre en évidence le mécanisme mis en jeu pour profiter du bon écoulement d'air.

Les études en aérodynamique ont effectivement montré que les perturbations créées par l'oiseau de tête réduisent les efforts à fournir par ceux qui le suivent bénéficiant ainsi des flux d'air les plus favorables. Ce type de configuration leur permet aussi d'avoir un large champ visuel, ce qui les aide à éviter les dangers et à changer de chemin en cas de nécessité.

Dans la pratique, les pilotes militaires ont utilisé depuis longtemps ce principe pour effectuer des patrouilles. Le vol en formation triangle serré permet de maintenir le contact visuel même à l'intérieur des nuages, les pilotes ne disposent pas d'autres sources d'information sur la position des autres engins que leur vue. Les drones aussi sont soumis à de telles contraintes. La question de la pertinence du vol en formation triangle se pose donc pour des drones.

Dans le cas du milieu sous-marin, nous pouvons citer à titre d'exemple le cas de Martins [MAS03] qui propose de coordonner en formation triangle un système multi robots hétérogènes pour le suivi de grandeur physicochimique (température, salinité). Un système de navigation acoustique intégré et une commande coordonnée pour trois véhicules sous-marins et un bateau de surface sont présents. La formation géométrique consiste en un tétraèdre avec les trois AUVs naviguant à la même profondeur et un bateau positionné au milieu du triangle.

La mise en formation triangle par vision a intéressé un nombre important de roboticiens car elle est pratique dans des tâches comme l'exploration des environnements restreints ou dans le cas d'évitement de danger, ceci en partant d'une architecture hiérarchique [CC04b] ou distribuée [YAB01c].

Méthode générale de mise en formation géométrique.

En général les méthodes de mise en formation en robotique se basent sur deux étapes :

- la première consiste à ce que chaque engin récupère des informations concernant les robots voisins (orientation, distance)
- dans la deuxième, chaque robot se déplace par rapport à ses voisins selon un critère commun entre les éléments du groupe. Ce critère permet de définir la géométrie de la formation désirée.

La durée et l'efficacité de ces étapes dépendent de la source d'information (caméra, capteur infrarouge, capteur ultrason, sonar) qu'utilise les robots pour se localiser au sein du groupe. La communication est un élément essentiel à la mise en formation des robots, cette importance réside dans deux facteurs : le débit communication et le volume d'information à communiquer. La qualité de ces deux paramètres dépend de l'outil de communication (communication acoustique, communication Bluetooth) ainsi que l'environnement d'évolution de la mission et la taille de la meute.

2.4.2 Algorithme de mise en formation en "V" pour un groupe de trois robots

Lors d'une perte de formation ou durant la phase initiale de mise à l'eau, les robots utilisent le mode essaim pour la mise en formation triangulaire. Pour illustrer ce mode, une flotte de 3 robots du type CISCREA est considérée. Le but est de former un triangle équilatéral [CC04b] [YAB01c] en se basant sur la vision comme source d'information, ceci à travers un module de traitement d'images embarqué sur chaque robot. Celui-ci permettra la détection des robots voisins et l'estimation de la distance entre deux robots figurant dans l'image rendue par la caméra du robot. Ainsi, afin de spécifier sa position, il est possible de considérer le robot comme un objet rigide se déplaçant dans un environnement marin avec six degrés de liberté : les trois premiers correspondent à un mouvement de translation tandis que les trois derniers sont ceux de la rotation autour des axes. Au début de la mission, la configuration spatiale de chaque robot est définie par six dimensions : les positions (x_i, y_i, z_i) , les orientations $(\alpha_i, \rho_i, \phi_i)$ distribuées de façon aléatoire obéissant à une

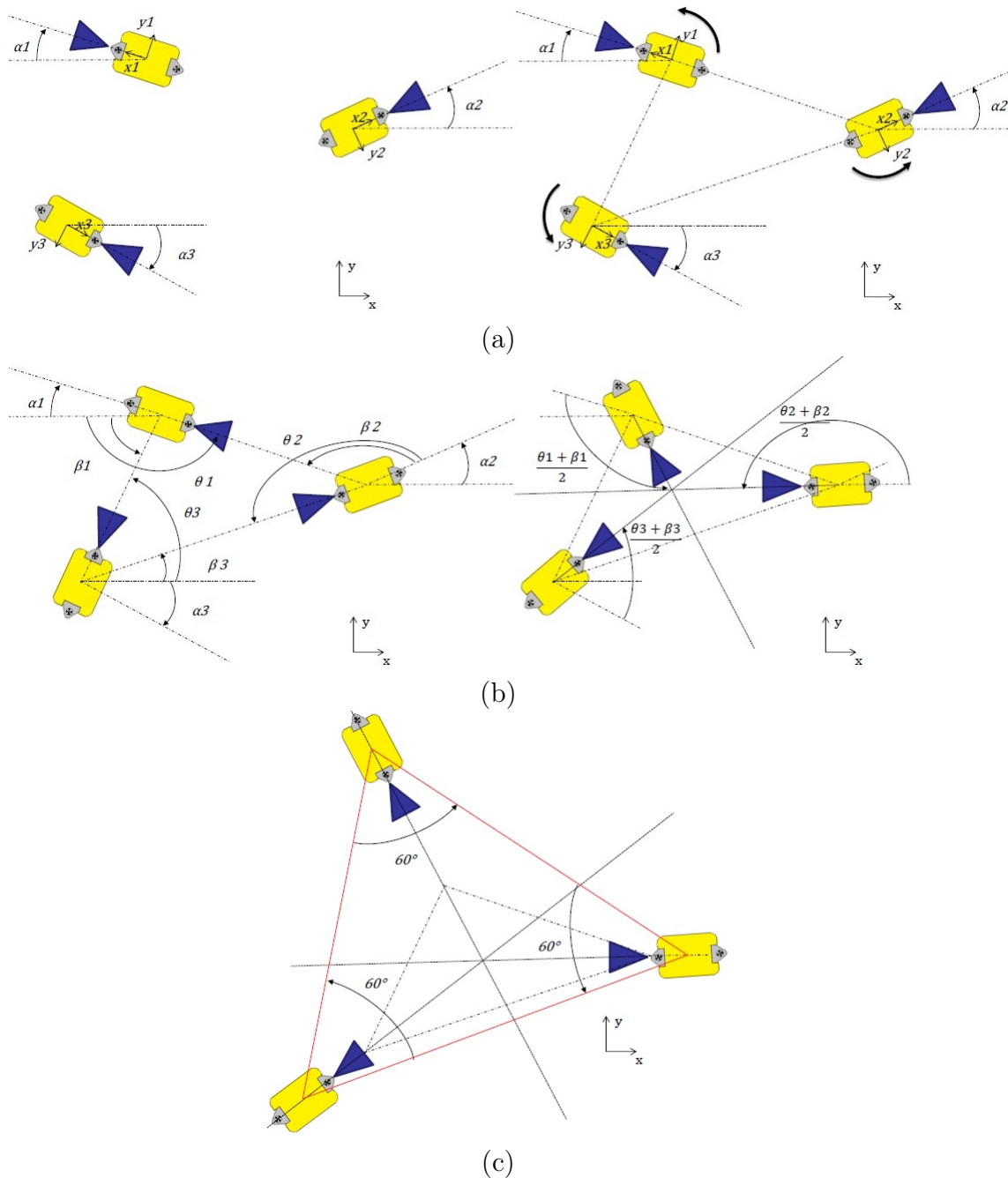


FIGURE 2.3 : Les trois étapes du mode essaim (building the formation mode).

loi normale (voir la figure 2.3(a)). Chaque robot exécute la même procédure de mise en formation qui est constituée de trois étapes.

Première étape

Comme indiqué sur le diagramme de la machine d'état global, le mode essaim commence par une phase de recherche de voisins. Chaque robot est muni d'une

caméra omnidirectionnelle, qui lui permet de détecter la présence des autres entités du groupe. La détection se fait par une simple rotation de 360 degrés à vitesse constante autour de l'axe z. Chaque robot détecté recevra un message de l'entité robotique, qui l'a aperçue. Un robot est considéré comme détecté si son voisin a pu le localiser sur l'axe optique de sa caméra et enregistrer l'angle de rotation correspondant à cet instant. Cette étape s'achève au moment où le robot récupère les deux angles de détection des deux voisins (β_i, θ_i) (voir la figure 2.3(a)). Contrôlé par la machine à état, le robot abandonne automatiquement la première étape pour passer à l'exécution de la deuxième.

Dans le cas contraire, cette étape se déclenche de nouveau comme indiqué sur le diagramme de la machine à états finis embarquée sur le robot, jusqu'à ce qu'il puisse détecter les autres entités du groupe.

Deuxième étape

Durant la deuxième étape, chaque robot essayera d'orienter son cap selon la bissectrice entre les deux angles de détection des deux voisins (β_i, θ_i) enregistrés durant la première étape du mode essaim. Ceci permettra d'aligner l'axe optique de la caméra avec l'axe de la bissectrice entre ces deux angles (voir la figure 2.3(b)). L'angle du cap désiré est calculé ainsi :

$$heading = \begin{cases} (\beta_i - \theta_i)/2 + \min(\beta_i, \theta_i), & \text{if } \gamma_i \leq \Pi \\ (\beta_i - \theta_i)/2 + \max(\beta_i, \theta_i), & \text{if } \gamma_i \geq \Pi \end{cases} \quad (2.1)$$

avec

$$\gamma_i = |\theta_i - \beta_i| \in [0, 2\Pi] \quad (2.2)$$

Dès que le robot arrive à s'orienter selon le cap calculé ci-dessus, la machine à état fini autorise le robot à abandonner automatiquement la réalisation de la première étape pour passer à l'exécution de la troisième étape.

Troisième étape

Dans cette étape, le robot essaiera d'augmenter ou de diminuer son champ vision par une translation selon l'orientation calculée dans la deuxième étape. Le sens de cette translation dépend de la position des autres robots sur l'image rendue de la caméra de celui-ci (voir les figures 2.3(c) et 2.4).

Si le robot n'identifie qu'un seul ou aucun de ses voisins, il se mettra à reculer afin d'élargir son champ de vision jusqu'à ce que ses deux voisins apparaissent sur l'image. Ce mouvement de recul est limité par un délai seuil pour éviter l'échec de mise en formation. En l'atteignant, la machine à état fini déclenchera la recherche des robots voisins de nouveau, ce qui signifie le passage à la première étape.

Si le robot identifie ces deux voisins sur l'image rendue, celui-ci reculera ou avancera à l'aide d'un régulateur PID afin de garder une distance d^* correspondante à 60 degrés entre les deux voisins sur l'image (voir la figure 2.4).

$$E = d(t) - d^* = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (2.3)$$

$$U(t) = K_p \cdot E(t) + K_d \cdot \frac{dE(t)}{dt} + K_i \cdot \int E(t) dt \quad (2.4)$$

avec K_p , K_d et K_i sont respectivement les gain proportionnel, dérivé et intégrateur déterminés de manière expérimentale. $d(t)$ étant la distance entre les deux robots voisins de coordonnées (x_1, y_1) et (x_2, y_2) sur l'image avec $U(t)$ la consigne à envoyer aux moteurs du robot E l'erreur entre la distance actuelle et la distance désirée d^* .

2.4.3 Généralisation de l'algorithme de mise en formation à $2n+1$ robots

Afin de généraliser cette procédure, la flotte de robot sous-marins a été élargie de trois à cinq entités. Cela signifie que la topologie de la mise en formation va évoluer de la formation en triangle à la formation en "V".

En se basant sur les travaux de Lee et Chong [LC09b], la coordination de l'équipe pour la mise en formation en "V" exige l'addition de deux étapes supplémentaires dans le mécanisme de fonctionnement du mode essaim. La première consiste à

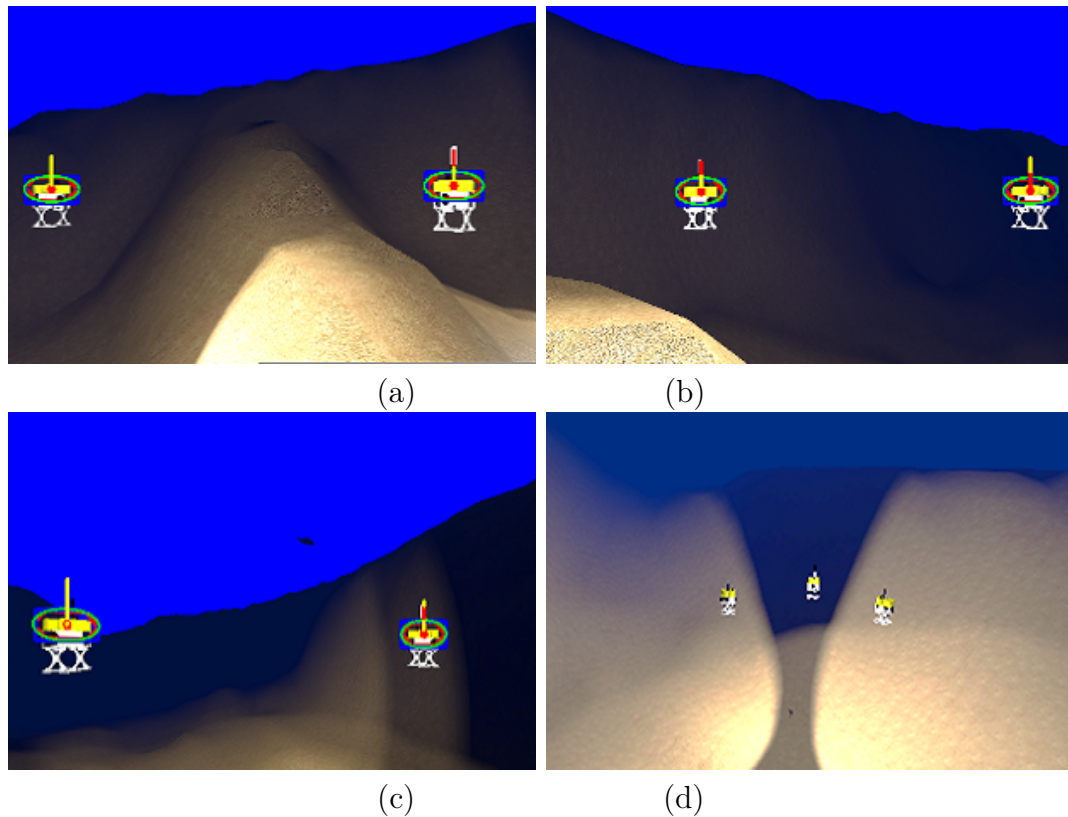


FIGURE 2.4 : Les rendus des caméras de chacun des robots du groupe à la fin de la mise en formation géométrique. (a) la camera du premier robot, (b) la camera du deuxième robot, (c) la camera du troisième robot, (d) vue extérieure des 3 robots à la fin de la mise en formation en triangle équilatéral résultant de la coordination en mode essaim.

établir un système de coordonnées locales pour le groupe et la seconde a comme but d'attribuer un identifiant noté (ID) pour chaque robot. Ces deux étapes seront appliquées directement après l'étape de recherche du voisin "search neighbours" et avant l'étape d'alignement du cap "align heading".

– Phase de recherche de voisin

Dès sa mise à l'eau, le robot cherchera ses voisins et enregistrera les angles de détection de chacun ainsi que la distance approximative qui le sépare de chacun d'eux par voie acoustique (voir la figure 2.5(a)). Ceci lui permettra de calculer les coordonnées de chaque robot voisin dans le repère lié à celui-ci noté lx_i et ly_i . Ils sont exprimés sous cette forme :

$$\begin{cases} lx_i = d_i \cdot \cos(\beta_i) \\ ly_i = d_i \cdot \sin(\beta_i) \end{cases}$$

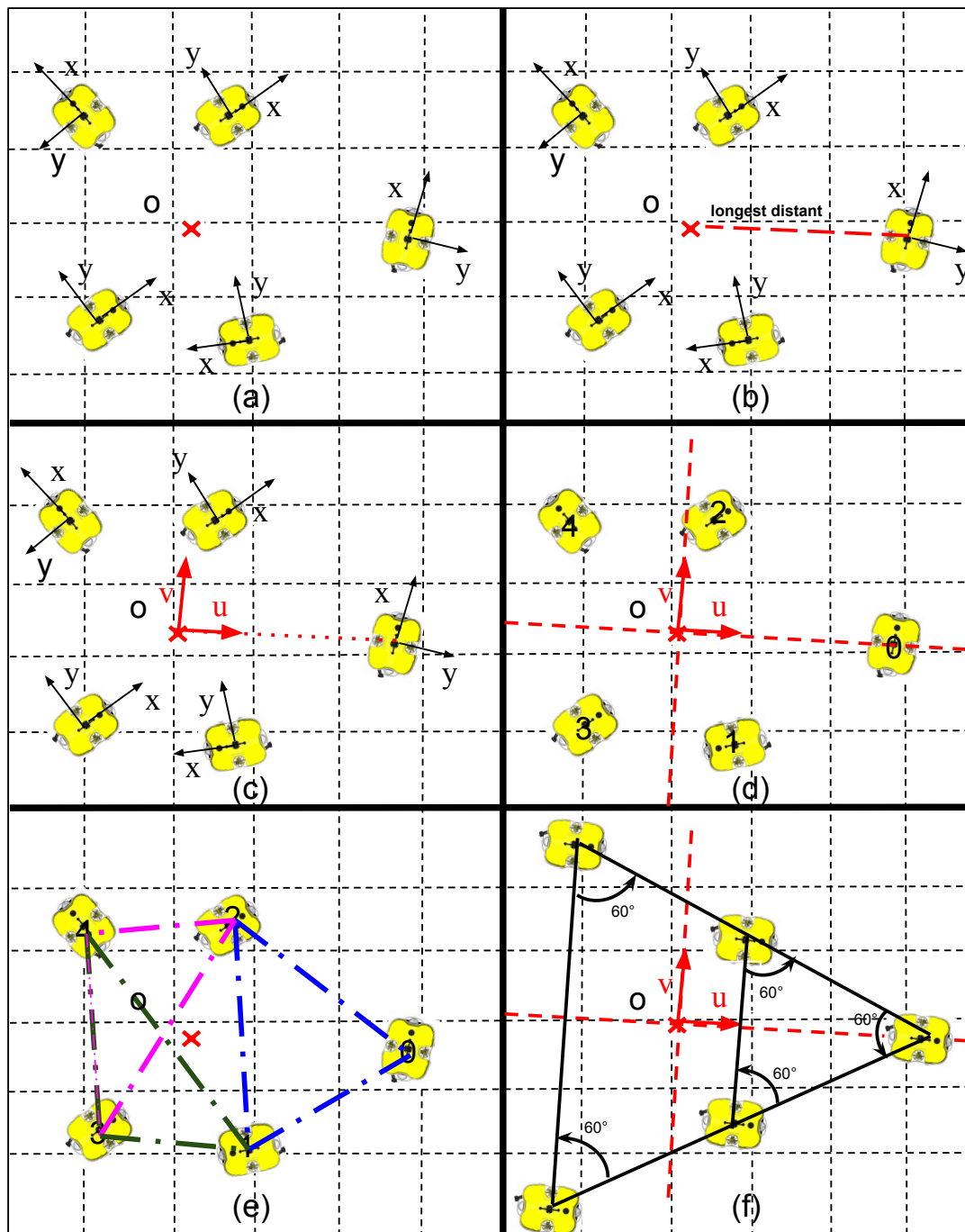


FIGURE 2.5 : Les étapes de la mise en formation géométrique en mode essaim ("building the formation" mode) pour une flottille de cinq robots, (a) phase de recherche de voisins, (b) détermination du centre de la formation, (c) définition du système de coordonnées locale à la formation, (d) allocation des IDs, (e) la mise en formation avec les voisins potentiels, (f) formation en V stable

avec d_i la distance séparant une entité d'un robot i qui sera déterminée par voie acoustique et β_i l'angle de détection du robot i par vision (voir la figure 2.6). Ensuite le robot les communiquera à tous les membres du groupe.

– Phase de définition d un système de coordonnées locales

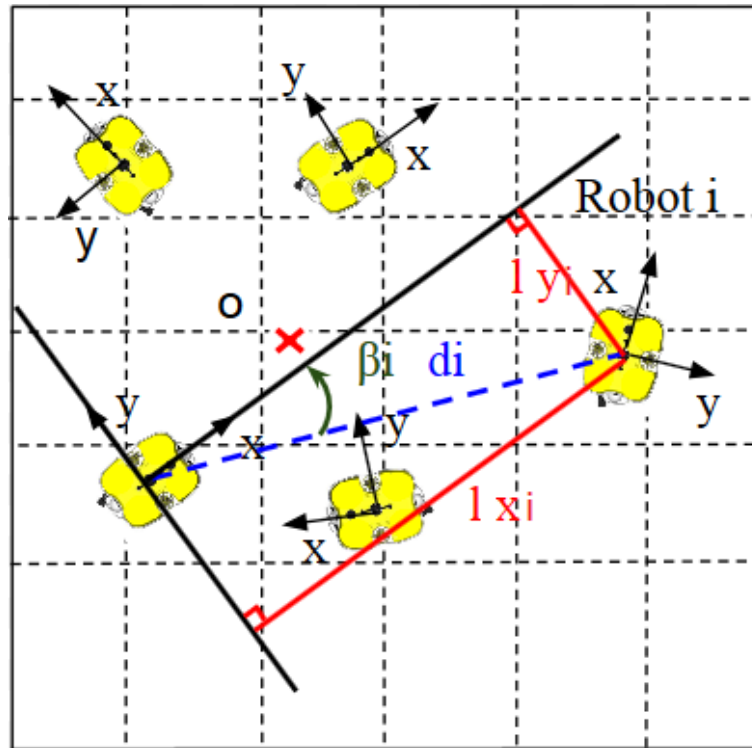


FIGURE 2.6 : Le calcul des paramètres lx_i , ly_i et d_i par rapport à un robot i du groupe

Par suite, les robots entament la phase de définition d'un nouveau système de coordonnées locales à la formation ce qui signifie la définition de l'origine et du vecteur directeur relatif à celui-ci.

L'origine de ce système est le centroïde des coordonnées de la formation (voir la figure 2.5(a)). Pour se localiser par rapport à celui-ci, chaque robot calcule les paramètres Lx_i et Ly_i définis ainsi :

$$\begin{cases} Lx_i = \frac{\sum_{i=1}^n lx_i}{n} \\ Ly_i = \frac{\sum_{i=1}^n ly_i}{n} \end{cases}$$

Afin que chaque entité puisse se localiser par rapport au centroïde, nous définissons alors do_i comme étant la distance séparant le centre du robot i du centroïde O sous cette forme : $do_i = \sqrt{Lx_i^2 + Ly_i^2}$.

On peut définir alors do , $Lx_{farthest}$ et $Ly_{farthest}$ avec do la distance qui sépare le robot le plus éloigné du centroïde et $(Lx_{farthest}, Ly_{farthest})$ le couple de paramètres relatifs à celui-ci.

L'axe des abscisses de ce repère est défini par le vecteur directeur \vec{u} de la droite liant le point origine au centre du robot le plus distant de celui-ci (voir la figure 2.5(b)). Le vecteur \vec{v} sera défini par une rotation de 90 degrés dans le sens trigonométrique (voir la figure 2.5(c)). Ainsi le système de coordonnées locales (O, \vec{u}, \vec{v}) est bien défini. Les coordonnées des robots dans le nouveau repère seront calculées ainsi

$$\begin{cases} u_i = do_i \cdot \cos(\text{angle}_i) \\ v_i = do_i \cdot \sin(\text{angle}_i) \\ \text{angle}_i = \text{atan2}\left(\frac{-Lx_i}{-Ly_i}\right) - \text{atan2}\left(\frac{-Lx_{farthest}}{-Ly_{farthest}}\right) \end{cases}$$

– Phase d'allocation des identifiants

En utilisant leurs coordonnées dans le repère (O, \vec{u}, \vec{v}) , des identifiants notés IDs seront attribués à chacun des membres du groupe en fonction de leurs distances par rapport au centre de gravité de l'équipe. Le plus éloigné du centre reçoit un ID égal à 0. Les IDs des autres robots sont affectés par ordre croissant en fonction de leur abscisse dans le repère (O, \vec{u}, \vec{v}) .

Plus précisément, les robots ayant des ordonnées négatives auront des IDs impaires et ceux qui ont des ordonnées positives auront des IDs paires, jusqu'à ce que l'allocation des IDs soit terminée dans les deux demi-plans (voir la figure 2.5(d)).

A partir de ce moment chaque robot pourra connaître ses 2 voisins potentiels avec lesquels il formera un triangle. Si l'ID du robot est pair, ses voisins seront les robots ayant comme identifiants ID-1 et ID-2. Par contre si son ID est impaire ses voisins potentiels seront ceux ayant les identifiants ID+1 et ID-1 (voir la figure 2.5(e)).

Connaissant ces deux voisins potentiels, chaque robot appliquera la procédure de mise en formation triangle définie dans l'exemple d'une flotte de trois robots pour voir ses deux voisins distants d'un angle équivalent à 60 degrés. Les robots achèveront ainsi la formation en "V" (voir la figure 2.5(f)). Ceci veut dire que "l'événement C1" est satisfait. Le passage du mode essaim au mode hiérarchique est alors séquencé par la machine à états finis, installée sur chaque robot.

2.5 Maintien de la formation en mode hiérarchique

2.5.1 Principe de fonctionnement du mode hiérarchique (exemple un essaim de 3 robots)

Dès que la formation géométrique en "V" est stable, le groupe passe en mode hiérarchique ou un robot maître guidera les autres pour l'acquisition vidéo systématique des fonds marins. La trajectoire des robots est contrôlée par un asservissement visuel, dont les consignes peuvent être locales ou distantes en fonction du mode de coordination. Ce mode de fonctionnement commence tout d'abord par l'élection d'un leader pour le groupe, ensuite ces derniers s'aligneront suivant un cap de navigation communiqué par le leader à toutes les unités du groupe avant d'entamer la phase de navigation vers une cible. Ceci se fait par une technique d'asservissement visuel que nous expliquerons dans le chapitre 3.

2.5.2 La désignation d'un leader

Sachant la position de la cible dans le milieu marin, les robots choisissent un robot leader selon la distance qui le sépare de la cible. Les robots s'échangent entre eux cette distance pour pouvoir prendre le choix du superviseur. Le robot le plus distant de la cible sera désigné comme maître du groupe. Celui-ci aura pour rôle de gérer le groupe dans les prochaines étapes du mode hiérarchique.

2.5.3 L'alignement du cap suivant la direction de navigation

Cette étape a pour but de préparer la phase de navigation en groupe. Après son élection, le robot maître communique la direction de navigation à tous les robots suiveurs qui essayeront, en utilisant un régulateur de cap de type PID, de se mettre dans la bonne direction. Dès que cette action est satisfaite, la navigation en groupe commence. À la fin de l'étape d'alignement de cap, le robot maître aura les robots suiveurs dans son champ de vision. Ils sont prêts à être contrôlés par celui-ci (voir la figure 2.7).

$$E = \text{atan2}(\text{cap}(t) - \text{cap}^*) \quad (2.5)$$

$$U(t) = K_p \cdot E(t) + K_d \cdot \frac{dE(t)}{dt} + K_i \cdot \int E(t) dt \quad (2.6)$$

avec K_p , K_d et K_i sont respectivement les gain proportionnel, dérivé et intégrateur déterminés de manière expérimentale. $\text{Cap}(t)$ étant le cap actuel d'un robot et cap^* le cap désiré avec $U(t)$ la consigne à envoyer aux moteurs du robot afin d'annuler l'erreur E .

2.5.4 La navigation en groupe par asservissement visuel

Dans cette étape, les robots suiveurs recevront les consignes de déplacement calculées par le maître par asservissement visuel. En se basant sur son algorithme de traitement d'images sous-marines, le robot maître essaiera de garder les robots suiveurs dans son champ de vision dans des positions bien précises de l'image, tout ceci en leur envoyant les bonnes consignes de contrôle définies par son unité de calcul (voir la figure 2.8).

Pour réussir cette mission, le robot maître devra gérer le groupe en tenant compte de certaines conditions à satisfaire au cours de la navigation. Il doit assurer :

- Le maintien de la formation géométrique du groupe.

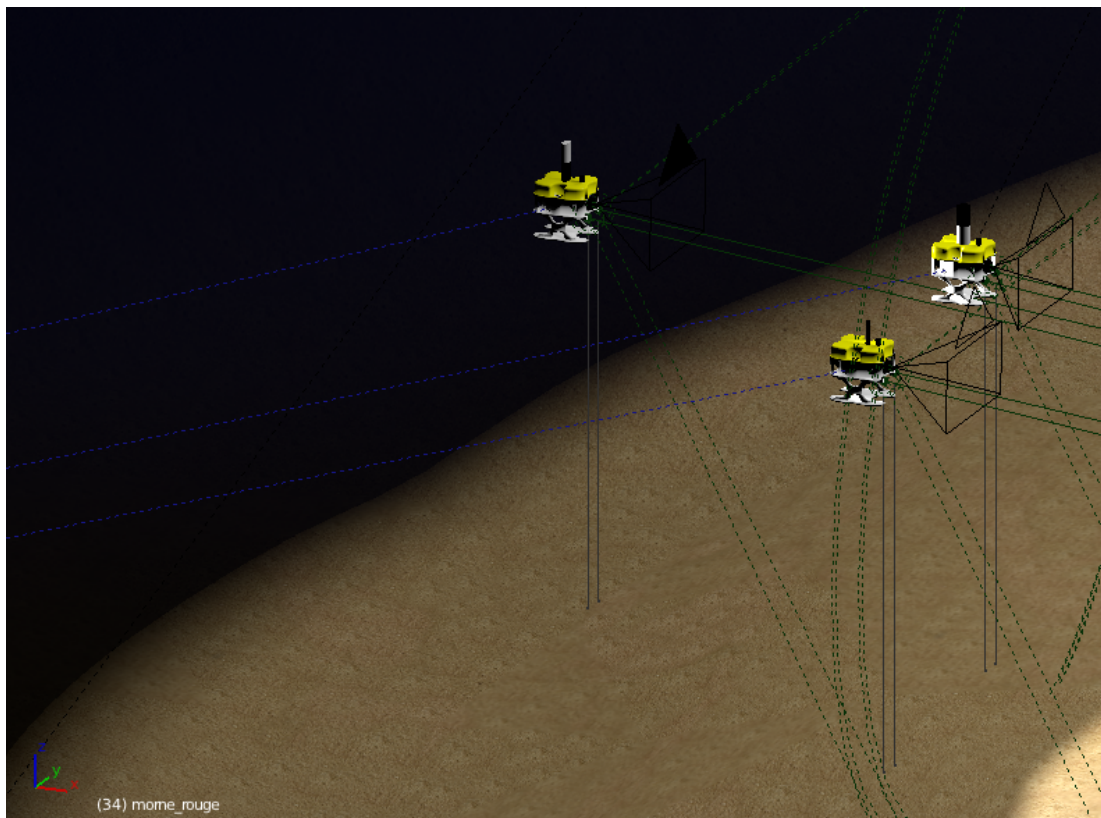


FIGURE 2.7 : La disposition géométrique des robots au début de la phase d'acquisition vidéo (mode hiérarchique)

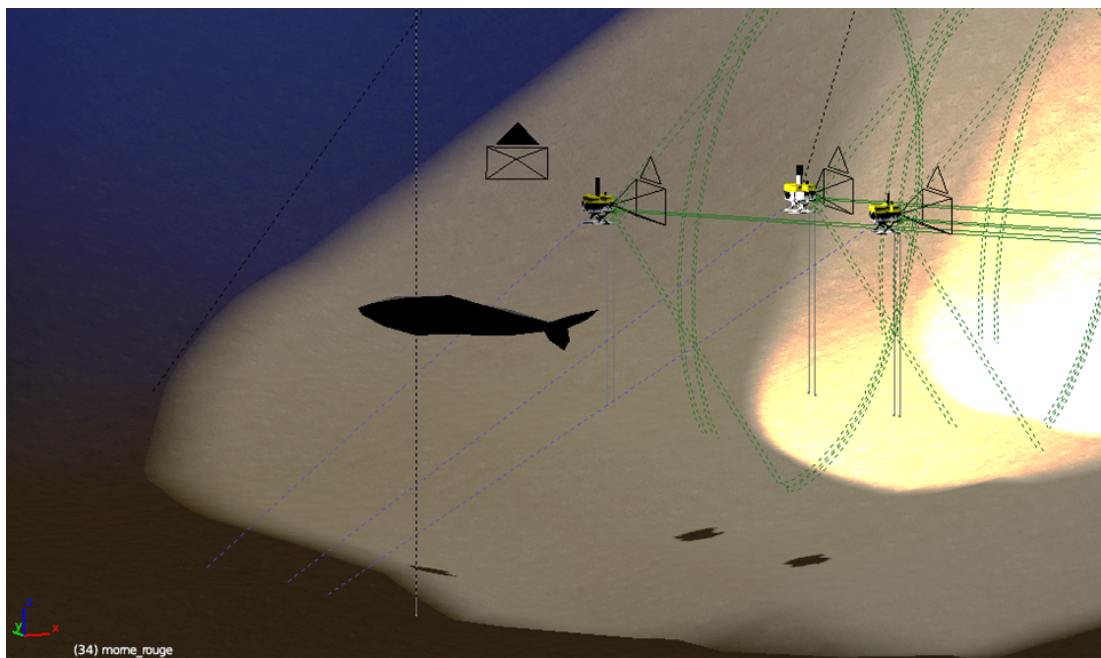


FIGURE 2.8 : Vue d'une meute de trois robots naviguant en formation pour une mission acquisition video

- Le respect d’une distance minimale entre les robots suiveurs pour éviter la collision.
- Le suivi d’un trajet optimal vers la cible recherchée dans le but de guider les suiveurs à une position (orientation, distance) qui leur permet d’extraire les attributs de la cible (respect des conditions de la vision par stéréo) (voir la figure 2.9(a)(b)).
- La définition des consignes de contrôle des robots suiveurs par vision en tenant compte des contraintes liées au milieu marin (hydrodynamique) et celles liées à la cinématique et la dynamique des engins, permettant de générer un chemin faisable, de maintenir la flottille dans une formation géométrique triangulaire et de garantir la qualité d’acquisition vidéo des robots capteurs (voir la figure 2.9(a)(b)).

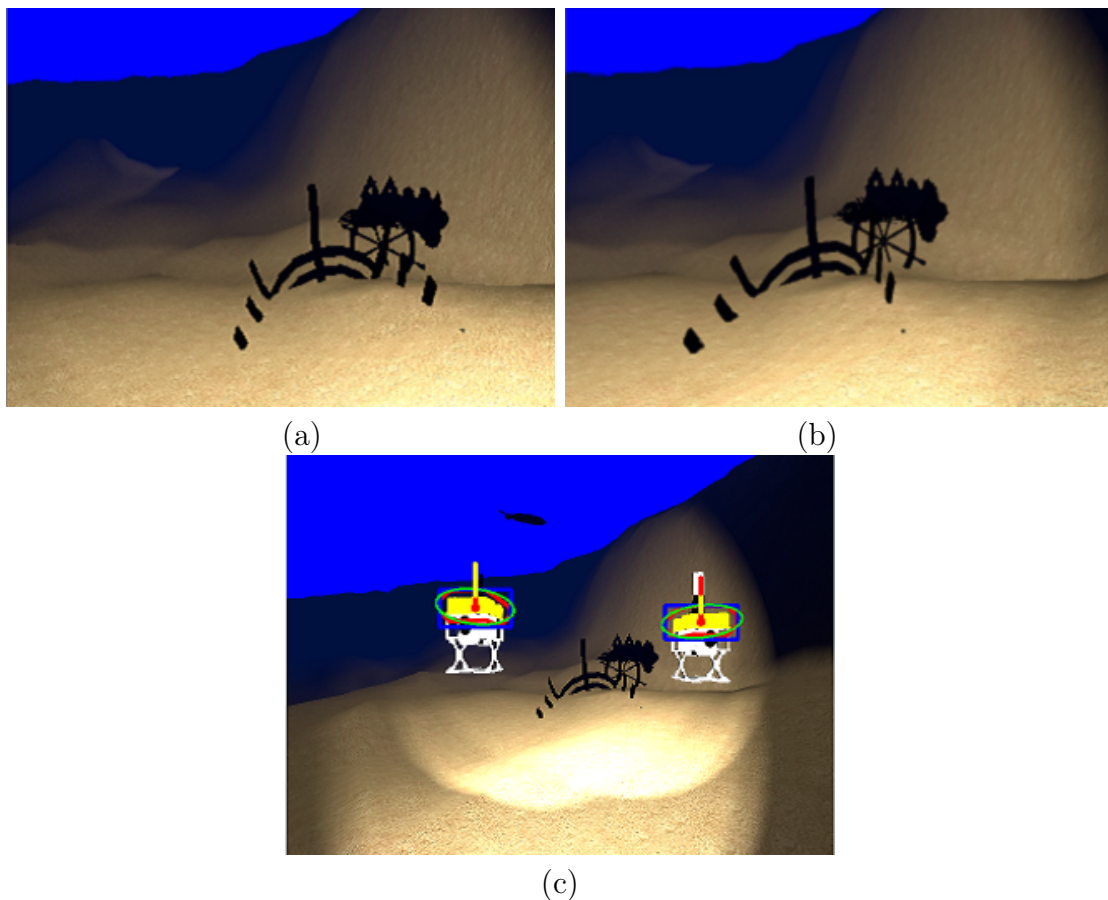


FIGURE 2.9 : construction d’une base stéréo par trois robots en mode hiérarchique.(a) rendue de la caméra du robot suiveur gauche, (b)rendue de la caméra du robot suiveur droite, (c) : traitement de l’image du robot maître afin de déterminer les consignes de trajectoire à envoyer aux robots esclaves.

Pour définir les consignes à envoyer, le robot maitre calculera la position en pixel des robots suiveurs dans l'image. Ensuite, il règle l'erreur de ces positions par rapport aux positions désirées à travers un correcteur PID, ce qui définira les mouvements d'immersion et d'embarquée. Pendant la navigation, la vitesse d'avancement du robot maitre est constante. Pour définir celle des robots suiveurs, celui-ci se base sur le calcul de leur surface dans l'image pour estimer la distance qui les sépare de lui (voir la figure 2.9(c)). Le but est de conserver une distance de séparation entre le maitre et les suiveurs qui permet de garder la formation géométrique du groupe. Ainsi, le robot maitre calcule l'erreur entre la surface du robot suiveur et la surface correspondante à la distance de séparation voulue. Il utilisera un régulateur PID pour définir la consigne d'avancement nécessaire dans le but d'annuler cette erreur (voir la figure 2.9(c)).

2.5.5 Généralisation du mode hiérarchique

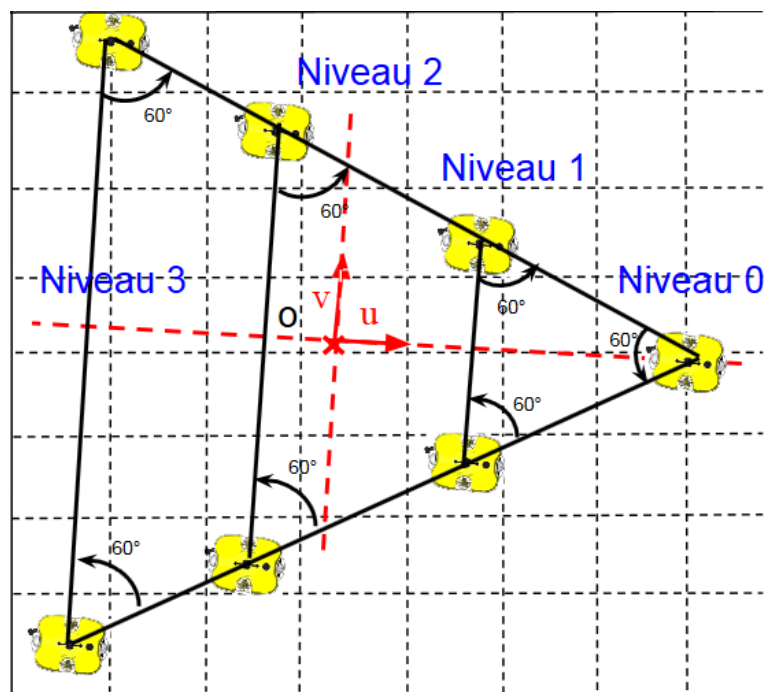


FIGURE 2.10 : Vue d'une meute de sept robots naviguant en formation en mode hiérarchique

En passant d'une formation triangle en 'V', des niveaux hiérarchiques sont définis selon les abscisses u_i des robots dans la formation 2.10. Les robots du niveau

hiérarchique n seront commandés visuellement par ceux du niveau $n-1$. Par exemple le robot d'identification 1 contrôlera visuellement celui ayant un ID égal à 3 et celui d'ID 3 sera responsable de guider par vision le robot d'ID 5 et ainsi de suite jusqu'au rang n . Cela signifie qu'à part le robot superviseur et les robots de niveau hiérarchique n , le reste des entités sont à la fois des sous maîtres et des suiveurs.

2.10. Ceci fait qu'en cas de perte d'une unité du groupe, un robot ne recevra plus de consigne. En absence de consigne dépassant un délai seuil, celui-ci annonce au groupe la perte de son maître ou sous maître. Ce qui permet de déclencher le mode essaim pour tous les robots afin de récupérer ce robot perdu et de poursuivre la mission.

2.6 Communication

Dans les deux modes de coordination, la communication représente un élément crucial dans la réalisation de la formation géométrique ou dans l'acquisition des données optiques. Cette importance vient du fait que d'une part les informations communiquées entre les entités robotiques seront utilisées par la machine à états finis implémentée sur chacun d'eux ce qui permettra le bon enchaînement des actions dans chaque état. D'autre part ce partage de données au sein du groupe est très important dans la détection d'un nouvel événement perturbateur agissant sur le déroulement de la mission pour que le groupe utilise le mode de coordination approprié afin de ne pas devoir arrêter la mission mais plutôt à éviter ses effets et la poursuivre. On commence tout d'abord par le cas d'un groupe de 3 robots, dans le mode essaim, les informations communiquées entre les robots sont :

- Dans l'action 3 : chaque robot communique à ses voisins l'information qui indique s'il arrive à percevoir ses deux voisins dans l'image de la caméra avec une distance qui les sépare équivalente à 60 degrés. Ceci en partageant une variable booléenne γ_i mise à 1 lorsque cette distance est sous un taux d'erreur seuil et à 0 dans le cas contraire. Lorsque γ_1, γ_2 et γ_3 sont à 1 le passage de l'état 1 à l'état 2 est permis.

- Dans l'action 3 : lorsqu'un robot i n'identifie plus ses deux voisins par vision pendant un délai seuil, il communique au reste du groupe une variable $per_t e_i$ qui indique que la procédure de mise en formation a échoué et qui oblige toutes les entités robotiques à passer de l'action 3 à l'action 1.

Dans le mode hiérarchique, les informations communiquées entre les robots sont :

- Dans l'action 4 : chaque robot communique à ses voisins la distance qui le sépare de la cible. Ces derniers seront comparés et ensuite le robot le plus proche sera désigné robot maitre.
- Dans l'action 5 : Le robot maitre communique aux robots suiveurs le cap à prendre pour atteindre la cible. Dès que chaque robot du groupe prend la direction du cap, une variable booléenne cap_{cible} sera partagée entre les entités robotiques indiquant la possibilité de commencer la navigation en formation et par conséquent le passage de l'action 5 à l'action 7 pour les robots suiveurs et un passage de l'action 5 à l'action 6 pour le robot maitre.
- Dans l'action 6 : Le robot maitre communique aux robots suiveurs les consignes moteurs calculées par celui-ci afin qu'ils soient à des positions bien définies dans l'image rendue de celui-ci dans le but de garantir une bonne qualité d'acquisition optique. Il communique aussi au reste du groupe une variable booléenne $per_t e_{communication}$ mise à 1 pour indiquer qu'il a perdu les robots suiveurs de l'image et qu'il ne pourra plus calculer les consignes adéquates à envoyer. Celle-ci permettra de basculer de l'état 2 à l'état 1 pour que le groupe se mette de nouveau en formation géométrique.
- Dans l'action 7, lorsqu'un des robots suiveurs ne reçoit plus de consignes moteurs pendant un délai seuil du robot maitre, ce qui signifie une perte de communication une variable booléenne $per_t e_{consigne}$ mise à 1 est communiquée par celui-ci à toutes les entités du groupe, ce qui permet le passage du mode hiérarchique au mode swarm afin que le groupe se mette en formation de nouveau et puisse reprendre la mission.

Dans le cas d'un groupe à $2n+1$ robots les informations communiquées au sein du groupe restent les mêmes pendant les deux modes de coordination, une seule information sera modifiée, à savoir dans l'action 4. Au lieu de s'échanger la distance des robots par rapport à la cible, les robots vont échanger les Lx_i et Ly_i afin que

chaque robot puisse trouver son identifiant ID, calculer ses coordonnées dans le nouveau référentiel relatif au groupe et désigner le robot maître.

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la stratégie de coordination adoptée dans cette thèse. La particularité de notre stratégie réside dans le fait qu'elle est hybride. En effet, nous avons eu recours dans celle-ci à deux modes de fonctionnement : un mode essaim et un mode hiérarchique. Le premier est responsable de la mise en formation 'V' d'un groupe d'AUVs contrôlé par un algorithme de type swarm. Par contre, le deuxième a pour but d'assurer la navigation du groupe en formation afin d'effectuer des acquisitions vidéo du fond marin. Il se base sur une architecture de coordination hiérarchique. Elle consiste à élire un robot maître qui contrôle le reste des AUVs par vision pour d'une part maintenir la formation en 'V' durant la navigation et d'autre part assurer la qualité des acquisitions vidéo extraites par les robots suiveurs en les positionnant correctement par rapport à une cible potentielle. Notre stratégie de coordination hybride est contrôlée par une machine à états finis. Celle-ci permet d'une part d'affecter le mode de fonctionnement adéquat au groupe selon les circonstances de la mission et d'autre part d'organiser les tâches et d'ordonner les actions dans chacun des modes. Nous avons ensuite détaillé le mécanisme de fonctionnement de la machine à états finis en définissant les états, les transitions et les événements correspondant à notre mission. Enfin, nous avons présenté le principe de fonctionnement du mode essaim ainsi que celui du mode hiérarchique. Cela en utilisant initialement une meute de trois robots sous-marins ensuite en le généralisant sur une meute de n robots. En ajoutant les modifications nécessaires au niveau des étapes d'établissement de la formation en triangle, nous avons pu généraliser celle-ci pour passer de trois à n robots. Par conséquent la topologie du groupe dans ce mode a évolué de la formation triangle à la formation en 'V'. De même, dans le mode hiérarchique, nous avons adapté les conditions de navigation en formation triangle par vision afin qu'elles soient valables pour n robots.

Dans ce qui suit, nous présenterons les algorithmes de traitements d'image développés pour être embarqués sur les AUVs. Puisque la vision est la seule source d'information pour les robots, ces algorithmes visent à extraire des données précises de l'image acquise, afin de les mettre à la disposition de la boucle de contrôle et du processus de prise de décision de chaque robot. Le développement de ces algorithmes nécessite la résolution de divers problèmes liés d'une part à la qualité de l'image sous-marine ou d'autre part à la capacité de calcul des AUVs.

Chapitre 3

Contrôle et commande par vision

Ce chapitre illustre les concepts principaux de traitement d'images sous marines nécessaires pour le contrôle par vision des robots. Il présente le développement d'algorithmes de reconnaissance d'objets en vidéo sous-marine, avec une attention particulière apportée aux robots sous marins. Ces algorithmes seront embarqués sur chacun des robots du groupe pour la détection, la reconnaissance et l'estimation de certains paramètres relatifs aux autres unités du groupe. Des essais expérimentaux ont été effectués pour évaluer l'efficacité de ces algorithmes.

3.1 Introduction

Couvrant environ 70 pour cent de la surface terrestre, le milieu marin reste encore aujourd'hui mal exploité en raison de sa difficile accessibilité pour l'homme. Son exploration et sa caractérisation font l'objet de nombreux travaux de recherche depuis plusieurs années comme l'atteste l'augmentation croissante du nombre d'ouvrages et de publications. La prise de conscience mondiale des problèmes écologiques liés à l'activité humaine a fait que le nombre de ces études augmente d'une façon importante aujourd'hui. L'étude du milieu marin n'est pas simple, elle nécessite le déploiement des grands moyens matériels et théoriques pour la réalisation des avancées technologiques importantes notamment en ce qui concerne

le développement des véhicules sous-marins et en particulier leurs capteurs de perception. Employé depuis près d'un siècle, le capteur sonar est le moyen de sondage privilégié de l'environnement marin, il est le plus utilisé à grande et moyenne distance du fond pour des tâches de détection et de classification. La faible résolution des données fournies par celui-ci rend leur traitement difficile avec un résultat non garanti. S'approcher de la cible sera alors une solution efficace dans ce cas. Dans le contexte sous-marin, et à l'inverse du capteur sonar, la caméra vidéo est efficace à faible portée lors des phases d'approche, de reconnaissance d'objets et d'intervention. En plus l'utilisation de plusieurs caméras dans une mission permettra d'une part une couverture plus large du fond marin et d'autre part un gain au niveau du temps d'exécution des missions d'acquisition optiques du fond marin. En effet, le capteur optique dispose d'atouts notables comme la haute résolution, la facilité d'interprétation et son faible coût. Actuellement, la majorité des robots sous-marins scientifiques, industriels ou militaires en sont équipés. Aujourd'hui, ils sont plutôt autonomes et pilotés par des algorithmes de traitement et de contrôle. Ces algorithmes sont pourtant des technologies essentielles pour les développements émergents des robots autonomes sous-marins très demandés aujourd'hui vu l'expansion des activités liées à la sécurité et à l'exploitation des ressources maritimes.

Considérant la spécificité de notre application qui consiste à la recherche d'objets de petits tailles ou de singularités au fond marin, notre choix s'est porté sur l'utilisation du capteur optique comme source d'information dans cette thèse. L'étude proposée concerne le développement d'algorithmes de traitement d'images nécessaires pour la détection et l'identification des robots de la meute extraire les informations nécessaires de la vidéo sous-marine pour les deux phases de notre stratégie hybride de coordination. Ceci dans le but d'établir la mise en formation géométrique dans le mode essaim ou pour asservir les mouvements des robots suiveurs par un robot maître dans le mode hiérarchique. Ces algorithmes serviront aussi à au traitement des données vidéo acquises du fond marin en temps réel.

Ces travaux de thèse visent à apporter les innovations nécessaires, et à promouvoir l'emploi du capteur vidéo dans le domaine sous-marin.

3.2 Le capteur optique dans le contexte sous marin et les spécificités des images sous marines

Après cette introduction sur la perception, l'acquisition des images et le codage des couleurs, nous allons dans cette partie expliquer quelques notions sur les problèmes relatifs à la perception visuelle en milieu sous-marin.

3.2.1 Vidéos et images sous marines

Dans le milieu sous marin l'atténuation de la lumière atteint un taux élevé. Ceci fait que les ondes infrarouges sont absorbées dès le premier mètre et peu de lumière arrive à atteindre les 100 mètres. L'absorption et la diffusion avec un rôle moins important sont les phénomènes principaux responsables de l'atténuation de la lumière.

Lorsqu'on parle du phénomène d'absorption de la lumière cela veut dire en d'autres termes l'absorption de l'énergie des photons par les constituants l'eau de mer. Les concentrations et la nature de ces constituants décident de la manière dont les différentes longueurs d'onde composant le spectre de la lumière sont absorbées. Ce qui rend l'étude théorique de l'interaction entre la lumière et chacun de ces constituants est très difficile. Cependant, il existe des constituants pour lesquels un effet sur le spectre d'absorption a été maîtrisé expérimentalement. Le premier constituant de l'eau de mer est l'eau pure qui est un milieu très absorbant pour la lumière particulièrement pour les ondes infrarouges. Un deuxième exemple est les substances organiques en suspension. En revanche, la plupart des substances composant le sel marin ont peu d'effet sur l'absorption de la lumière dans l'eau.

En étant le deuxième phénomène responsable de l'atténuation de la lumière dans le domaine sous marin, la diffusion est un phénomène physique que l'on rencontre lorsque des changements aléatoires de la direction des rayons lumineux sont provoqués par des hétérogénéités optiques du milieu. Cela peut-être expliqué par la présence de particules en suspension ou de particules constituées de molécules

d'eau de densités différentes. La nature de la diffusion diffère selon la taille de ces particules. Pour les grosses particules la diffusion est le résultat de la réflexion, la réfraction et la diffraction. Pour les petites particules, l'optique géométrique est incapable d'expliquer la diffusion et dans ce cas, il faut se référer à la théorie des ondes électromagnétiques [Ish91].

3.2.2 Problèmes spécifiques aux images sous marines

Comme on a pu le voir dans la partie précédente, l'eau agit comme un filtre puissant pour la lumière naturelle comme artificielle. Chaque longueur d'onde est absorbée progressivement, commençant par les infrarouges et les ultraviolets, le rouge, le jaune, le vert et enfin le bleu. Du fait de cette disparition sélective, en descendant en profondeur même les objets les plus multicolores paraissent souvent peu colorés alors qu'en réalité la faune et la flore sous-marines présentent souvent des couleurs intenses. L'atténuation de la lumière dans l'eau représente l'un des obstacles majeurs dans le traitement des images sous-marines. Celle-ci limite la visibilité à une distance d'environ vingt mètres en eau claire et à moins de cinq mètres en eau turbide.

Le processus d'atténuation n'est que le résultat des phénomènes d'absorption et de diffusion qui sont causés respectivement par les différents constituants de l'eau et les différentes matières organiques dissoutes ou particules en suspension. Pour éviter sa dégradation et la perte de l'information utile, l'imagerie sous-marine doit faire face à de complexes problèmes engendrés par les deux phénomènes cités.

Pour éviter l'atténuation rapide de la lumière, les systèmes d'acquisition vidéos ou images sous marines sont munis d'un éclairage artificiel qui est souvent non uniforme, ce qui crée un effet de spot. Celui-ci fait que l'éclairage soit plus important au centre de l'image que sur les bords. En plus, la prise d'images ou de vidéos sous marines ne se fait pas généralement à partir d'un support stable. Les caméras sont souvent embarquées sur des véhicules sous marines. Ceci fait que la distance séparant la caméra de la scène est variable ce qui produit une dominante de

couleur bleue ou verte car les longueurs d'onde correspondant aux rouges sont très rapidement absorbés.

D'autres effets indésirables sont provoqués par l'atténuation de la lumière et surtout majoritairement par le phénomène de diffusion. Ce dernier est caractérisé par une composante de diffusion directe et une composante de radiodiffusion. Elles sont respectivement responsables de flouter l'image et de rendre l'éclairage sur celle-ci non uniforme.

Le phénomène d'absorption contribue aussi à la l'atténuation de la lumière sous l'eau à travers les particules en suspension très variables en type et en concentration ce qui engendre la dégradation des contours, la modification des couleurs et la production des artefacts lumineux. Tous ces problèmes liés à l'imagerie sous-marine font que les images acquises sont souvent très bruitées (voir la figure 3.1).



FIGURE 3.1 : Exemple d'images sous marines. [Baz08]

Pour résumer les images sous marines souffrent des problèmes suivants :

- Visibilité limitée
- Éclairage non uniforme [GNC02]
- Contrastes faibles
- Couleurs atténuées à dominante bleutée
- Bruit important

Plusieurs méthodes de correction pour les problèmes précédemment indiqués existent, on peut notamment citer les travaux suivants [ABMK05][SK04].

3.3 La détection et la reconnaissance d'objets par vision dans le domaine sous marins

L'exploration des fonds marins est une activité en développement. Aujourd'hui, le moyen de référence pour cela est le capteur acoustique de type sonar. En effet, il est utilisé depuis près d'un siècle, alors que l'emploi des capteurs optiques n'a débuté que depuis une dizaine d'années [KC05] à cause de la faible qualité d'image (problèmes d'éclairage, de turbidité et de bruit important) et de la complexité des traitements. Les algorithmes de traitement affrontent des limitations liées aux véhicules autonomes comme le stockage physique, l'énergie, la capacité de calcul.

3.3.1 Du sonar au caméra

L'emploi tardif de la vision comme source d'information dans le milieu sous-marin revient principalement à l'efficacité du sonar (SOund Navigation And Ranging) qui profite des propriétés très favorables de la propagation du son dans l'eau pour :

- Détecter et localiser des objets [RPB03].
- Cartographier le fond des océans.
- Mesurer la profondeur.
- Aider à la navigation [PRL01].

On entend par objets : des navires, des sous-marins, des mines, des pipelines ou des bancs de poissons.

Généralement, l'efficacité d'une tâche de reconnaissance d'objets sous-marins dépend essentiellement du capteur utilisé et de la qualité d'information fournie par celui-ci. Plus efficace à grand distance du fond et possédant une longue portée, les capteurs acoustiques sont les plus utilisés pour la détection et la classification à

grand et moyenne profondeur. Un des inconvénients majeurs de l'emploi du sonar est la faible résolution des données fournies ce qui rend l'identification des objets relativement difficile. Ainsi, une phase d'approche sera demandée.

Dans ce cas, les capteurs optiques seront plus appropriés vue leur efficacité à courte portée pour la recherche et la reconnaissance d'objets de petits tailles ou des singularités sur le fond. Répondu par leur faible cout, les images fournies par ce type de capteurs sont d'une part plus facile à interpréter et d'autre part se caractérisent par leur haute résolution. Ces avantages rendent l'utilisation de la vidéo sous marine une solution très rentable. Disposant aujourd'hui des capacités informatiques nécessaires à l'exploitation de celle-ci, l'utilisation de la vidéo sous marin est de plus en plus courante. Considérant la spécificité de notre application qui consiste à la recherche d'objets de petits tailles ou de singularités au fond marin, notre choix s'est porté sur l'utilisation du capteur optique comme source d'information dans cette thèse.

3.3.2 Les contraintes et les avantages liées à l'utilisation du capteur optique pour les robots sous marins

Pour bénéficier des avantages de l'utilisation du capteur optique dans l'environnement sous marins, il faut faire l'inventaire des problèmes qu'on peut rencontrer afin de trouver les solutions techniques nécessaires permettant leur résolution. L'utilisation des capteurs optique affronte deux types de contraintes : les contraintes liées à l'environnement et celles liés à l'utilisation des véhicules sous marines.

Contraintes liées à l'environnement

- Une faible portée visuelle.
- Un éclairage variable (artificiel ou naturel).
- Une turbidité plus ou moins importante parfois aggravée par le passage d'un véhicule sous marin à proximité du fond.
- Une atténuation des couleurs avec une nuance bleutée sur l'image à part la teinte bleu-vert naturelle causée par le milieu).
- Les effets de «lentilles» dus à la transition entre les différents indices des milieux.

- L’instabilité des séquences causée par la dynamique du robot ou sous l’effet du courant sous-marin).

Contraintes liées à l’utilisation des véhicules sous marins

- Une limitation au niveau de l’espace de stockage.
- Une faible puissance de calcul.

Pour affronter ses contraintes et résoudre les problèmes techniques résultants, notre travail vise à développer des algorithmes génériques permettant d’une part de pré-traiter les images pour les rendre exploitable et d’autre part d’en extraire les informations utiles. Ces algorithmes doivent être rapides voire temps réel pour obtenir des résultats satisfaisants. Dans le cas le plus courant les capteurs optiques utilisés sont les caméras conventionnelles. On peut ensuite choisir d’utiliser une ou plusieurs caméras. Dans notre travail, on est dans le cas d’utiliser plusieurs vue qu’on emploie un groupe de robots. Étant une projection sur un plan de la scène tridimensionnelle, l’utilisation d’une seule image prise par une camera conduit à la perte de la composante de profondeur et par conséquent une faiblesse dans la reconnaissance d’objets. Pour retrouver la composante de profondeur il faut disposer au moins de deux images d’une même scène prises de points de vue différents en connaissant parfaitement la transformation géométrique permettant le passage d’un point de vue à l’autre. D’où l’intérêt d’utiliser un groupe de robot avec une caméra embarqué sur chaque unité. On aura alors le choix d’avoir accès aux informations 3D de la scène comme dans le cas d’une base stéréoscopique [HM95] ou de se contenter des informations 2D.

3.4 Méthodes et algorithmes de vision utilisés en robotique sous marine

3.4.1 Le rôle de la vision dans la robotique mobile

Caractérisant la majorité des espèces vivantes, la perception de l’environnement représente une des facultés principale sur laquelle se base le processus de prise

de décision. Dans le domaine de la robotique mobile, les outils de perception sont essentiellement les capteurs et les traitements associés. Selon la qualité de l'information résultante de la phase de perception et sa contribution à la bonne prise de décision, on peut évaluer le degré d'autonomie d'un système robotique dans son environnement d'évolution. C'est dans le but d'augmenter l'autonomie des robots que le nombre de recherche sur la partie perception a augmenté d'une façon remarquable ces dernières années. Cela explique la présence de caméra, de télémètre laser, de radar, de capteurs d'ultrasons, de capteurs d'effort ou bien d'autres types de capteurs sur les nouveaux systèmes robotiques.

Le système robotisé inclut non seulement le robot et son électronique de commande mais également l'environnement dans lequel évolue ainsi un robot doit être équipé obligatoire de différents types de capteurs permettant de faciliter la perception et l'action avec l'environnement.

Concernant les capteurs optiques, L'objectif affiché est surtout qu'ils fournissent une information suffisamment riche en attributs permettant aux robots de réaliser, de manière autonome, des tâches dans des environnements partiellement connus, ou complètement inconnus. Cette définition liant la phase de perception à la phase d'action, fait que l'autonomie dans ce cas passe par l'implémentation de l'asservissement visuel sur les systèmes robotisés. Celui-ci consiste à intégrer directement des informations extraites des images fournies par une ou plusieurs caméras dans la boucle de commande du robot, afin de réaliser une action souhaitée. À partir de ce principe, l'utilisation de la vision dans la commande aura un rôle important dans l'évolution de l'emploi des robots car d'une part il permettra l'élargissement du domaine d'application de la robotique et d'autre part il améliorera considérablement la précision obtenue dans certaines tâches complexes. Les approches classiques sont basées sur la régulation à zéro de l'erreur entre les valeurs courantes et désirées d'informations visuelles sélectionnées, soit dans l'image (2-D) [Cou92], soit dans l'espace 3-D [GNC02].

Ainsi, plusieurs applications ont attiré l'attention de la communauté des roboticiens. En effet, le suivi d'objets mobiles par asservissement visuel a été l'une des activités

les plus étudiées. On peut citer alors les travaux de Won Jang [JB91] où il utilise un robot terrestre à 3 degrés de liberté pour le suivi d'un objet en déplacement à vitesse constante par une loi de commande PID qui vise à annuler l'erreur entre la position actuelle et désirée de l'objet dans l'image. D'autres études ont été élaborées dans le but du suivi d'objet en se basant sur la commande par vision. On peut citer à titre d'exemple les travaux de Francois Chaumette [CRE91] ou de Corke [Cok93] qui proposent respectivement le suivi d'un objet plan à partir d'un estimateur de mouvement par un robot terrestre à 6 degrés de liberté en utilisant une loi de commande PI et le suivi d'objet par un modèle d'état à vitesse constante. Dans les recherches de Peter K. Allen dans [ATYM93] un mécanisme de prédiction et de planification a été mis en oeuvre en se basant sur la vision pour la génération d'une trajectoire pour un robot terrestre à 6 degrés de liberté. Dans le même contexte, l'asservissement visuel a permis d'appliquer certains mouvements permettant de réaliser certaines caractéristiques en relation d'interaction avec un environnement ou un objet considéré pour l'exploration et la reconstruction de scènes statiques afin de faciliter le processus de reconnaissance [Bou93], [Mar96].

3.4.2 L'existant dans l'utilisation de la vision dans la robotique sous marine

Dans le milieu sous-marin, la détection, la caractérisation et la reconnaissance des cibles sont généralement faites à partir d'images sonar. Un nombre moins important de contributions existent dans le domaine de l'imagerie optique. On trouve alors des applications dans de divers domaines tels que l'assemblage de photos du fond marin [M⁺94],[MWLR94], [MRL95], [PS03][50], la navigation des AUVs [GNC02], [FR98], [GPRC02], [SGDP05], l'inspection de pipelines, ou de structures sur le fond [TZC96], [ZZ98], [FGZ98], [For01], [FG02], [GCYL03], l'identification de plancton ou de poissons [TSV⁺98], [CSR⁺03]. On trouve aussi des contributions sur la détection de scènes d'intérêt dans des vidéos [LTL00], [Esp02], [ESR⁺03], [WEK04].

Dans ce contexte, certains projets se sont mis en place pour l'étude des problèmes liés à la navigation par asservissement visuel ainsi que l'enchaînement de tâches.

on peut citer par exemple le projet TOPVISION qui visait à mener une campagne d'évaluation des algorithmes de traitement de séquences vidéo pour la détection, la localisation, la caractérisation et l'identification automatiques d'objets sous-marins nuisibles (manufacturées, polluants dangereux, voire létaux) par une caméra embarquée sur un AUV.

Dans projet (ESPRIT BRA UNION)[RCMA⁺98], le but a été de développer des algorithmes pour l'inspection des pipelines par asservissement visuel. Dans ce cadre, des expérimentations ont été menées. Elles comportent une phase de suivie de la partie horizontale du pipeline et une phase d'inspection de la partie verticale en utilisant l'engin sous-marin VORTEX d'IFREMER dans une piscine.

Dans cette thèse, une stratégie de coordination hybride basée sur la vision est proposée. D'une part, dans la phase de mise formation géométrique, chaque robot doit calculer l'angle qui le sépare de ses voisins ce qui demande le développement d'un processus de détection et d'identification des autres robots. D'autre part, dans la phase d'acquisition vidéo, le robot maître aura besoin de garder les robots suiveurs dans son champ de vision ce qui exige la conception d'algorithmes d'identification des robots, de calculer leurs positions dans l'image et d'estimer la distance qui le sépare des unités suiveurs pour pouvoir utiliser ses paramètres dans le calcul des consignes à envoyer à ces derniers. En d'autre termes le robot maître asservira par vision les mouvements des robots suiveurs de façon à maintenir la formation durant la navigation et à réaliser la configuration nécessaire pour que ces robots puissent construire une base stéréoscopique en phase d'approche de la cible.

3.4.3 Les méthodes de détection et de reconnaissance d'objet classiques (formes, couleurs)

À partir du besoin de concevoir des algorithmes de traitement d'images pour les différentes tâches citées dans le paragraphe précédent. Nous allons nous intéresser à

une des tâches principales du système de vision. C'est la détection et l'identification des robots et de la cible qui composent la scène et ce appliquée au contexte sous-marin [DJP⁺05],[SGDP05][SD06]. Généralement, ces deux tâches consistent à comparer ou à mettre en correspondance des indices visuels extraits des images avec les indices des objets recherchés extraits des modèles. Ces attributs des modèles constituent le repère des algorithmes de traitement d'images à développer. Ces algorithmes auront pour rôle d'identifier les robots et les cibles potentiels dans les images en dépit des changements de prises de vues, d'éventuelles occultations et des changements des conditions d'acquisition. Dans notre contexte de détection et d'identification par vision, on s'intéressera essentiellement à l'extraction des attributs utiles à l'application de la stratégie de coordination hybride. Dans notre contexte de travail, il existe deux méthodes classiques pour réaliser les tâches voulues par traitement d'images : la méthode de compatibilité par couleur et la méthode de compatibilité par forme. Avant d'appliquer une des deux techniques sur l'image, une étape de pré-traitement est nécessaire. Celle-ci a pour but de s'affranchir de la variabilité des conditions d'acquisition sous marines dans l'objectif de préparer l'image aux étapes suivantes de traitement.

Différents prétraitements ont été testés dans la littérature. Dans cette thèse, le choix s'est porté sur une approche basée sur le rehaussement et le lissage. En d'autres termes, nous avons décidé de traiter chaque problème à part : d'abord uniformiser l'éclairage, débruiter l'image, rehausser les contrastes, et enfin corriger les couleurs. Le processus proposé est un algorithme rapide et automatique qui ne demande aucune connaissance des conditions d'acquisition ni réglage de paramètres par le développeur. La méthode de correction basée sur la déconvolution a été abandonnée vue qu'elle suppose des connaissances à priori (la distance séparant l'objet de la caméra, la qualité de l'eau, la profondeur ou un modèle physique de diffusion de la lumière dans l'eau) qui sont parfois difficile à déterminer. Ensuite une des méthodes de compatibilité 2D sera appliquée.

Dans la méthode de compatibilité par forme, une opération de segmentation est appliquée directement après l'étape de pré-traitement qui est généralement robuste au bruit, aux problèmes d'éclairage et aux couleurs atténuées. Par contre, elle est

dépendante du point de vue des occultations et sensible au fond marin. Ce qui rend parfois difficile de détecter ou d'identifier l'objet recherché.

la méthode de compatibilité par couleur consiste à vérifier la compatibilité entre les couleurs présentes sur l'image et celle d'un objet connu à priori. Cette méthode doit faire face à la non constance des couleurs en d'autres termes l'atténuation et la modification de ces derniers selon la distance séparant la caméra de l'objet recherché. Ce problème peut être résolu par un bon réglage des valeurs de seuillage par rapport aux canaux de l'espace de couleurs utilisés. En effet la couleur est un attribut simple, robuste aux changements d'échelles, aux changements de points de vue, et aux occultations. ceci fait de la couleur un attribut robuste et souvent discriminant [GS99], [OMC03].

Le choix dans le développement des algorithmes de traitement d'image pour l'étape qui suit le pre-traitement s'est porté sur la méthode 2D de compatibilité de couleur car d'une part les robots CISCREA ont la même forme et couleur jaune fleurissant et d'autre part un outil d'identification a été placé au-dessus du châssis de chaque robot. Il s'agit d'une sorte de barre à code de forme cylindrique constituée d'une succession de mini cylindres de couleurs noires ou blanches. Cette succession n'est pas la même d'un robot à l'autre permettant ainsi d'identifier chaque AUV par un unique code. Donc, on peut différencier deux robots par l'identifiant de chacun codé sur son barre-code (3.2.

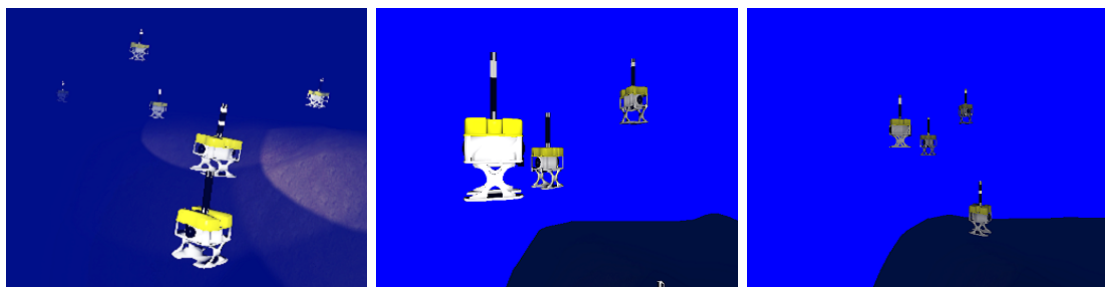


FIGURE 3.2 : les robots CISCREA munies de leurs barre-code dans des scènes sous marine.

3.5 L'algorithme de traitement d'image proposé

Dans cette partie, on a développé et implémenté des algorithmes de traitement d'images responsable de la détection, l'extraction et la lecture du barre-code de chaque robot présent dans la scène sous-marine. Avant d'essayer les algorithmes en expérimentations. On a commencé tout d'abord par les tester en simulation sur notre plateforme qu'on présentera dans le chapitre 4. Dans ce travail, on a choisi de développer nos algorithmes en langage de programmation Python pour des raisons de compatibilité avec notre simulateur. On a eu recours aussi à la bibliothèque de traitement d'images OpenCV afin de bénéficier des primitives de base pour la manipulation des images (voir annexe A). Comme on a précisé dans le paragraphe qui précède, les robots utilisent l'asservissement visuel comme moyen de contrôle et source de prise de décision. Au cours du mode essaim chaque robot essaye de détecter et de reconnaître ses voisins par leurs barre-codes puis de garder des distances et des orientations bien définies à leur égard pour aboutir à la formation géométrique voulue. En mode hiérarchique, le robot leader analyse par vision les trajectoires des robots suiveurs et leur envoie les consignes nécessaires afin de maintenir la formation et remplir les conditions nécessaires en positions et orientations pour une éventuelle construction d'une base stéréoscopique en phase d'approche d'une cible (voir la figure 3.3).

3.5.1 Présentation de la chaîne de traitement d'image proposée

C'est dans ce contexte qu'une chaîne de traitement d'image a été mis en place (voir la figure 3.4). Elle comporte 3 phases successives :

- Prétraitement de l'image sous-marine
- Localisation des robots : La détection des robots présents dans la scène sous marine et la détermination de leurs coordonnées dans l'image
- Extraction des barre-codes : la lecture de la barre à code ou en d'autres termes l'identification des robots présents sur l'image sous marine

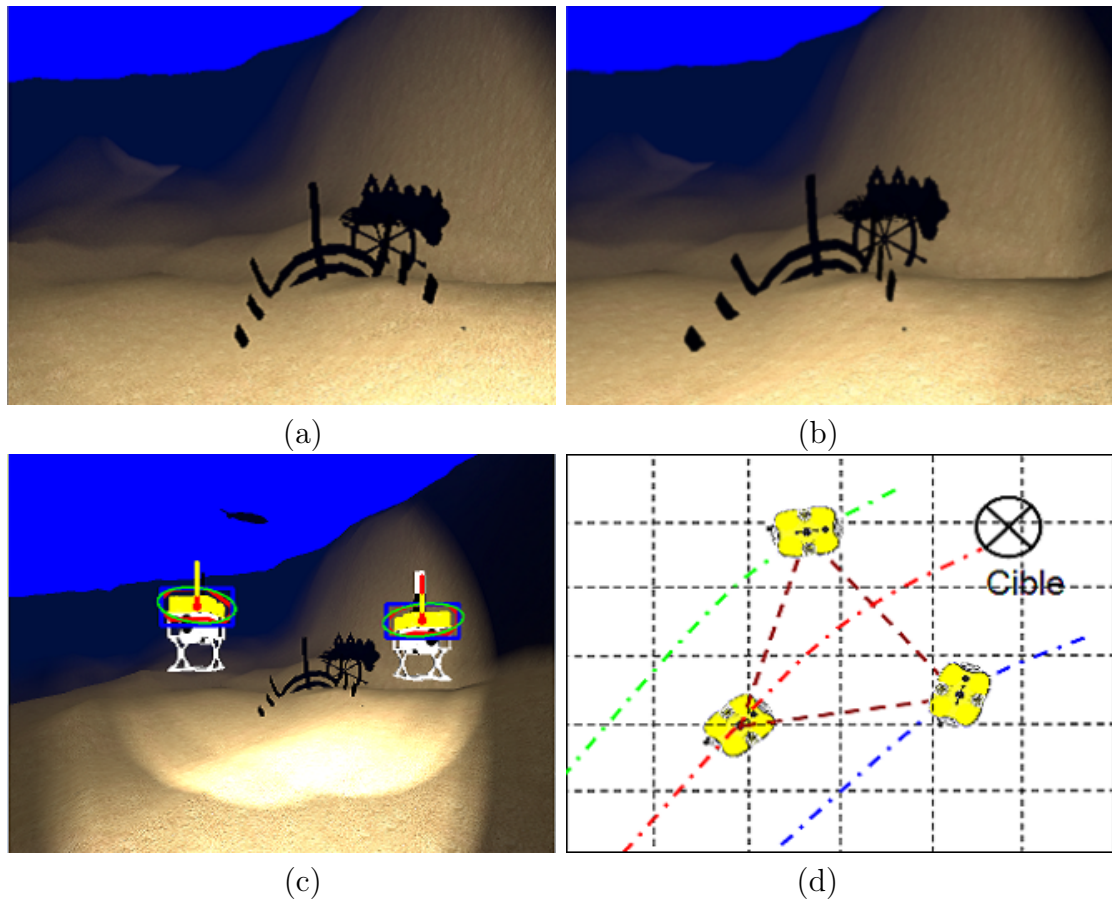


FIGURE 3.3 : construction d'une base stéréo par trois robots en mode hiérarchique. (a) rendue du camera du robot suiveur gauche, (b) rendue du camera du robot suiveur droite, (c) : traitement de l'image du robot maître afin de déterminer les consignes de trajectoire à envoyer aux robots esclaves, (d) : Schéma explicatif de la disposition des robots pour une acquisition vidéo.

3.5.2 Pré-traitement de l'image sous marine

Cette étape a pour objectif d'apporter des corrections sur l'image acquise et d'éliminer les perturbations causées par l'atténuation de la lumière sous l'eau. L'algorithme proposé est basé sur le rehaussement, chaque perturbation est corrigée à part. Il peut être appliqué sur deux grandes étapes :

- Uniformiser l'éclairage et débruiter l'image
- Rehausser les contrastes et corriger les couleurs

Pour effectuer ces étapes, trois opérations sont nécessaires.

- **L'élimination de l'effet de Moiré**

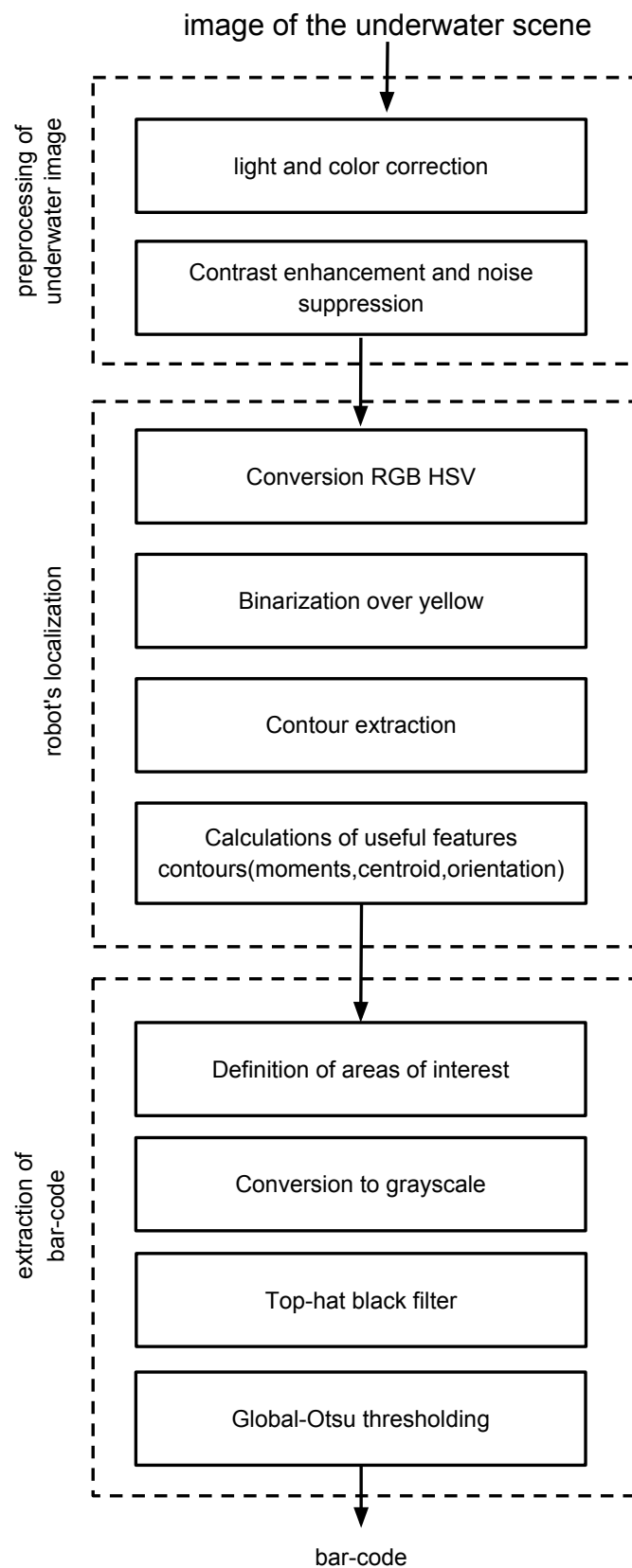


FIGURE 3.4 : La chaîne de traitement d'image.

Le moiré est un effet de tramage oblique qui apparaît généralement sur les images sous marines et qui affecte négativement la qualité de l'image en cas de rehaussement de contraste. Pour le supprimer, on a commencé par la détection et l'atténuation des pixels hautes fréquences dans la transformée Fourier par suite un filtrage fréquentiel [FMB⁺03] a été appliqué sur l'image.

– **Le filtrage homomorphique**

Après la suppression de l'effet de moiré, un filtrage homomorphique a été appliqué dans le but d'uniformiser l'éclairage et de rehausser les contrastes dans l'image.

– **Le débruitage par ondelettes**

Cette étape permet de diminuer les bruits présents sur l'image causé par l'opération précédente de rehaussement de contraste.

– **Le filtrage anisotropique**

Ce type de filtrage est appliqué pour éliminer les oscillations indésirables sur l'image afin de préparer l'étape de détection de robots

– **La correction des contrastes et l'égalisation des couleurs**

La dernière opération consiste à faire un étalement d'histogramme afin d'augmenter le contraste succédé par une égalisation des moyennes de couleur afin d'atténuer la couleur dominante.

3.5.3 Localisation des robots

La localisation des robots est possible sur la base de deux constatations. Tout d'abord, il est à noter que les AUV sont de couleur jaune fluorescent ce qui les distingue du fond marin et les rends plus visibles. D'autre part, le barre-code est positionné juste au-dessus du chassie du robot avec une taille proportionnelle à la hauteur de celui-ci. Par conséquent, avec une simple méthode géométrique, on peut localiser le barre-code en localisant l'AUV. Basé sur la méthode de compatibilité par couleur, l'algorithme proposé vise à mettre en avant les éléments qui sont susceptibles d'être des robots en repérant les zones à couleurs jaune fluorescent dans l'image. La teinte jaune est recherchée et elle s'exprime selon trois composantes

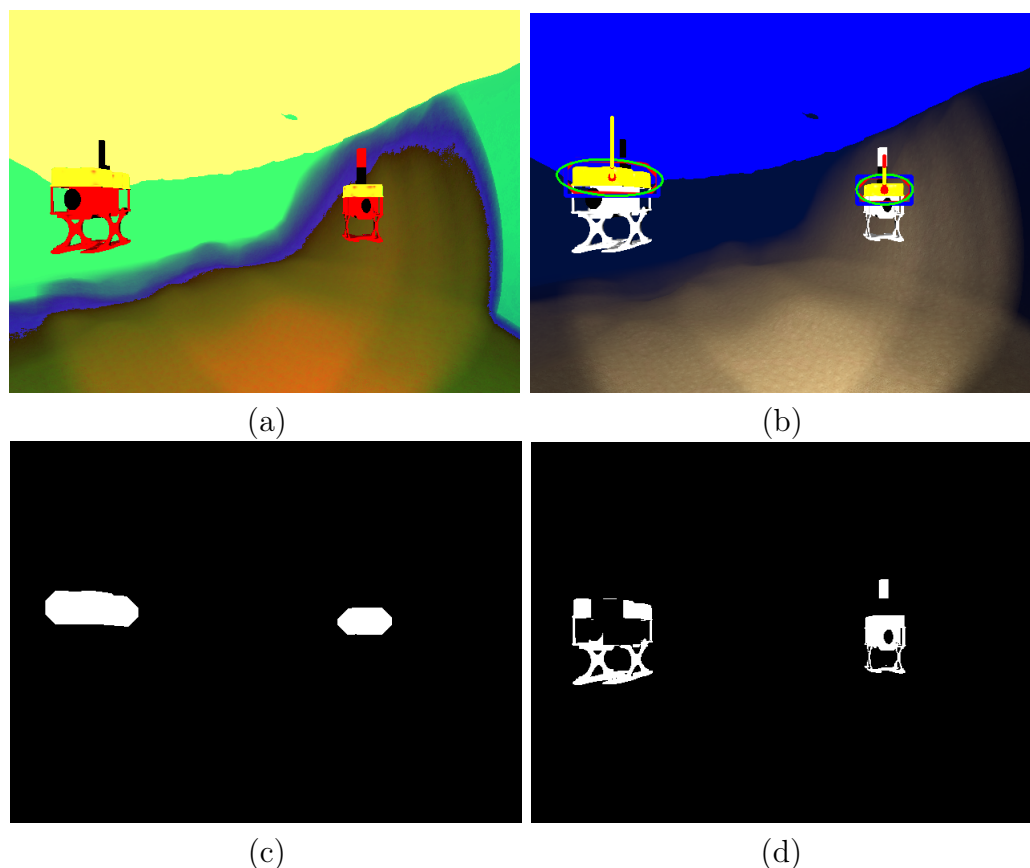


FIGURE 3.5 : Resultats du traitement d'image effectuer par le leader, (a) Conversion RGB/HSV, (b) Résultat final de l'identification et la localisation des autres robots, (c) binarisation par rapport au jaune, (d) resultat du Top-Hat Black filter.

dans l'espace RGB alors qu'elle ne prend qu'une valeur dans l'espace HSV. Pour cela, une conversion de l'image couleur en HSV sera alors appliquée (voir la figure 3.5(a)) afin de préparer une binarisation par rapport au jaune pour isoler les zones correspondantes à cette couleur et par suite les localiser (voir la figure 3.5(c)). Après l'application du seuillage sur la teinte retenue, l'ensemble des points récupérés correspondent à la visualisation des robots présents dans l'image. Les positions des robots dans l'image sont calculées en faisant la médiane des coordonnées des points de chaque zone blanche.

À l'issue de cette étape, une extraction de contour sera effectuée et un calcul de certains attributs utiles de celui-ci sera fait (moment Hu, centroïde, orientation) afin de préparer l'étape d'identification des robots (lecture de barre code). Le calcul du moment Hu de chaque contour a pour objectif de déterminer le centroïde (centre

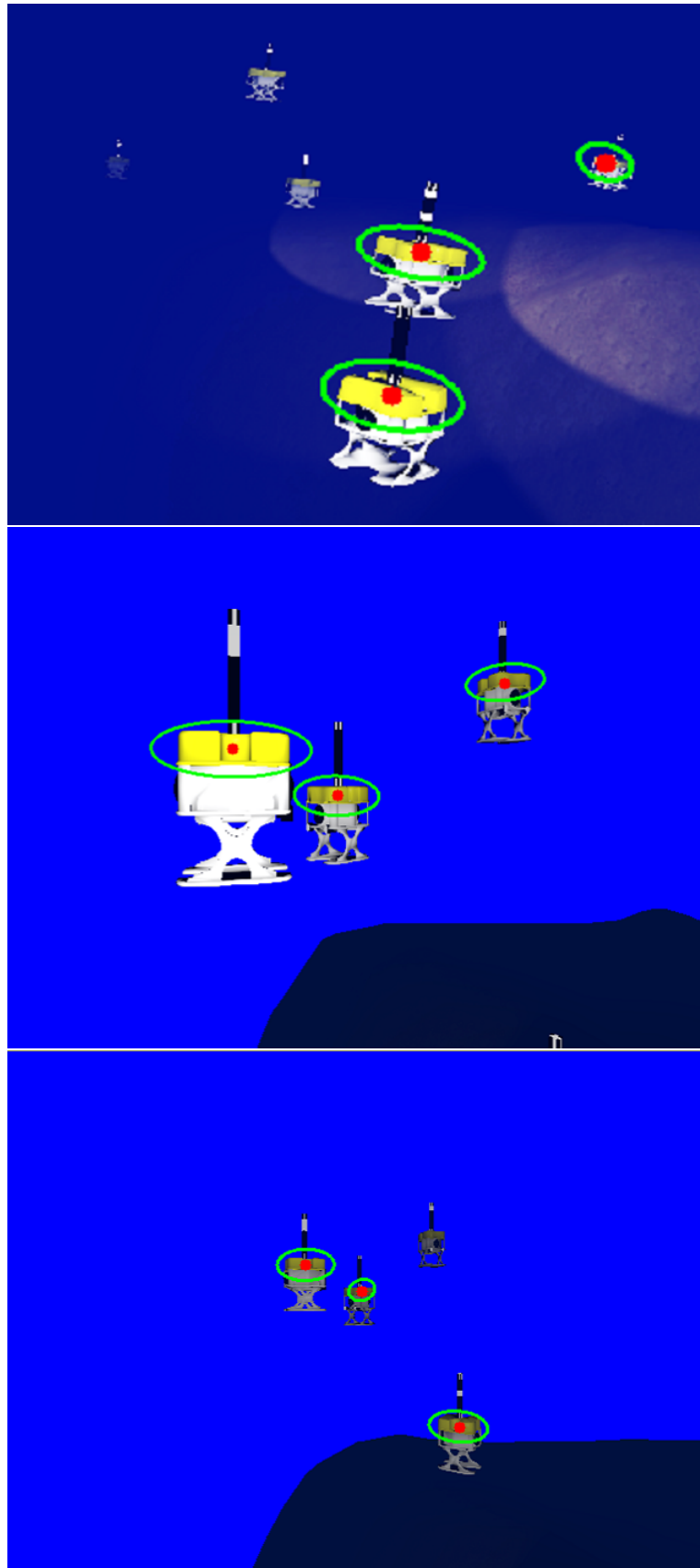


FIGURE 3.6 : Exemples de résultats de l'étape de localisation des robots dans une scène sous marine.

de gravité) de celui-ci qui sera notre point de départ pour la phase d'extraction du barre-code (voir la figure 3.6).

3.5.4 Extraction des barre-codes

L'extraction du code vise à retrouver la succession de couleurs noir et blanc selon le sens du codage sur la barre. La lecture du code va permettre à l'AUV d'une part d'identifier chaque robot présent sur l'image de la caméra de celui-ci et d'envoyer les bonnes commandes au bon robot en cas de besoin (exp : en mode hiérarchique). Au début de cette étape, les zones susceptibles d'être des robots sur l'image résultante de l'étape précédente sont encerclées par des ellipses possédant la taille et l'orientation des robots détectés.

En calculant l'orientation des robots, l'angle de lecture du code est alors déterminé. Celui-ci est important puisqu'il permet la lecture de la barre pixel par pixel selon l'orientation du robot dans la scène et le traduire par suite en code .

Vu qu'on connaît la position et l'orientation du barre-code par rapport au robot, on pourra alors déterminer la zone qui contient potentiellement le barre-code.

Celui-ci possède diverses caractéristiques qui lui permet d'être différencié des autres éléments existant dans la zone d'intérêt, l'une d'entre elles est la présence d'un fort contraste entre les zone coloré (en blanc/noir) et la couleur du fond marin.

Dès lors, un filtrage morphologique de type Top-Hat Black est appliqué sur l'image en niveau de gris afin de mettre en évidence ces zones de fort contraste. Le Top-Hat Black est défini comme étant la fermeture de l'image à laquelle est soustraite l'image originale. Étant donnée que la fermeture de l'image tend à étendre les zones blanches sans pour autant altéré de façon significative ces zones, il résulte de la soustraction de l'image originale les zones à l'origine noires entourées de blancs. Ceci met en avant le barre-code.

L'application du Top-Hat Black a été réalisée avec un élément structurant carré de taille 25/25, ce qui est suffisant pour bien faire ressortir les codes barre (voir la

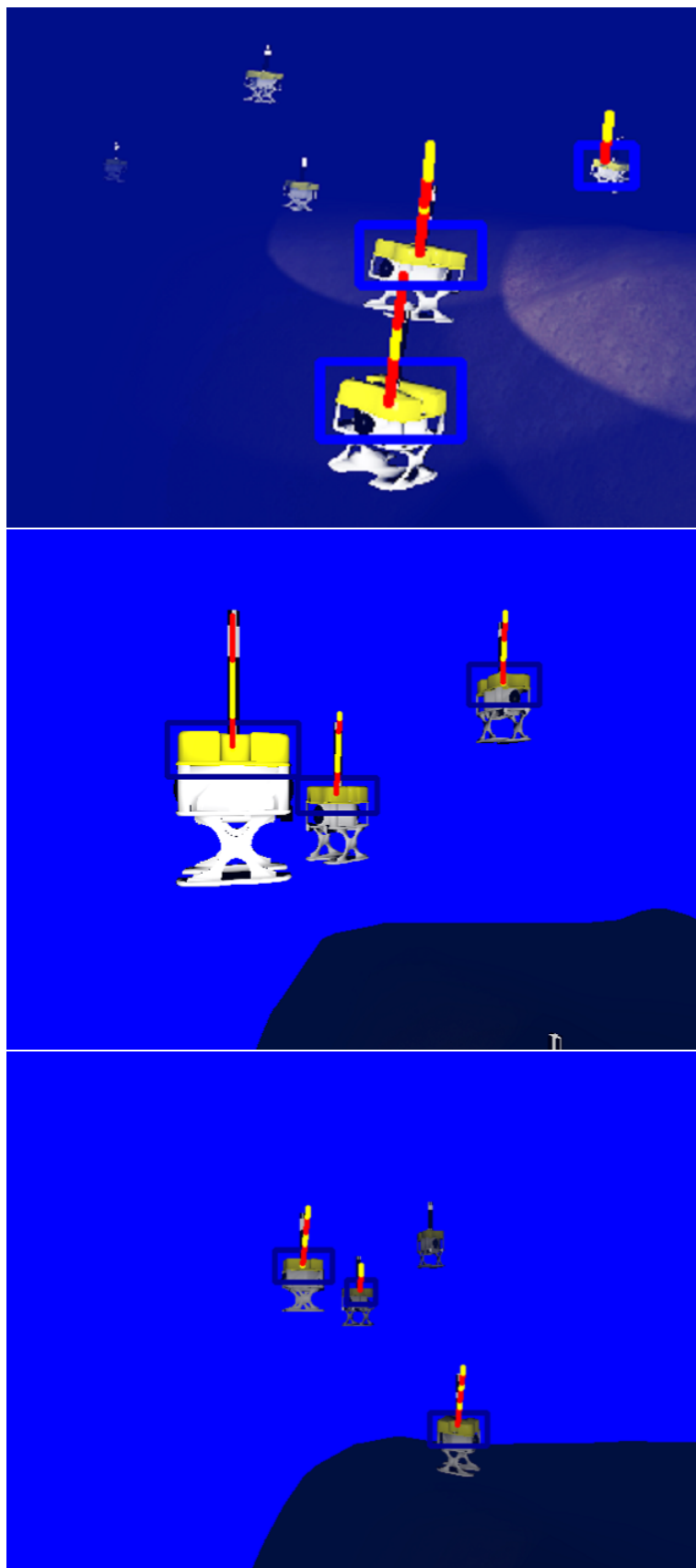


FIGURE 3.7 : Exemples de résultats de l'étape extraction des barre-codes des robots dans une scène sous marine.

figure 3.5(d)). Un seuillage global de l'image avec l'algorithme d'Otsu est finalement appliquée afin de binariser l'image.

Par suite on abordera le balayage de cette zone d'intérêt. cette opération commence à partir du centroïde du contour suivie de la lecture des valeurs des pixels d'une façon verticale de bas en haut suivant l'orientation du robot jusqu'à la fin du barre-code (voir la figure 3.7). Ceci en prenant en compte que la taille de la barre est proportionnelle à la surface du contour (voir la figure 3.5(b)). Afin d'implémenter ces algorithmes de vision sur les robots, nous avons eu recours à la bibliothèque de traitement d'images Open-CV (voir annexe A).

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé un état de l'art sur l'utilisation de la vision dans le contexte sous marin et les spécificités des images acquises sous marines et les méthodes et algorithmes de traitement utilisés pour pouvoir les exploiter. Ensuite, on s'est intéressé particulièrement aux à l'utilisation du capteur optique dans la robotique sous marine. Deux approches se distinguent : l'approche 2D et l'approche 3D. Dans notre application, nous nous intéressons à l'approche 2D et particulièrement aux approches de compatibilité par couleur. Pour cela, une chaîne de traitement d'images a été proposée afin que chacun des robots du groupe puisse tout d'abord détecter ensuite localiser et enfin identifier les autres unités. Des différents algorithmes ont été mis en place afin de réaliser les différentes étapes définies par cette chaîne et ils ont été testés en simulation. Dans les phases de détection et de localisation, plusieurs techniques se basant sur la compatibilité par couleur ont été développées et testées expérimentalement dans le but de centrer une cible sur l'image d'un robot. Notre choix s'est porté sur la technique de conversion rgb/hsv. Après la mise en place de la stratégie de coordination hybride en se basant sur la vision et la conception des outils algorithmiques nécessaires pour le traitement d'images sous marine, Il nous reste à développer un simulateur pour pouvoir évaluer et tester nos choix en menant des missions en simulation. Dans le chapitre suivant,

nous allons nous intéresser à l'étude et la conception d'une plateforme de simulation. Nous détaillons l'architecture de celle-ci et les fonctionnalités qu'elle nous offre notre plateforme permettant de tester notre stratégie de coordination hybride dans un environnement marin virtuel avec des modèles 3D de robots sous marins.

Chapitre 4

Plateforme d'expérimentation

Ce chapitre est consacré à l'étude, la conception et la réalisation d'une plateforme de simulation de véhicules sous marins autonomes. Nous nous focalisons particulièrement sur la simulation d'une flottille de robots CISCREA afin de tester d'une part l'efficacité de la stratégie de coordination hybride développée dans le deuxième chapitre et d'évaluer d'autre part les algorithmes de traitement d'images mis en place au troisième chapitre.

Nous débutons ce chapitre par l'évocation de l'importance de la simulation en robotique et particulièrement son rôle dans la validation du comportement d'un groupe de robots sous-marins. Une énumération d'exemple de simulateurs existants pour être en mesure de proposer une plateforme adaptée à notre contexte de sera.

Nous décrivons par suite l'AC-ROV qui a servi à valider les algorithmes de vision, puis le CISCREA et sa modélisation cinématique et dynamique.

Dans une troisième partie, nous nous attachons à modéliser les différents éléments de la simulation. Ces éléments ne sont que les robots CISCREA et l'environnement marin. Enfin, nous présentons l'architecture du système de simulation qu'on propose. La conception de cette architecture va prendre en compte d'une part les propriétés de l'environnement marin (turbidité, viscosité) et des robots CISCREA (dynamique, loi de commande). D'autre part elle tiendra compte des spécificités de la simulation d'un groupe de robots sous marins communicants (communication sous marine).

4.1 Introduction

Ces dernières années, la simulation en temps réel des meutes de robots a de plus en plus intéressé les chercheurs dans ce domaine pour trois raisons principales. Tout d'abord, Elle nous offre un gain en temps et en main d'oeuvre. En fait, la complexité de la tâche à réaliser et la multitudes des ressources matérielles et logicielles liées aux robots rendent les essais réels de plus en plus lents et coûteux. Ainsi, la simulation paraît une solution rapide et efficace à ce problème sans se dispenser des tests réels.

Ensuite, la simulation est aussi un outil utile pour mener des missions dans des situations très proches de la réalité et qui sont difficilement réalisables en laboratoire. Ces missions peuvent être répéter autant de fois que cela s'avère nécessaire afin d'effectuer des réglages sur certains paramètres aboutissant ainsi à la réussite et à l'amélioration de l'efficacité d'exécution des tâches demandées.

Enfin, pour affranchir la non-disponibilité d'un matériel au laboratoire, la simulation représente un moyen utile pour dépasser cela et avancer dans les recherches. On peut citer à titre d'exemple des tâches exigeant l'utilisation d'un groupe de robots alors qu'on ne dispose que d'un seul.

Dans le domaine de la robotique, deux types de simulateurs peuvent être distingué. Le premier type est destiné à la validation d'un composant particulier [KFK⁺02], or que le deuxième s'intéresse à simuler tout l'environnement avec tous ces composant afin de tester les performances des robots dans leur milieu d'évolution. Nous allons nous intéresser à cette deuxième catégorie. Il n'en existe pas beaucoup, parmi eux nous pouvons retrouver le simulateur Gazebo [KH04] ainsi que MORSE [ELDL11a].

4.2 Contexte

Pour les engins sous-marins, le développement et le contrôle d'une flottille d'AUVs coordonnée ne sont pas des tâche aisées. Sa complexité réside principalement au fait

que c'est difficile de superviser et même de suivre visuellement un groupe d'AUVs durant les expérimentations. D'autres difficultés peuvent s'avérer contraignantes pour la coordination d'une flottille d'AUV au cours d'une mission réelle. ce sont essentiellement :

- la localisation imprécise d'un véhicule sous-marin.
- la communication sous marine limitée.

En fait, il est difficile de localiser précisément un AUV dans le milieu sous marin. Cela est causé essentiellement des erreurs de mesure du vecteur d'état (position, vitesse, attitude) par l'AUV lui-même, ou par un opérateur extérieur. Pour résoudre ces problèmes des solutions existent comme l'installation d'une centrale inertielle ou l'utilisation d'un système de bouées pour la l'écho-localisation sauf qu'elles sont lourdes et onéreuses à mettre en place.

En ce qui concerne la communication sous marine, celle-ci est caractérisée par sa bande passante limitée (quelques dizaines de bits utiles par seconde) et par sa sensibilité par rapport aux différents types de bruits ambiants qu'ils soient :

- Naturels (pluie, vent, animaux).
- Dûs aux activités humaines (bateaux, sous-marin).
- Liés à la propagation de l'onde acoustique dans l'eau (ondes acoustiques réfléchies par l'environnement atteignant un récepteur avec un décalage temporel).

Ces facteurs représentent une contrainte technologique majeure pour la coordination d'une formation d'AUVs. La solution réside alors dans l'optimisation de la communication, la réduction du débit d'information communiquée et augmenter les traitements réalisés de façon autonome à bord des robots.

Avant de mettre en oeuvre une flottille d'AUVs, il est plus concevable de tester la faisabilité de la mission, la fluidité des interactions entre les robots, l'efficacité des algorithmes embarqués, le bon fonctionnement des sous-systèmes employés. la simulation offre aussi aux chercheurs la possibilité de planifier des variétés de scénarios permettant ainsi l'amélioration de l'efficacité d'exécution des tâches ou encore la réalisation de tâches innovantes.

C'est pour cette raison que les outils de simulation représentent dans notre cas une solution clé. Tout d'abord, ils nous permettent de tester et valider les lois de commande ainsi que les architectures de contrôle des AUVs et de détecter par la suite les défaillances qui peuvent apparaître. Par ailleurs, ces technologies limitent les ressources humaines, réduisent le nombre des expérimentations nécessaires et par conséquent, le coût et le temps dépensé à mettre au point ces systèmes.

À présent, la coordination d'un groupe de robots sous marins est une thématique de recherche étendue, très active et complexe [LLB11], [LJL⁺06], [FLB⁺06]. Dans ce contexte, nos travaux ont pour objet l'étude et la proposition d'un outil de recherche, sous la forme d'un simulateur, permettant de valider la stratégie de coordination d'un groupe de robots sous marins, et de préparer les expérimentations réelles. Pour développer un tel outil, il est nécessaire de créer une architecture logicielle permettant de modéliser réellement l'interaction entre les différents éléments d'une mission (AUV/AUV ou AUV/environnement sous marin). Dans le cadre de cette thèse, l'objectif est de concevoir un système de simulation permettant d'une part d'envisager des tests afin de valider la stratégie hybride de coordination grâce notamment à la prise en compte des propriétés des communications et des capteurs sous marines, et d'autre part de préparer des missions permettant la mise en place des lois de commande sur les véhicules. Cette thèse doit donc conduire à la création d'un outil opérationnel pour l'équipe de robotique sous-marine de l'ENSTA Bretagne. Les apports d'une telle plateforme de simulation sont importants lorsque vient le temps de développer des algorithmes de contrôle du haut niveau et de maîtriser les différents comportements des robots. Il est alors possible de le faire sans nécessiter les systèmes réels.

Dans le cadre de notre travail la problématique de développer une équipe de robots sous marins autonomes demande

- La modélisation des véhicules sous marins : le simulateur doit calculer l'évolution de la dynamique de l'ensemble des robots connectés au système de simulation. Cette évolution est calculée à partir des commandes envoyées par les robots et les perturbations environnementales locales (collisions), au travers du modèle dynamique propre à chaque véhicule.

- La modélisation des capteurs : le simulateur est chargé de calculer la réponse de l'ensemble des capteurs de tous les véhicules connectés au simulateur. Il s'agit aussi bien des capteurs physiques (type centrale inertielle, capteur de pression) que des capteurs de perception (type sonar ou caméra). Ce simulateur doit permettre également à plusieurs modèles différents de coexister. D'autres aspects sont pris en compte comme les comportements temporels et logique des capteurs (taux d'échantillonnage, délais propres au capteur et la demande d'acquisition).
- La modélisation des moyens de communication : le simulateur est chargé de reproduire le comportement logico-temporel des différents périphériques de communication présents à bord des robots. Le comportement logique consiste à mettre le message sous une forme bien définie avant son émission. Le comportement temporel correspond aux différents délais mis par les moyens de communication pour transmettre un message.

La réalisation de ces tâches passe par trouver un outil logiciel permettant :

- L'étude et la visualisation 3D des différents scénarios d'emploi simultané de plusieurs robots sous-marins.
- La mise en jeu des différents acteurs de déplacements de Robots (énergie, position, cap)
- La simulation des robots à différents niveaux d'abstraction : selon les besoins de l'évaluation en cours, les différents capteurs/actionneurs seront soit simulés (le résultat est directement fourni au robot) soit évalués (ils fonctionnent comme dans la réalité).

Afin de maîtriser ces problèmes de simulation, beaucoup d'outils ont été développés. Ces outils ont contribué à l'aide au concepteur lors des différentes phases de son travail. Ces problèmes concernent par exemple, le choix du robot en fonction des tâches visées, l'implantation de celui-ci dans son environnement de travail, les méthodes de programmation de tâches. Ces différents problèmes peuvent être résolus ou potentiellement traités par l'utilisation de systèmes CAO. En effet, ces systèmes offrent de puissants outils graphiques qui permettent de traiter facilement certains des problèmes cités. Ils permettent en outre, au moyen de simulateurs graphiques, de programmer et de simuler les tâches. Ainsi, les problèmes d'accessibilité aux tâches demandées peuvent être vérifiés lors de la simulation ce

qui permet de réduire la phase de vérification sur le site réel. Le logiciel open-source Blender[Ble94]a été retenu (choix similaire au LAAS pour la modélisation de robots terrestres)[ELDL11b],[Ble] dans le but de réaliser des mises en situation impliquant un certain nombre de robots qui interagissent et coopèrent pour réaliser des tâches spécifiques pour plusieurs raisons.

4.3 Modélisation des AUVs

L'un des rôles principaux du simulateur conçu est de fournir une interface à un AUV virtuel évoluant dans un milieu marin permettant la simulation d'une dynamique adaptée à ses propriétés physiques, afin de valider les algorithmes de son contrôle/commande.

4.3.1 présentation de l'unité robotique utilisé en expérimentation(AC-ROV)

L'AC-ROV SP 50 est le plus avancé de sa catégorie ROV, conçu pour l'inspection de routine, d'intervention d'urgence et pour l'observation des plongeurs. L'ensemble du système correspond est un boîtier facile à transporter étanche à l'eau (voir la figure 4.1). Avec un poids total de seulement 3kg et de dimension 203mm x 152mm x 146mm ce qui lui permet de naviguer à travers un tuyau de 190 mm de diamètre. Il assure l'inspection sous-marine par vidéo. Une seule personne peut facilement déployer le système en moins de 3 minutes et le commander avec une main. il peut atteindre une profondeur nominale de 75 m. Il présente une grande résistance à la pression et à la corrosion, stable en roulis et en tangage.

Le robot possède 6 propulseurs submersibles. Les quatre propulseurs horizontaux sont disposés en format de vecteur et sont alimentés lors du déplacement dans n'importe quelle direction horizontale (voir la figure 4.1). Leur mise en angle de 45 degrés fournit une poussée égale dans toutes les directions. L'AC-ROV est proche d'un carré dans le plan horizontal donc une poussée égale signifie une vitesse et

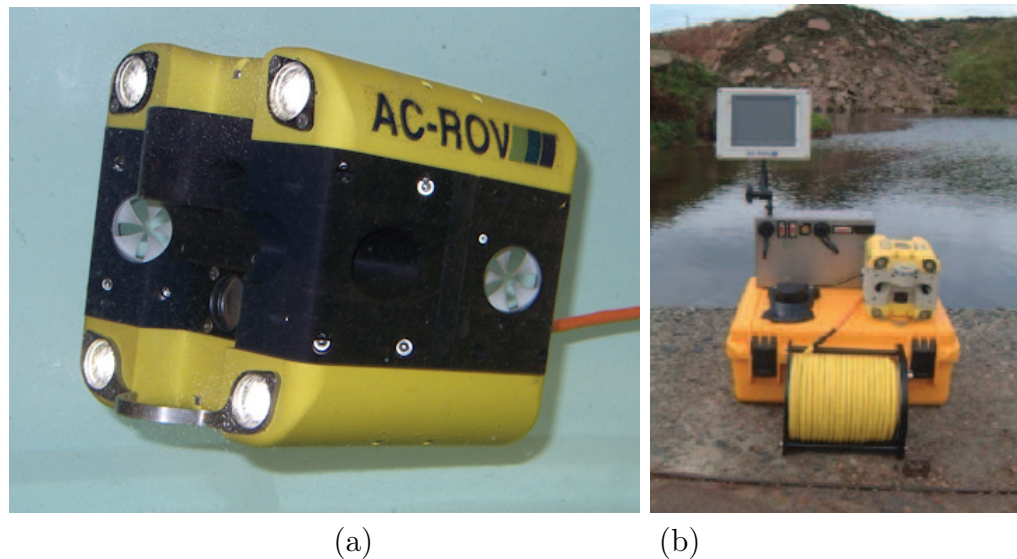


FIGURE 4.1 : Le robot AC-ROV SP 50 et les différents composants de son système de contrôle.[\[hc\]](#)

puissance égales pour les déplacements vers l'avant, en arrière et latéralement. Les deux propulseurs verticaux assurent le déplacement vertical.

il est doté d'une caméra miniature CCD 520 TVL. La mise au point est fixe avec un champ diagonal de vue de 60 degrés dans l'eau. La clarté visuelle de la caméra est de 10 fois supérieure à celle de l'oeil humain. Ce qui permet à l'AC-ROV de revenir sur des détails visuels et de naviguer dans des zones où la visibilité est réduite mieux qu'un plongeur.

Quatre LEDs cluster avant fournissent une lumière blanche, la luminosité de paires de haut et le bas est contrôlés indépendamment à la surface par l'unité de contrôle. Le tableau 4.1 résume les principales caractéristiques de l'AC-ROV dans sa configuration commerciale. L'opérateur contrôle le véhicule avec un "spacemouse" (souris 3D), et peut lire la profondeur affichée sur le moniteur vidéo.

Sa souris spatiale ouvre une nouvelle ère pour la communication homme-machine. Ce dispositif est basé sur la technologie utilisée pour contrôler les robots dans l'espace ce qui offre une variété de tâches, notamment le traitement des données visuelles de celui ci. Il est devenu un périphérique d'entrée standard de commande de mouvement interactive.

Dimensions	0.525m (L) 0.406m (W) 0.395m (H)
Poids	15.56kg sans charge
Limite d'immersion	75 m
Appareils	4 Leds
Caméra	CCD couleurs 520 lignes*0.1 lux
Le fil câble du treuil	en otion jusqu'à 80 m avec une manivelle de winch
Puissance	100-240 V, 50/60 Hz, 300 W
Degrés de libertés	Surge, Sway, Heave and Yaw
Propulsion	2 propulseurs verticales and 4 horizontales

TABLE 4.1 : Les caractéristiques de l'AC-ROV

4.3.2 présentation de l'unité robotique utilisé en simulation (Le CISCREA)

Le Ciscrea est un robot sous-marins qui est mécaniquement conçu pour descendre jusqu'à 50 mètres de profondeur. Ils dispose d'une batterie amovible, extérieure au compartiment étanche dans lequel se loge l'électronique capable de contrôler les six propulseurs. Il est aussi doté d'une caméra orientable, d'une centrale inertielle basique, ainsi que de quelques capteurs de température interne, de détection de fuite, ou de pression pour déterminer la profondeur d'évolution du robot. Le Ciscrea ne dispose pas d'un système de propulsion classique, où l'on retrouve des propulseurs agissant de manière indépendante pour aller dans une direction donnée. Il dispose de 6 propulseurs :

- 2 dans un plan vertical, non dissociables.
- 4 dans un plan horizontal, indépendants.

Ses caractéristiques sont données dans le tableau 4.2.

Comme la forme Ciscrea est complexe (voir la figure 4.2(a)), nous avons décidé d'utiliser le modèle dynamique d'une forme cubique simple (voir la figure 4.2(b)).

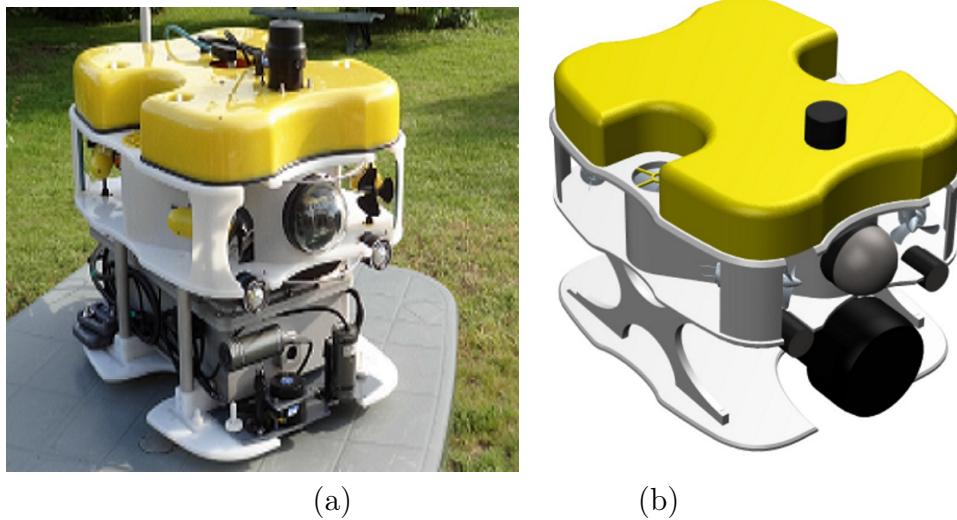


FIGURE 4.2 : Le robot CISCREA et son modèle 3D.

Dimensions	0.525m (L) 0.406m (W) 0.395m (H)
Poids	15.56kg sans charge
Degrés de libertés	Surge, Sway, Heave and Yaw
Propulsion	2 propulseurs verticales and 4 horizontales
Vitesse	2 noeuds (Avancé) & 1 noeud (Dérive, Ascension)
Limite d'immersion	50m
capacités des batteries	2-4 hours

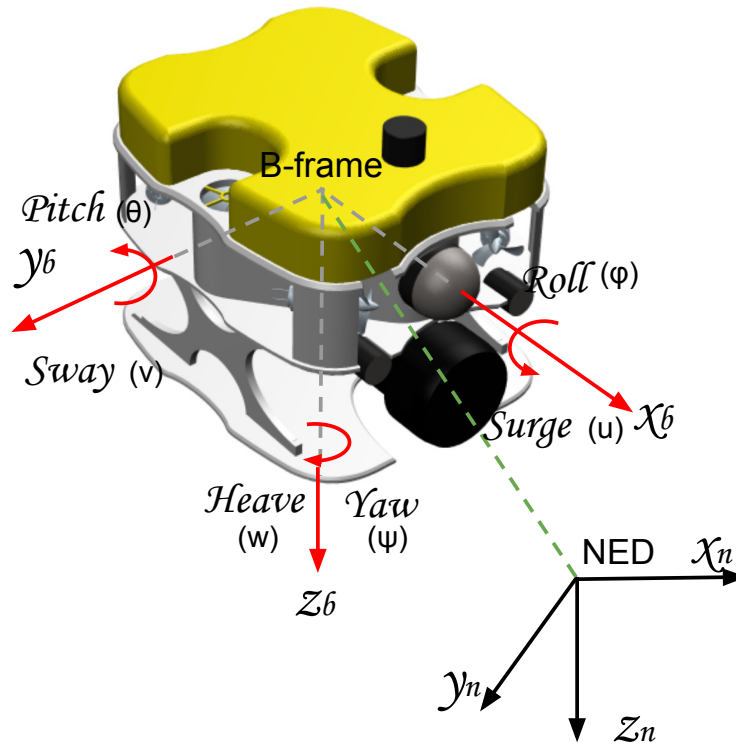
TABLE 4.2 : Les caractéristiques du CISCREA

4.3.3 Conventions et hypothèses de base

4.3.3.1 Cinématique

Pour les systèmes marins, on utilise généralement deux systèmes de coordonnées : un lié au repère dit "NED-frame(North East Down)" et un lié au robot appelé "B-frame (body frame)". Ces repères sont introduits comme tels que présentés par Fossen [Fos02] dans la figure 4.3. Dans cette section, la cinématique du robot sus marin est représentée par la formulation proposée par Fossen[Fos02]. Les variables de positions, orientations, vitesses linéaires et angulaires, de forces et de moments sont présentées dans le tableau suivant :

- Le vecteur position η avec $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$


 FIGURE 4.3 : Les repères Ned-frame et B-frame du robot sous marin [YCM⁺14].

	Positions et Angles	Vitesses linéaires et angulaires	Forces et Moments
Coordonnées	NED-frame	B-frame	B-frame
Avance	x	u	X
Dérive	y	v	Y
Ascension	z	w	Z
Roulis	ϕ	p	K
Tangage	θ	q	M
Lacet	ψ	r	N

TABLE 4.3 : Notation des variables relatifs au robot sous marins

- le vecteur vitesse ν avec $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$
- le vecteur force τ avec $\tau = [X, Y, Z, K, M, N]^T$

On peut relier les vecteurs vitesses et positions par la formule suivante (4.1) :

$$\nu = J(\Theta)\dot{\eta} \quad (4.1)$$

avec, $J(\Theta) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, matrice de transformation entre le repère B-frame et NED-frame, et Θ le vecteur défini comme suit $\Theta = [\phi, \theta, \psi]^T$. En posant la notation

suivante $c(\cdot) = \cos(\cdot)$, $s(\cdot) = \sin(\cdot)$ et $t(\cdot) = \tan(\cdot)$, on obtient :

$$J(\Theta) = \begin{bmatrix} R(\Theta) & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & T(\Theta) \end{bmatrix}, T(\Theta) = \begin{bmatrix} 1 & s\psi t\theta & c\phi t\theta \\ \mathbf{0} & c\phi & s\phi \\ \mathbf{0} & \frac{s\phi}{c\theta} & \frac{c\phi}{c\theta} \end{bmatrix}$$

$$R(\Theta) = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta \\ s\psi c\theta & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & -c\psi s\phi + s\theta s\psi c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix}$$

4.3.3.2 Dynamique

Dans ce modèle, nous avons considéré 3 facteurs : la poussée et le moment de chaque propulseur, le poids ainsi que la flottabilité et la traînée de l'AUV et aussi le moment induit par la vitesse angulaire [YCM⁺14]. La poussée est calculée en fonction de la position des propulseurs dans l'AUV et leurs angles de roulis et de tangage. La traînée est calculé en tenant compte de l'angle d'incidence et de glissement de l'AUV [YCM⁺14].

En considérant les forces d'inertie généralisée, l'effet hydrodynamique, la gravité et les contributions de la flottabilité, le modèle dynamique peut être écrit selon la notation de SNAME (the standard Society of Naval Architect and Marine Engineers) et de la formulation proposée par Fossen sur deux parties, comme suit :

$$M_R B \dot{\nu} + C_R B(\nu) \nu = \tau_{env} + \tau_{hydro} + \tau_{pro} \quad (4.2)$$

$$\tau_{hydro} = -M_A \dot{\nu} - C_A(\nu) \nu - D(|\nu|) \nu - g(\eta) \quad (4.3)$$

la première partie concerne la dynamique d'un corps rigide dans l'équation ((4.2)) et la seconde décrit les formulations hydrodynamiques (l'équation(4.3)). La définition des paramètres de ce modèle sont fournies dans le tableau 4.4.

La matrice d'inertie M_{RB} est défini dans l'équation (4.4), ou m est la masse du système et $r_G = [x_G, y_G, z_G]^T$ est le vecteur reliant O_b (l'origine de B-frame) et C_G

Parameteres	Description
M_{RB}	Matrice d'inertie de l'AUV
M_A	Matrice de masse ajoutée
C	Matrice de la force de Coriolis exercée sur l'AUV
C_A	Matrice de la force de Coriolis exercée sur la masse ajoutée
$D(v)$	Matrice des coefficients d'amortissement
$g(\eta)$	Vecteur des forces et des moments résultants
τ_{env}	Perturbations extérieurs (vents, courant et vagues)
τ_{hydro}	Vecteur des forces et des moments hydrodynamiques
τ_{pro}	Vecteur des forces et des moments propres

TABLE 4.4 : Nomenclature des notations utilisées dans le modele de l'AUV

(le centre de gravité du robot). Si $r_G = 0$, à savoir, $O_b = C_G$, alors la matrice M_{RB} sera simplifié. Par ailleurs, le système étant symétrique, la matrice d'inertie peut être exprimée ainsi :

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Comme souligné [Fos02], Les forces de rappel et les moments exprimé par le vecteur $g(\eta)$ peuvent être simplifié comme dans (4.5), ou $BG = [BG_x, BG_y, BG_z]^T$ est la distance entre C_G et C_B (centre de flottabilité).

$$g(\eta) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -BG_y W \cos\theta \cos\phi + BG_z W \cos\theta \sin\phi \\ -BG_z W \sin\theta + BG_x W \cos\theta \sin\phi \\ -BG_x W \cos\theta \sin\phi - BG_y W \sin\theta \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

La force de gravité W est approximativement égale à la force de flottabilité B . Dans l'équation (4.6), g est la pesanteur, ρ est la densité du fluide, et ∇ est le volume du fluide déplacé pendant un mouvement.

$$W = mg, B = \rho g \nabla \quad (4.6)$$

En exprimant les équations (4.2) et (4.3) dans le repère fixe NED-Frame à travers la relation exprimée dans l'équation (4.1), on obtient alors les équations suivantes :

$$M^* \ddot{\eta} + D^*(|\nu|)(\dot{\eta}) + g^*(\eta) = \tau_{pro} + \tau_{env} \quad (4.7)$$

avec,

$$M^* = J^{-T}(\Theta)(M_{RB} + M_A)J^{-1}(\Theta); D^*(|\nu|) = J^{-T}D(|\nu|)J^{-1}(\Theta) \text{ et} \\ g^*(\eta) = J^{-T}g(\eta)$$

Deux paramètres hydrodynamiques de masse ajoutées $M_A \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ et d'amortissement $D(|\nu|) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, doivent être soigneusement choisis dans le modèle du robot. La matrice de masse ajoutée M_A est une conception virtuelle représentant les forces et les moments hydrodynamiques. La matrice d'amortissement du fluide $D(|\nu|)$ se constitue de quatre composants, comme décrit dans l'équation (4.8) :

$$D(|\nu|) = D_P(|\nu|) + D_S(|\nu|) + D_W(|\nu|) + D_M(|\nu|) \quad (4.8)$$

La matrice des potentiels d'amortissement $D_P(|\nu|)$, La matrice de l'amortissement causé par les sections droites du robot $D_S(|\nu|)$ appelé en anglais 'skin friction matrix', La dérive de l'onde d'amortissement $D_W(|\nu|)$ appelé en anglais 'Wave drift damping' et la matrice d'amortissement du au contact causé par les arêtes de du robot $D_M(|\nu|)$. Dans notre cas, deux d'entre eux peuvent être ignorés. Tout d'abord, d'après [Fos02] $D_P(|\nu|)$ est négligeable comparé aux trois autres termes. Ensuite, notre robot n'agit pas en surface ce qui réduit énormément l'effet des vagues sous une certaine profondeur $D_W(|\nu|)$. Seulement frottement $D_M(|\nu|)$ et $D_S(|\nu|)$ sont à étudier.

Dans [Fos02], le terme d'amortissement comporte deux parties : une linéaire et l'autre quadratique. Il est difficile de dissocier leurs contributions. Pour cela, $D(|\nu|)$ peut s'écrire de la manière suivante :

$$D(|\nu|) = D + D_n(|\nu|) \quad (4.9)$$

Avec D est la matrice d'amortissement linéaire et $D_n(|\nu|)$ est la matrice d'amortissement quadratique. L'effet de D s'affaiblit à haute vitesse et dans ce cas on peut le négliger or dans le cas contraire c'est $D_n(|\nu|)$ qui est plutôt négliger. $D_n(|\nu|)$ est exprimé ainsi [Fos02] :

$$D_n(|\nu|) = -\frac{1}{2}\rho_d C_D(R_n)AU|\nu| \quad (4.10)$$

avec U la vitesse du robot, ρ_d la densité de l'eau de mer, A est la section droite du robot qui s'oppose au mouvement $C_D(R_n)$ est le coefficient d'amortissement, qui s'exprime en fonction du nombre de Reynolds R_n .

$$R_n = \frac{\rho_d U D_{CL}}{\nu_{is}} \quad (4.11)$$

Avec ν_{is} est la viscosité de l'eau de mer [12] et D_{CL} est la longueur caractéristique.

Paramètres	Valeurs
U	entre 0 et 1 m/s
D_{CL}	0.5 m
R_n	entre 10^5 et 10^6
ν_{is}	$1.56 \cdot 10^{-6}$ Kg/s.m
ρ_d	1023 Kg/m^3

TABLE 4.5 : Les valeurs des différents paramètres hydrodynamique

Pour calculer la matrice d'inertie, on se base sur la relation suivante :

$$m = \int_V \rho_m dV, \quad I = \int_V r^2 \rho_m dV \quad (4.12)$$

Avec ρ_m est la densité du volume élémentaire dV , V est le volume du robot, r est la distance entre un élément de volume dV and C_G .

La complexité de la géométrie du robot CISCREA et la variété des composants qui le constitue font du calcul des matrices M_{RB} (matrice d'inertie du robot sous marin) (4.12) et M_A (matrice de masse ajoutée) ainsi que $D(|\nu|)$ selon l'équation (4.12) une tâche impossible. Dans ces travaux de thèse R. Yang [YCM⁺14] a déterminé leurs valeurs par simulation ensuite par expérimentation à l'aide des logiciels de simulations (Wamit, MCC et ANSYS-CFX) (voir les équations (4.13),(4.14) et le tableau 4.6).

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} 15.643 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 15.643 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15.643 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2473 & 0 & 0.0029 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.3698 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0029 & 0 & 0.3578 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$M_A = \begin{bmatrix} 11.985 & -0.091 & -0.105 & 0.039 & 0.308 & 0.012 \\ 0.149 & 20.261 & -0.147 & 0.085 & -0.013 & -0.758 \\ 0.111 & -0.129 & 67.141 & -0.033 & 2.530 & 0.064 \\ 0.122 & 0.319 & -0.056 & 0.385 & 0.003 & -0.011 \\ 0.407 & -0.001 & 2.543 & -0.002 & 0.791 & 0.002 \\ -0.003 & -0.758 & 0.064 & -0.003 & 0.004 & 0.138 \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Vitesse (m/s)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
Avance (N)	0.287	1.146	2.577	4.579	7.222
Dérive (N)	0.537	2.14	4.815	8.561	13.382
Ascension (N, positive)	0.51	3.319	7.47	13.28	20.751

TABLE 4.6 : La valeur de la force d'amortissement pour des différents vitesses linéaires

4.4 L'architecture du simulateur

Avant de tester en mer ces stratégies de coordination, un outil de modélisation a été développé à partir du logiciel Blender, simulant à la fois l'environnement

sous-marin (voir annexe B), les capteurs optiques et la dynamique des robots. Chaque robot est un script python interagissant avec l'environnement Blender commun à l'ensemble du groupe. Les robots modélisés correspondent aux AUVs CISCREA de l'ENSTA Bretagne. Une technique de type LI-FI est adoptée pour la communication et afin de faciliter l'identification des robots en mission, chaque AUV est muni d'un barre-code lumineux.

Notre outil logiciel a été développé sur la base du moteur de jeu de Blender "Game engine" ([Ble94]). Des fonds marins réalistes ont été insérés à travers des modèles numériques de terrain acquises au cours de campagnes hydrographiques sur des fonds marins réels.

Le robot simulé est décrit par un ensemble d'équations d'états et des coefficients hydrodynamiques déterminés au part avant à travers des expérimentations avec des robots réels. Chaque robot est représenté par un script Python qui utilise des sockets pour communiquer avec Blender.

Le robot envoie ses commandes moteurs à Blender qui de sa part résout les équations dynamiques en utilisant le Bullet solveur, afin de définir la nouvelle position et l'orientation du robot. En même temps, la capacité de rendu de Blender permet de fournir au robot l'image courante du flux vidéo acquis par sa caméra embarquée. Afin d'être en mesure de simuler la sortie vidéo de chaque AUV, Blender distribue le rendu de la scène sur plusieurs ordinateurs. Pour atteindre cet objectif le simulateur a été constitué de trois couches (voir la figure 4.4). La communication entre les couches repose sur la sérialisation d'objet par Python sur des sockets TCP/IP ([Pyt13]). Les 3 couches du simulateur sont : la couche physique, la couche rendue et la couche de contrôle (voir la figure 4.4).

4.4.1 La couche physique

Pour chaque AUV, les entrées de la couche physique sont les commandes des moteurs et les sorties sont la position, l'orientation et l'attitude (telle que perçue par les capteurs de l'AUV) dans la frame suivante. Pour la caméra vidéo à bord de chaque

Simulator architecture

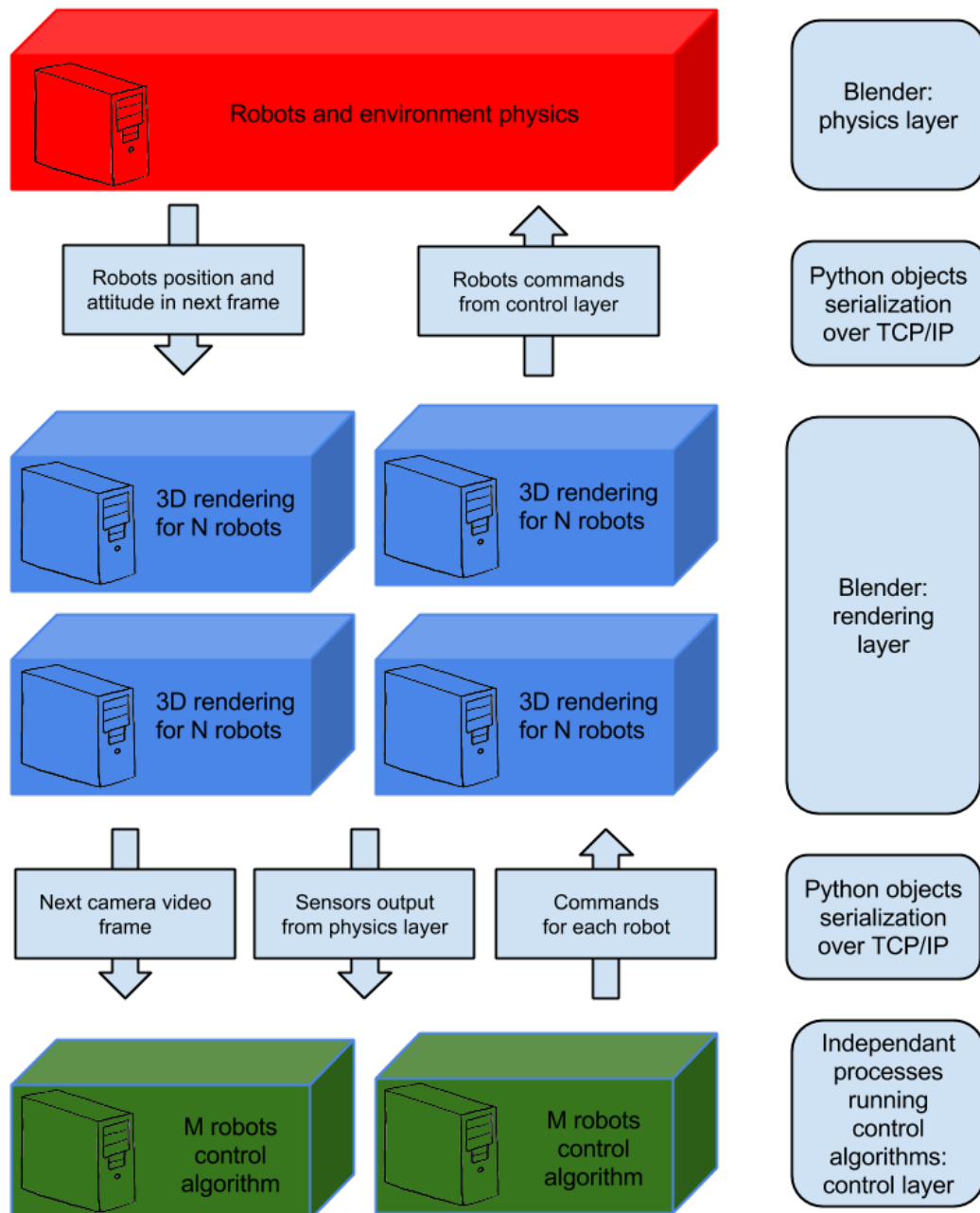


FIGURE 4.4 : Architecture globale de la plateforme de simulation.

AUV, la couche de rendu produit une image vidéo en utilisant l'environnement Blender et la trajectoire simulée du véhicule.

4.4.2 La couche rendu

Comme son nom l'indique cette couche est en charge de la tâche intensive du GPU qui consiste principalement à rendre la sortie vidéo d'un, ou plusieurs AUV, selon la position et l'attitude qu'il vient de recevoir de la couche physique (voir la figure 4.4). Elle est composée de la scène Blender, qui se connecte à la couche physique et récupère le fond marin et le modèle 3D de l'AUV pour fournir le rendu. L'utilisateur peut lancer de nombreuses couches de rendu sur plusieurs ordinateurs s'il le souhaite. Les premiers tests ont montré que la couche physique peut gérer jusqu'à quarante AUV. Une instance de la couche rendue peut-être en charge d'une ou plusieurs sorties vidéo. Le facteur limitant est le GPU de l'ordinateur utilisé. Cette couche agit comme un relais entre d'une part la couche de contrôle qui envoie les commandes de moteur et d'autre part la couche physique qui transmet la sortie des capteurs et il affiche une image vidéo pour chaque AUV (voir la figure 4.6). Cette couche agit comme un relais des commandes de moteur et des sorties capteurs entre la couche de contrôle et la couche physique. Elle permet ainsi d'afficher une image vidéo pour chaque AUV.

4.4.3 La couche de contrôle

Cette couche représente le support sur lequel on implémente l'algorithme de commande à tester (voir la figure 4.5). Elle n'a pas de lien direct avec Blender, sauf qu'elle reçoit les données simulées (profondeur, roulis, tangage, cap, image acquise par la caméra). L'utilisateur peut lancer autant d'instances de la couche de contrôle que le nombre d'AUV simulés (voir la figure 4.4). Selon ces données et les résultats de calcul de l'algorithme de commande, cette couche délivre en sortie les commandes aux moteurs de l'AUV (voir la figure 4.4 et 4.5). Une configuration typique pour ce simulateur est :

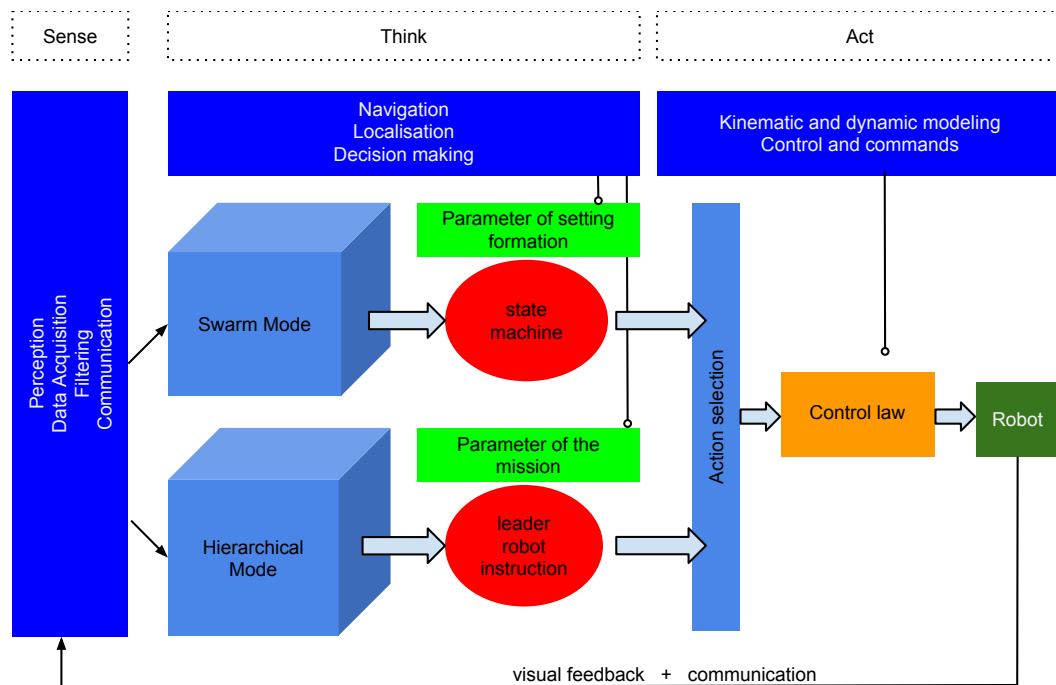


FIGURE 4.5 : La chaîne de contrôle du robot

- Un ordinateur en charge de la couche physique pour les vingt AUV.
- Quatre ordinateurs en charge de la couche de rendu pour chaque cinq AUV (voir la figure 4.4).
- Autant d'ordinateurs nécessaire pour calculer le résultat de l'algorithme de contrôle pour vingt robots indépendants (voir la figure 4.4).

4.4.4 L'interaction entre les AUVs et le simulateur

4.4.4.1 principe de fonctionnement du simulateur

Le script de Blender est responsable de l'évolution de la simulation dans l'espace et dans le temps. À Chaque incrément de temps, il met à jour les positions des robots dans l'environnement marin. Ensuite, le script embarqué de l'AUV récupère le rendu de la caméra embarquée sur celui-ci. Ce rendu fera l'objet d'un traitement d'images pour extraire les attributs nécessaires et ainsi sélectionner le mode de fonctionnement et ensuite calculer la puissance d'envoyer à chaque propulseur du robot (voir la figure 4.6). Finalement, sur la base du modèle dynamique de l'AUV,

les nouvelles coordonnées du robot sont calculées. Ce principe de fonctionnement est détaillé dans la figure 4.6. Dans notre cas, le mode de communication client-serveur

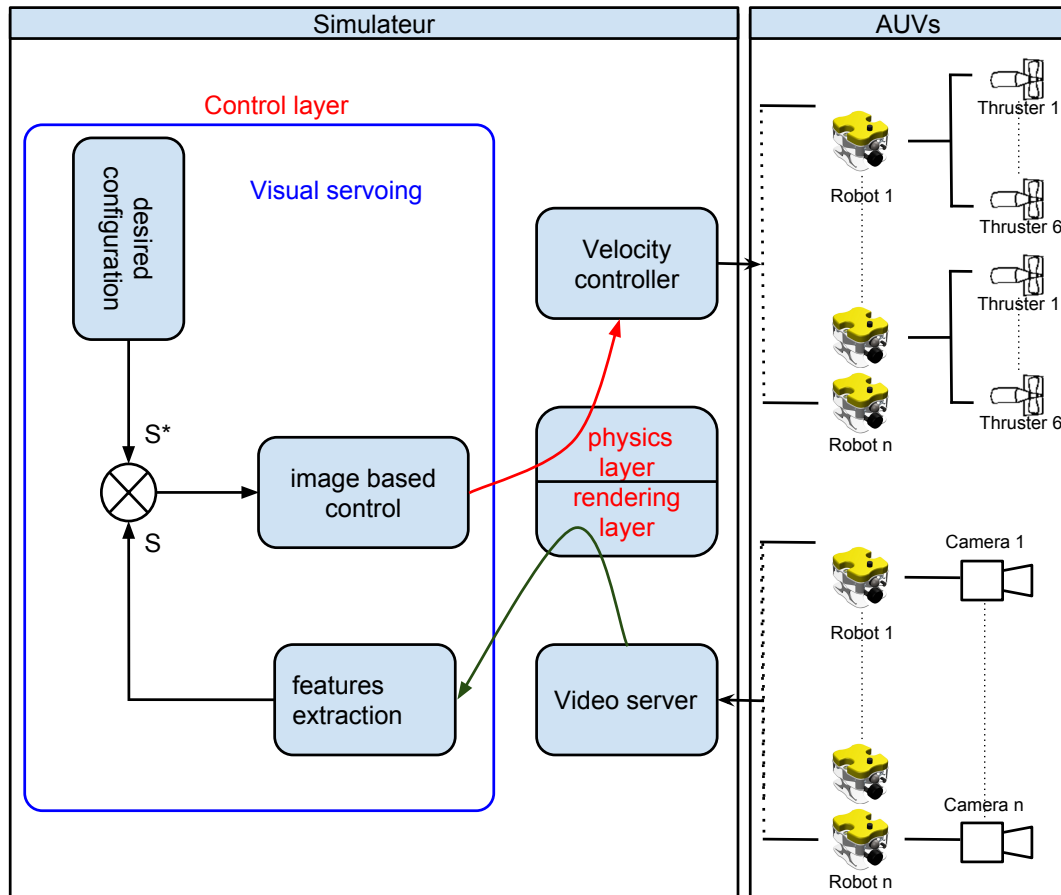


FIGURE 4.6 : Schéma représentatif du principe d'échange d'information entre le simulateur et les AUVs.

a été choisi. Les scripts robots sont qualifiés en tant que clients. Ils envoient des requêtes au script Blender considéré comme serveur qui attend les demandes des clients (les positions des robots) et y répondre (rendu). La fréquence du rendu graphique est de 10 images par seconde (voir la figure 4.6).

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'architecture de notre plateforme de simulation composée de 3 couches. Nous avons en particulier explicité la fonction de chacune de ses couches et leurs rôles sur le système conçu. On a aussi justifié le choix

de l'outil logiciel Blender pour la mise en place d'un groupe de robot coopérant. Notre simulateur a été créé en veillant à respecter un certain nombre de contraintes. Parmi ces contraintes, certaines ont été identifiées comme étant les contraintes que peut rencontrer une meute de robots sous-marin dans un l'environnement marin. Il s'agit principalement de reproduire les problèmes de la vision sous-marine, des forces hydrodynamiques des problèmes des communications sous-marines. Dans ce chapitre, nous avons également proposé un modèle dynamique au robot CISCREA afin qu'il puisse interagir correctement avec le milieu marin sur Blender et préparer les missions simulées de la même façon que les missions réelles.

Chapitre 5

Analyse et discussion des résultats

Après avoir proposé une architecture hybride de coordination pour un groupe de robots sous-marins, nous avons évoqué la conception d'une plateforme de simulation, la modélisation des éléments intervenants dans une mission multi-robots sous-marins et les caractéristiques physiques de chacun d'eux. Nous présentons maintenant l'implémentation de notre stratégie hybride proposée dans le chapitre 2 sur un groupe de robots CISCREA à travers notre outil de simulation présenté dans le chapitre 4 dans le but de tester l'efficacité et d'évaluer la stabilité des deux modes essaim et hiérarchique. Ceci en faisant, d'une part plusieurs essais en simulation afin d'effectuer une étude statistique permettant d'évaluer le taux de convergence, le temps d'exécution de l'algorithme de mise en formation V et les différents facteurs influant sur ces deux paramètres. D'autre part, en testant de différentes lois d'asservissement visuel en mode hiérarchique afin d'aboutir à un contrôle robuste des robots suiveurs.

5.1 Introduction

Pour valider notre stratégie de coordination hybride, on a mis en place un groupe de 3 robots CISCREA afin de déterminer les différents paramètres permettant d'avoir une estimation sur la capacité de cette stratégie à réussir une mission de

navigation en formation constituée d'une première phase de mise en formation et d'une deuxième d'acquisition vidéo. Pour cela, on a décidé de mener une campagne d'essai en simulation. À chaque essai les robots sont mis à l'eau d'une façon aléatoire suivant une loi normale. Ensuite, les positions de chacun sont enregistrées au cours des deux modes de fonctionnement pour être analysé afin d'extraire d'autres paramètres nécessaires à la validation de notre stratégie. En outre, nous étudions l'influence de l'erreur de convergence de la formation au début de la mission sur le temps d'exécution de la mise en formation et sur l'erreur de convergence de la formation en fin de la procédure. Ceci permettra de raffiner la loi de contrôle/commande des robots et d'améliorer notre algorithme afin d'élever le taux de réussite du mode essaim.

5.2 Validation des algorithmes de vision par expérimentation

L'asservissement visuel est un processus de régulation en boucle fermée, qui en tant que tel a pour but de faire atteindre aux variables du système (les indices visuels) certaines consignes, typiquement par le biais de la commande des vitesses de déplacement du robot. Cette régulation est également présente dans les approches dites Look and Move, dans lesquelles l'asservissement est fait sur la situation 3D de l'objet sur lequel on s'asservit.

Dans cette technique, la localisation 3D issue de l'analyse de l'image conduit à l'évaluation de la situation de l'objet par rapport au capteur. Cette connaissance permet le calcul des commandes du robot dans l'espace cartésien, dans le but de faire évoluer la situation entre le capteur et l'objet suivant un profil prédéfini. Cette variante est similaire à la commande en boucle ouverte. Dans l'expérimentation, on a choisi des cibles à géométrie connue, et on se fixe comme objectif la réalisation de la tâche suivante : Positionner la caméra par rapport à une cible fixe de telle sorte que cette dernière, étant initialement dans une région quelconque du champ de vision, soit après mouvements du robot, au centre de l'image

5.2.1 Plateforme expérimentale

L'objectif de cette partie est d'implémenter réellement les techniques de traitement d'images et d'asservissement visuel testées jusqu'à maintenant en simulation sur des robots CISCREA. Ceci permettra alors de prendre en compte et de traiter certaines contraintes matérielles et logicielles rencontrées en pratique. Afin d'évaluer l'efficacité et la robustesse des algorithmes de traitement d'images développés, ces derniers ont été implémentés sur des robots AC-ROV. Des expérimentations ont été menées dans la piscine d'essai de l'ENSTA Bretagne pour la recherche et le suivi d'un objet fixe dans celle-ci (voir la figure 5.1(a)).

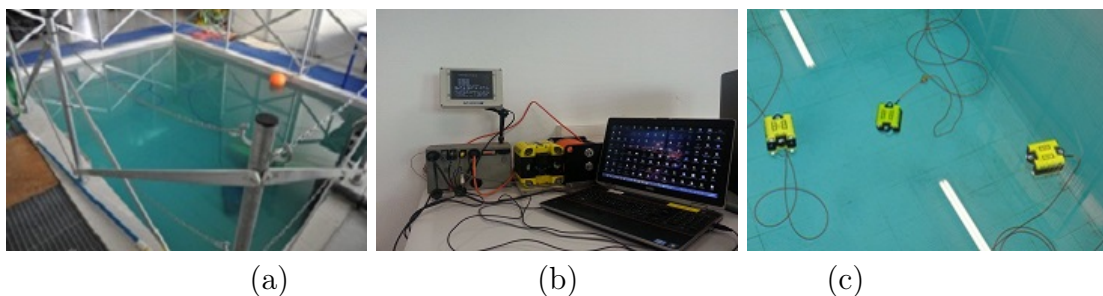


FIGURE 5.1 : Environnement et matériel d'expérimentation. (a) La piscine de l'ENSTA Bretagne, (b) La plateforme expérimentale, (c) Les AC-ROVs en expérimentation.

l'AC-ROV est un robot filoguidé qui est piloté manuellement à travers un joystick (voir la figure 5.1(c)). Afin d'assurer cette phase d'essais réels, une plateforme a été mise en place pour automatiser l'AC-ROV. Ceci en remplaçant le joystick par une unité de traitement qui assurera son contrôle par vision (voir la figure 5.1(b)).

5.2.2 Principe et objectif de la mission

La mission du robot AC-ROV dans ces essais a été la recherche d'une boîte jaune dans la piscine ensuite la centrer dans l'image du caméra. Pour cela l'objectif à chaque fois a été le calcul des coordonnées du barycentre de la boîte jaune et les utiliser dans la boucle de contrôle et d'asservissement du robot afin de la garder au centre de l'image au cours de son mouvement. Ce qui veut dire annuler l'erreur

entre les coordonnées du barycentre et celle du centre de l'image. Pour cela un contrôleur PID a été mis en place afin de réguler les mouvements du robot (voir la figure 5.2).

5.2.3 Loi de commande par asservissement visuel utilisé

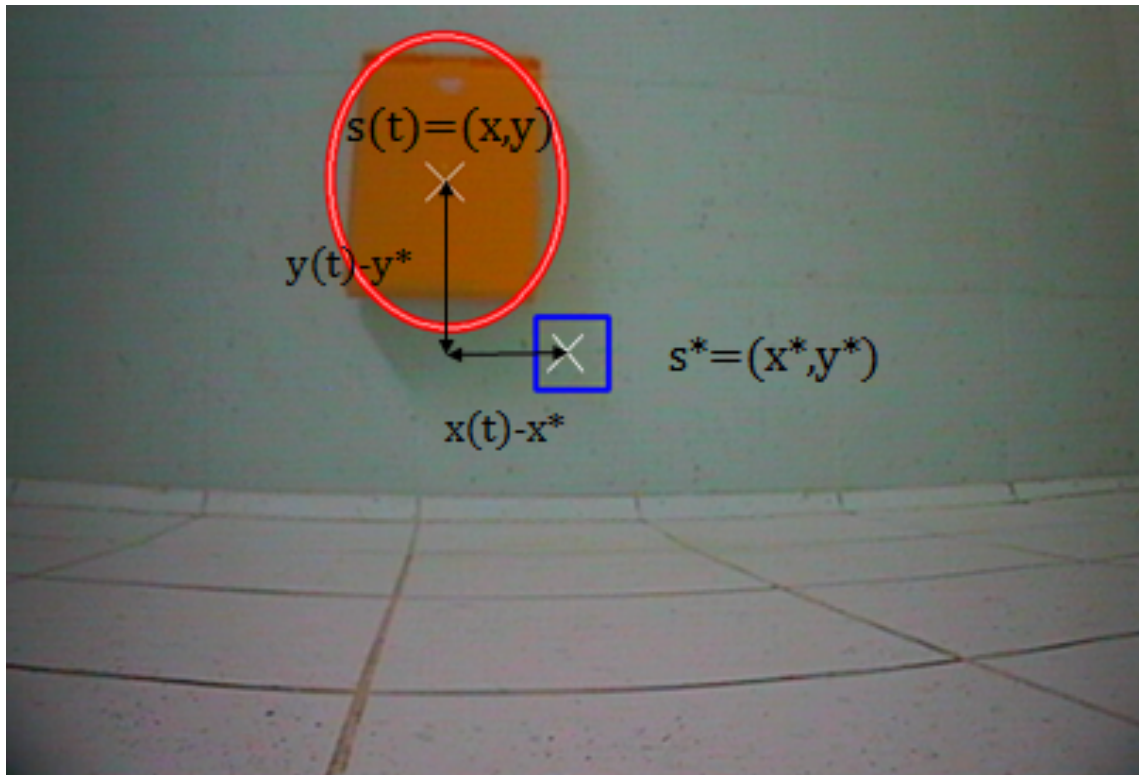


FIGURE 5.2 : Image acquise durant le centrage de la boîte jaune illustrant l'erreur entre le centre de la cible et le centre de l'image

Au début, l'AC-ROV entame sa mission par une phase de recherche de la cible dans la piscine en faisant une rotation au tour de son axe z . Dès que celui-ci détecte la présence de la boîte jaune sur l'image de sa camera, il utilise une technique d'asservissement visuel 2D qu'on a développée pour centrer l'objet. Les techniques d'asservissement visuel 2D utilisent directement les informations visuelles, notée s , extraites de l'image. La tâche à réaliser est alors spécifiée directement dans l'image en termes d'indices visuels de référence s à atteindre. La loi de commande consiste alors à contrôler le mouvement de la caméra de manière à annuler l'erreur entre les informations visuelles courantes $s(t)$ et le motif désiré s^* . Dans notre cas le signal $s(t) = (x, y)$ n'est que le couple de coordonnée en

pixel du barycentre de la boîte jaune dans l'image et $s^*=(x^*, y^*)=(0,0)$ est les coordonnées du centre de l'image représentant la position désirée. Ayant comme objectif d'annuler l'erreur (\mathbf{E}) entre ces deux coordonnées (voir l'équation(5.1)), les lois de commande des vitesses d'immersion et d'embarquée dépendent directement de celle-ci (voir l'équation(5.1)). Nous avons choisi de tester un régulateur classique stabilisant et ayant de bonnes performances en précision. Pour cela, un correcteur PID a été mis en place afin d'asservir en mouvement le robot. On obtient ainsi la commande $\mathbf{U}(t)$ qui représente le vecteur consigne à envoyé au robot à l'instant t en vitesse d'immersion et d'embarquée (voir l'équation(5.2)).

$$E = s(t) - s^* = \begin{pmatrix} x - x^* \\ y - y^* \end{pmatrix} \quad et \quad U = f(E) = \begin{pmatrix} vx \\ vy \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

$$U(t) = K_p \cdot E(t) + K_d \cdot \frac{dE(t)}{dt} + K_i \cdot \int E(t) dt \quad (5.2)$$

avec K_p , K_d et K_i sont respectivement les gains proportionnels, dérivés et intégrateurs déterminés de manière expérimentale.

5.2.4 Méthodes de calcul du barycentre de la cible

Plusieurs techniques de calcul des coordonnées du barycentre de la boîte jaune ont été utilisé :

5.2.4.1 technique de seuillage

Principe : Cette méthode se base essentiellement sur l'extraction de la boîte jaune à partir de l'image en utilisant l'opération de seuillage sur celle-ci en niveaux des gris et le calcul de son barycentre. **Étapes de traitement** : Tout d'abord, on récupère l'image de la vidéo transmise par la caméra 5.3(a). Ensuite, on procède à une conversion de l'image de l'espace RGB aux niveaux de gris (voir la figure 5.3(b)). Par suite, un seuillage est appliqué afin d'avoir une image en noir et blanc.

Le seuil est bien choisie de façon à ce que seul les pixels jaunes sur l'image réelle seront en blancs sur l'image seuillée (voir la figure 5.3(c)). Enfin, le barycentre des pixels à valeurs non nulles est calculé et affiché sur l'image résultat en rouge sur la figure 5.3(d). Ses deux coordonnées seront ensuite renvoyés à la boucle de commande afin de calculer les bonnes consignes moteurs de l'AC-ROV. **Algorithmes** : Cette

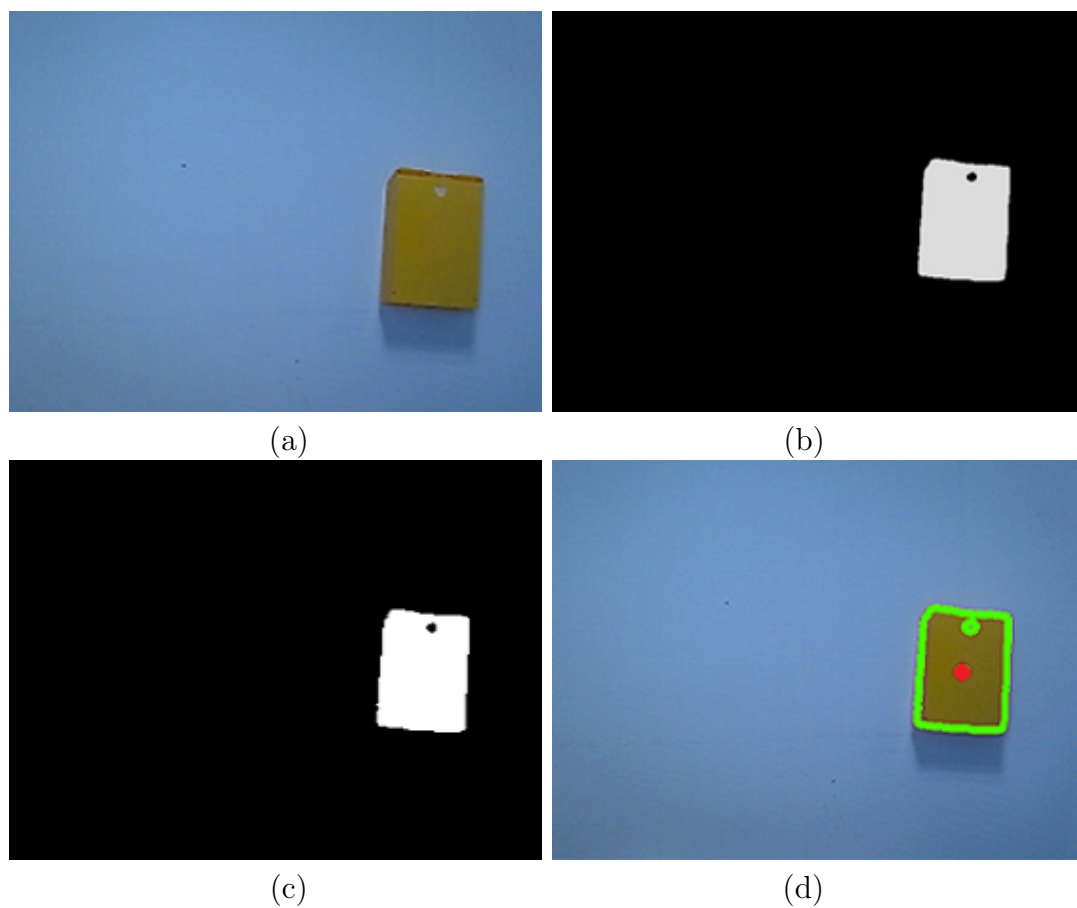


FIGURE 5.3 : Résultat de la technique de seuillage pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) image réelle, (b) image convertit en niveaux de gris, (c) : image seuillée, (d) : image résultat.

méthode est assurée par un programme principale qui a l'entête suivante :

```
IplImage* detection _ objet _ ( IplImage* image, double seuil)
```

elle consiste à appliquer d'une façon séquentielle sur l'image rendu par la caméra les opération suivante :

- Seuillage de l'image (seuil passé en argument)
- Calcul du barycentre (moyenne des coordonnées des pixel non nuls)
- Croissance de région à partir du barycentre

- Extraction du contour de la région extraite

Arguments :

- IplImage* image : image à traiter

- double seuil : seuil de l'opération de seuillage

Objet renvoyé : image après traitement

une fonction est appelée par le programme principale pour calculer le barycentre de la boîte jaune.

```
void calcCentre(IplImage* img, CvPoint* centre)
```

Arguments :

- IplImage* img : image à traiter

- CvPoint* centre : barycentre calculé

5.2.4.2 technique de conversion RGB HSV

Principe : Cette méthode consiste à convertir l'image récupérée de l'espace RGB à l'espace HSV. Cet espace a la particularité de séparer l'information de luminance de la couleur et décrit la couleur selon deux attributs, sa teinte et sa saturation. Ensuite une binarisation selon les paramètres H (teinte) et S (saturation) est effectuée afin d'isoler la boîte jaune. L'extraction de la boîte jaune de l'image devient de plus en plus précise en utilisant en fin de la procédure de traitement les opérateurs morphologique nécessaires. La procédure de traitement détaillée est décrite dans le paragraphe qui suit. **Étapes de traitement** : Nous allons tout d'abord convertir notre image RGB en une image en HSV car ainsi nous pourrions nous baser sur la teinte et la saturation de la couleur en laissant plus libre la brillance de cette dernière pour la recherche de la boîte (voir la figure 5.4(b)). Ceci nous permet, en partie seulement, d'éliminer les problèmes d'éclairage.

Ensuite, un mask sera créé afin de représenter l'image binarisée en mettant en blanc (la valeur 255) les pixels ayant les mêmes valeurs H (teinte) et S (saturation) que la couleur jaune. Une fonction spéciale sur OpenCv nous permet d'appliquer cette opération : `cvInRangeS(hsv, cvScalar(h - tolerance -1, s - tolerance, 0), cvScalar(h + tolerance -1, s + tolerance, 255), mask)`; Arguments :

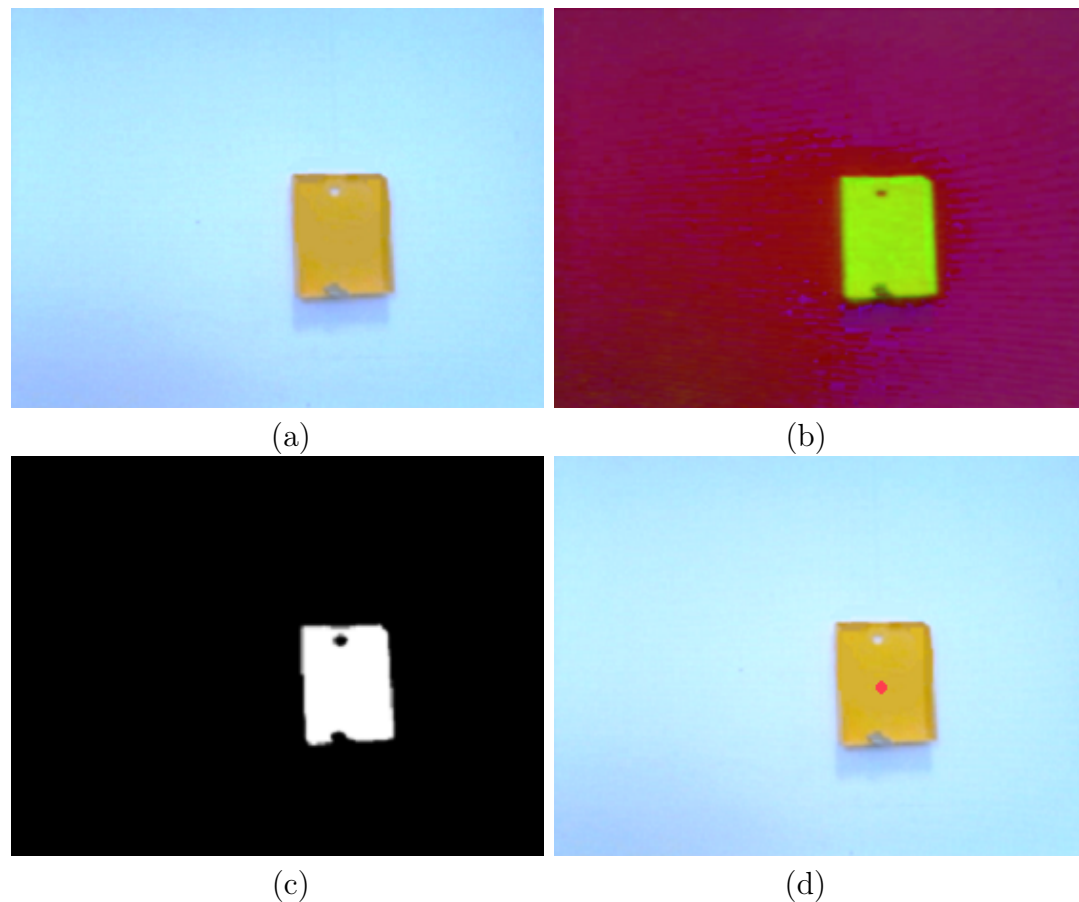


FIGURE 5.4 : Résultat de la technique de conversion rgb/hsv pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) image réelle, (b) image convertit en niveaux de gris, (c) : image seuillée, (d) : image résultat.

- IplImage* hsv : image convertie de l'espace RGB à l'espace HSV à traiter
- IplImage* mask : image binarisée
- double* h,s : les valeurs de la teinte h et de la saturation s correspondant à la couleur jaune
- double* tolérance : une valeur de tolérance pour la teinte H et la saturation S

Nous obtenons alors une image binaire où la couleur jaune est représentée par une zone blanche avec des taches éparpillées (voir la figure 5.4(c)). Pour se débarrasser de ces dernières, une ouverture morphologique est effectuée. Celle-ci se fait par l'application de deux opérateurs morphologiques. Tout d'abord l'image subit une opération d'érosion pour supprimer les pixels isolés. Ensuite elle est soumise à une opération de dilatation afin de renforcer les groupes denses de pixels. Enfin, on calcule les coordonnées du barycentre à partir des pixels blancs persistant sur

l'image finale. Il est enfin marqué en rouge sur l'image résultat (voir la figure 5.4(d)).

Algorithmes : Cette méthode est assurée par un programme principale qui a l'entête suivante :

```
IplImage* isolation_ objet _ barycentre( IplImage* image, double h, double s, double tolérance)
```

Objet renvoyé : image après traitement

Arguments :

- IplImage* image : image à traiter

- double h,s,tolérance : les valeurs des paramètres de teinte, saturation et tolérance
une fonction est appelé par le programme principale pour calculer le barycentre de la boîte jaune.

```
void calcCentre(IplImage* img, CvPoint* centre)
```

Arguments :

- IplImage* img : image à traiter (image résultante de l'opération d'ouverture morphologique)

- CvPoint* centre : barycentre calculé

5.2.4.3 technique de séparation des canaux r g et b

Principe : La troisième technique consiste à séparer les canaux R, G et B de l'image à traiter et les seuiller séparément, puis à opérer un ET logique entre les images binaires obtenues. C'est une méthode qui permet d'éliminer les pixels sur-éclairés, trop sombres ou insuffisamment saturés. La procédure de traitement est détaillé dans le paragraphe qui suit.

Étapes de traitement : Tout d'abord nous commençons par séparer les trois canaux R, G et B de l'image pour obtenir trois image imR, imG et imB (voir les figures 5.5(a),(b) et(c)) à travers la fonction d'OpenCv : `cvSplit(image,imB,imG,imR,NULL)`. Ensuite on procédera au seuillage de chacune d'elles. Enfin, en attribuant les bonnes valeurs de seuillage, on obtient les figures 5.5(d),(e) et(f). Enfin, on additionne les trois images par l'opérateur logique ET. Ainsi on obtient les pixels correspondant

à la boîte jaune en blanc (voir la figure 5.5(g)). Il suffit alors de calculer les coordonnées du barycentre de ces pixels (voir la figure 5.5(h)).

Algorithmes : Cette méthode est assurée par un programme principal qui a

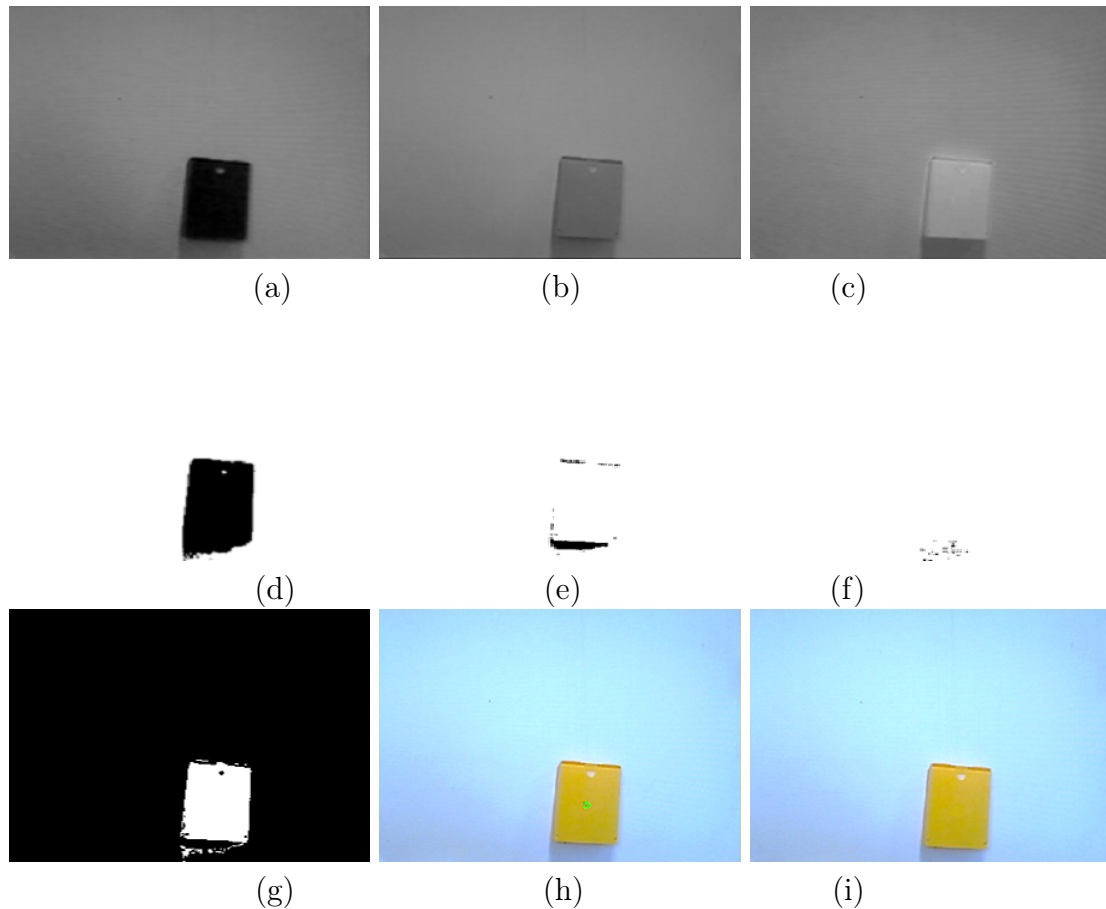


FIGURE 5.5 : Résultat de la technique de séparation des canaux R,G et B pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) :canal bleue de l'image réelle, (b) :canal vers de l'image réelle, (c) :canal rouge seuillé, (d) :canal bleue seuillé, (e) : canal vert seuillé, (f) : canal rouge seuillé (g) :image résultante de l'addition logique, (h) :image résultat, (i) :image réelle.

l'entête suivant :

```
IplImage* recherche _ objet _ barycentre( IplImage* image, double seuilR, double
seuilG, double seuilB)
```

Fonction d'extraction d'un objet à partir d'une image :

- Séparation des canaux r,g et b de de l'image
- Seuillage des trois images des relatifs aux canaux r,g et b (les seuils sont passés en argument)
- ET logique entre les images seuillées obtenues (élément par élément).

- Calcul du barycentre (moyenne des coordonnées des pixel non nuls)

Arguments :

- IplImage* image : image à traiter
- double seuilR : seuil de l'opération de seuillage sur le canal rouge
- double seuilG : seuil de l'opération de seuillage sur le canal vert
- double seuilB : seuil de l'opération de seuillage sur le canal bleu

Objet renvoyé : image après traitement

une fonction est appelée par le programme principal pour calculer le barycentre de la boîte jaune.

```
void calcCentre(IplImage* img, CvPoint* centre)
```

Arguments :

- IplImage* img : image à traiter
- CvPoint* centre : barycentre calculé

5.2.4.4 technique de suivi d'objet selon un modèle de correspondance

Principe : Cette méthode consiste à comparer ou mettre en correspondance les attributs extraits des images provenant de la caméra avec les attributs de l'objet à reconnaître extraits de modèles de celui-ci (en anglais Template). Ces modèles ne sont que des images de l'objet dans différentes conditions d'acquisition qui sont chargés avant le lancement du traitement. Cet algorithme permet l'identification des objets dans les images malgré les changements de prises de vue, les éventuelles occultations et les changements des conditions d'acquisition.

Étapes de traitement : cette méthode est constituée de trois étapes. Tout d'abord nous commençons par le chargement des modèles (Templates) de la boîte jaune suivi. Puis, on applique une opération de seuillage suivi d'une extraction des contours sur les images modèles de la boîte jaune et de les stocker dans la mémoire. Ensuite, on procède à l'extraction des contours de ces modèles. La deuxième étape consiste à détecter les contours des objets présents dans l'image acquise par la caméra puis à comparer ces contours avec ceux des images du modèle en utilisant la fonction spéciale de OpenCv :cvMatchShapes. Celle-ci nous retourne un entier qui est null en cas de correspondance entre les modèle de la boîte jaune et l'objet se trouvant

dans l'image du caméra sinon il prend une valeur de plus en plus grande moins il y a de correspondance. La troisième étape consiste à déterminer le barycentre de l'objet (boite jaune) localiser sur l'image (voir la figure 5.6).

Algorithmes : Cet algorithme est géré par une fonction effectuant un matching suivant les moments de Hu : `IplImage* matching(IplImage* image, double seuil, int nombretemplates, CvSeq** contours, string* identifiants, double differencemax)`

- Seuillage de l'image
- Extraction de l'ensemble des contours
- Matching de Hu avec des modèles

Arguments :

- `IplImage* image` : image à traiter
- `double seuil` : seuil de l'opération de seuillage
- `int nombretemplates` : nombre de modèles
- `CvSeq** contours` : contours des modèles
- `string* identifiants` : identifiants des modèles
- `double differencemax` : différence maximale pour le matching

Objet renvoyé : image après traitement

Cette dernière fait appel à une première fonction de chargement de modèles `int chargertemplates(int nombretemplates, string* files, int *valdernier, CvSeq** contours, CvMemStorage** storages)`

Arguments :

- `int nombretemplates` : nombre de modèles
- `string* files` : fichiers des modèles
- `int *valdernier` : indique si le contour est le dernier par ordre de longueur
- `CvSeq** contours` : contours extraits
- `CvMemStorage** storages` : stockage mémoire des contours extraits

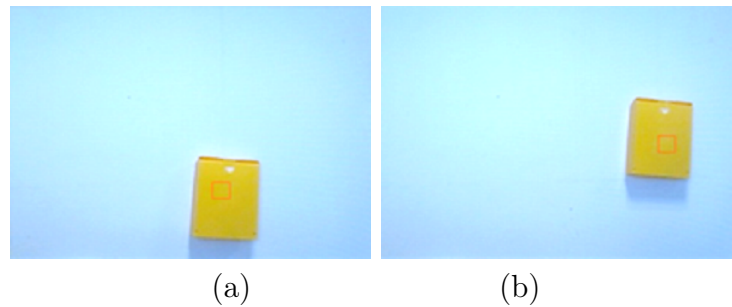


FIGURE 5.6 : Résultat de la technique de conversion rgb/hsv pour la détection d'une boîte jaune en piscine.(a) image réelle, (b)image convertit en niveaux de gris, (c) : image seuillée, (d) : image résultat.

5.2.4.5 technique choisie

Durant les essais en piscine, chacune des techniques de détection de la boîte jaune a été implémenté sur le robot AC-ROV dans le but de comparer leur efficacité dans des conditions réelles. Pour cela, on a enregistré à chaque essai l'évolution de la norme l'erreur E (5.1). Sachant qu'on utilise le même correcteur PID dans nos essais, la comparaison de la valeur et du temps de convergence de l'erreur pour chaque technique nous donnera une idée sur certains paramètres comme la réactivité et la stabilité de l'AC-ROV dans la mission.

Extraire des informations utiles des images acquises peut se révéler coûteux en temps de calcul ce qui affecte la réactivité du robot à centrer la cible sur l'image. Or en asservissant visuel il est nécessaire de contrôler les mouvements du robot à une cadence élevée pour garantir les plus grandes réactivité et stabilité possibles. On peut alors définir la réactivité comme étant la cadence d'échantillonnage de L'information visuelle qui doit être suffisamment grande par rapport aux constantes de temps mécaniques du robot. Dans notre cas, on peut la définir comme étant la rapidité de convergence de l'erreur E (5.1) à sa valeur finale. Tant dis que la stabilité se révèle dans la valeur de convergence de l'erreur. Plus elle est faible plus le robot est stable. Pour choisir une des méthodes de traitement d'images qui nous garantit une meilleure stabilité et une réactivité satisfaisante, on a analysé pour chacune d'elles les courbes de l'erreur E (5.1) durant les essais.

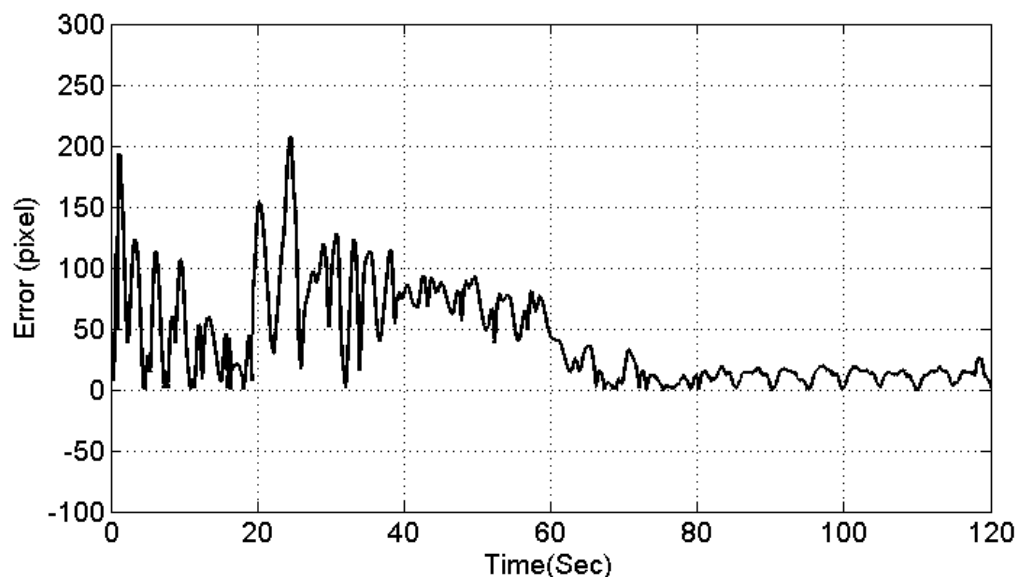


FIGURE 5.7 : L'évolution de la norme de l'erreur E (5.1) lorsque la méthode de conversion RGB/HSV est utilisée

L'image 5.7 illustre l'évolution de l'erreur E lors d'un essai expérimental dans lequel la technique de conversion RGB/HSV a été utilisée pour la détection de la boîte jaune et le calcul de son barycentre. L'erreur E (5.1) converge en 120 secondes d'essai vers une valeur finale variant entre 0 et 10 pixels.

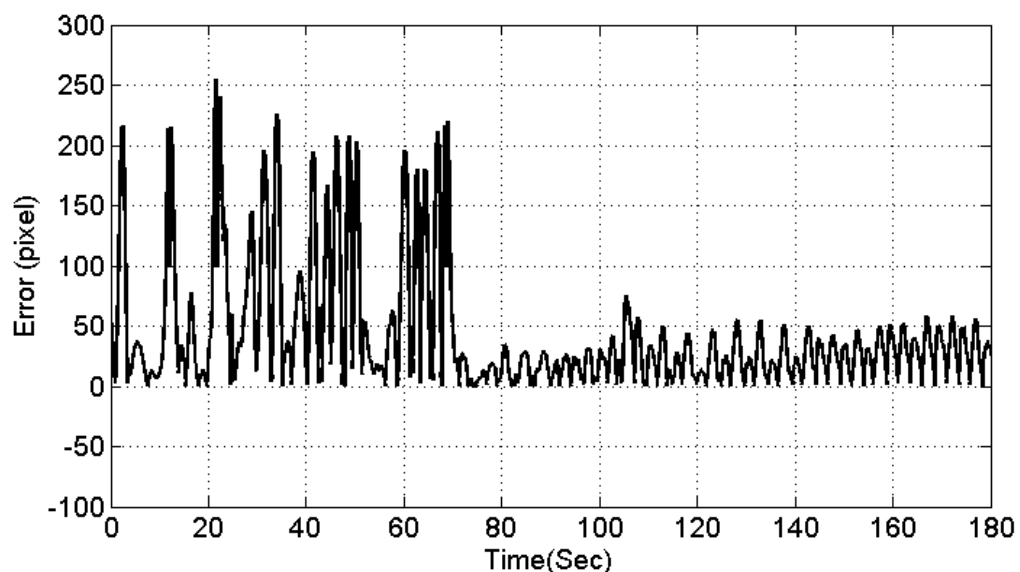


FIGURE 5.8 : L'évolution de la norme de l'erreur E (5.1) lorsque la méthode de séparation des canaux RGB est utilisée

En utilisant la méthode de séparation des canaux RGB, l'erreur E converge vers

une valeur comprise entre 0 et 50 pixels dans une durée de 180 secondes (voir la figure 5.8). Par contre, elle converge vers une valeur variante entre 0 et 25 pixels en 180 secondes en utilisant la méthode de seuillage (voir la figure 5.9).

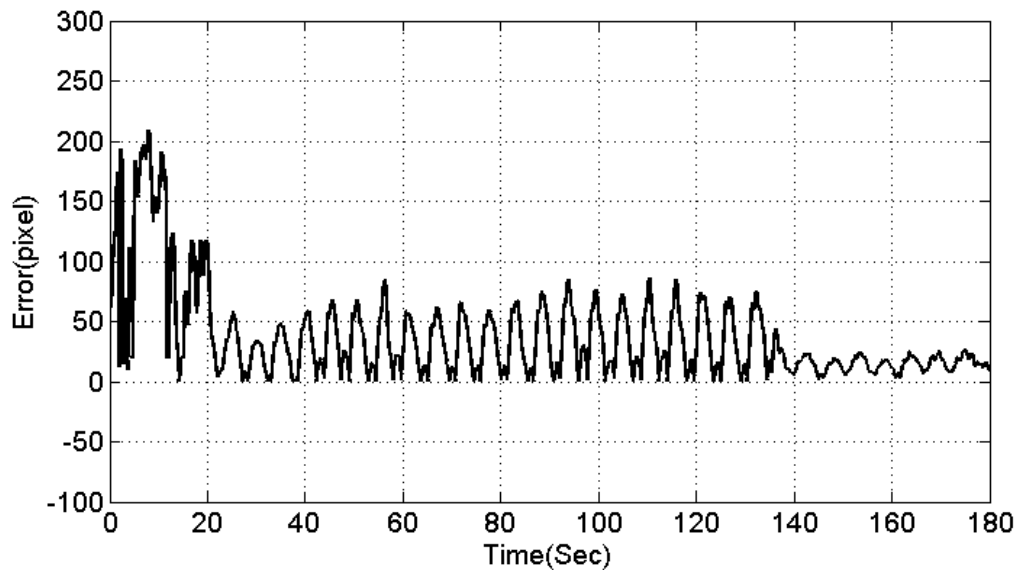


FIGURE 5.9 : L'évolution de la norme de l'erreur E (5.1) lorsque la méthode de seuillage est utilisée

On remarque alors qu'en utilisant la méthode de conversion RGB/HSV, d'une part le robot met moins de temps à converger vers sa valeur finale qu'à travers les autres méthodes ce qui prouve que la cadence de traitement d'images est élevée et que l'AC-ROV est assez réactif pour centrer la boîte jaune dans l'image. D'autre part, avec cette méthode l'erreur finale est la plus faible entre les valeurs des erreurs finales enregistrées par les autres méthodes ce qui prouve que l'AC-ROV est plus stable en utilisant la méthode de conversion RGB/HSV comme techniques de traitement d'images sous marines. Maintenant que cette méthode a prouvé son efficacité au niveau expérimental, on a décidé d'adopter cette méthode pour la détection, localisation et l'identification des robots en simulation.

5.3 Étude des caractéristiques en simulation de la stratégie de coordination hybride

5.3.1 Stabilité, convergence et robustesse de l'algorithme de mise en formation V (mode essaim)

Ces essais permettront de valider notre stratégie de coordination hybride et d'effectuer les réglages de contrôle/commande sur les robots sous-marins nécessaires pour atteindre un taux de réussite élevé de la mission de navigation en formation. Nous démontrons dans cette partie que l'algorithme de mise en formation implémenté est adapté à la mission au niveau temps de calcul et que la formation converge dans un certain délai pour construire la géométrie voulue (triangle équilatéral) à une erreur près. Nous étudions aussi l'erreur angulaire de chaque robot pour former un angle de 60 degrés avec ses deux voisins en fonction du temps d'exécution et on déduit enfin l'erreur globale de la géométrie de la formation par rapport à la forme désirée. En fixant un seuil d'erreur à partir duquel la formation est considérée stable, on peut déduire le taux de convergence de notre algorithme.

5.3.1.1 Évaluation de l'erreur de convergence

Considérons une exécution typique de l'algorithme de mise en formation V dans laquelle nous mettons à l'eau 3 robots CISCREA avec des positions et des orientations aléatoires suivant une loi normale. Pour comprendre mieux le déroulement de procédure de mise en formation triangle les résultats de 3 essais ayant des conditions initiales différentes ont été présentés sur la figure 5.10.

La figure 5.10 montre l'évolution des unités robotiques dans l'espace 2D à différents moments de l'exécution de l'algorithme. On y voit le déplacement des CISCREAs au cours du temps : initialisées au départ, ils se mettent à tourner autour de leur axe de rotation principal dans l'environnement marin à la recherche de leurs voisins par vision. Une fois que ces deux ont été localisé et leurs angles de détection ont été

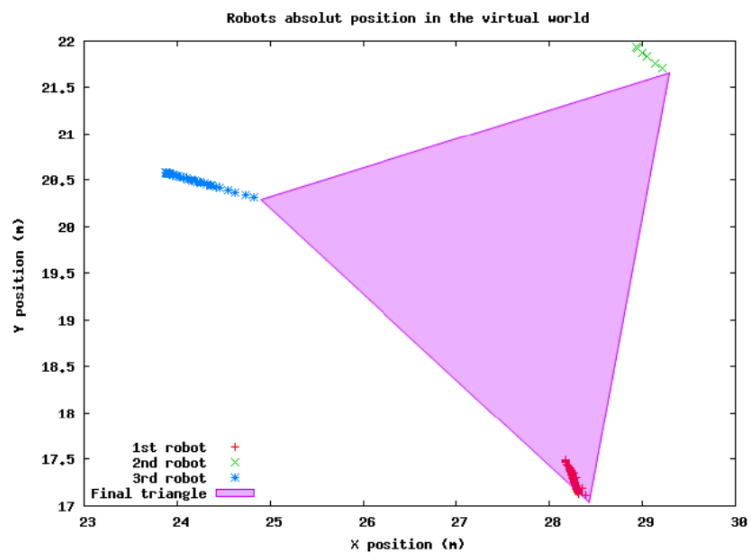
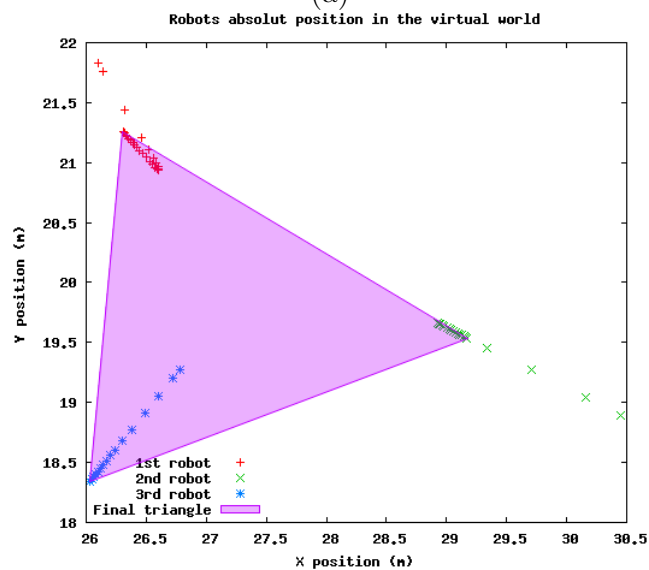
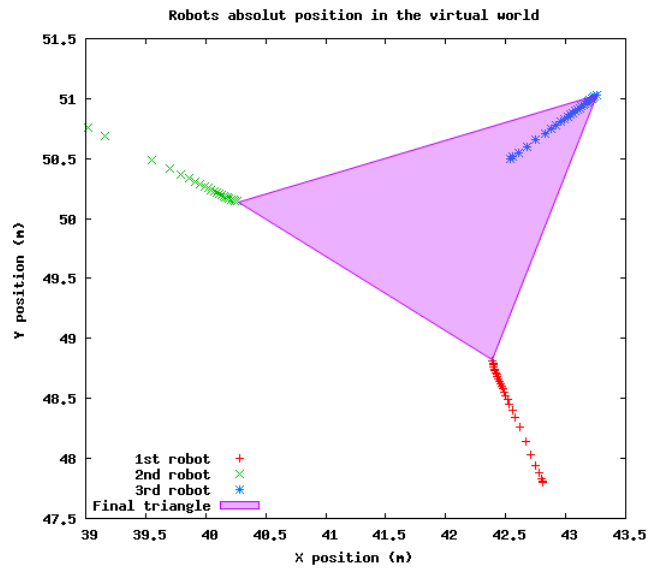


FIGURE 5.10 : Exemples de mise en formation triangle en mode essaim à partir de trois configurations initiales différentes (a), (b)et(c)

enregistré par celui-ci, chaque robot s'aligne sur la bissectrice de ces deux angles enregistrés. À mesure que le temps passe, ils se déplacent suivant cette direction en reculant ou en avançant pour que chacun ait ses deux voisins dans son champ de vision séparé d'une distance correspondant à 60 degrés.

$$e_i = |\Theta_i - 60| \quad (5.3)$$

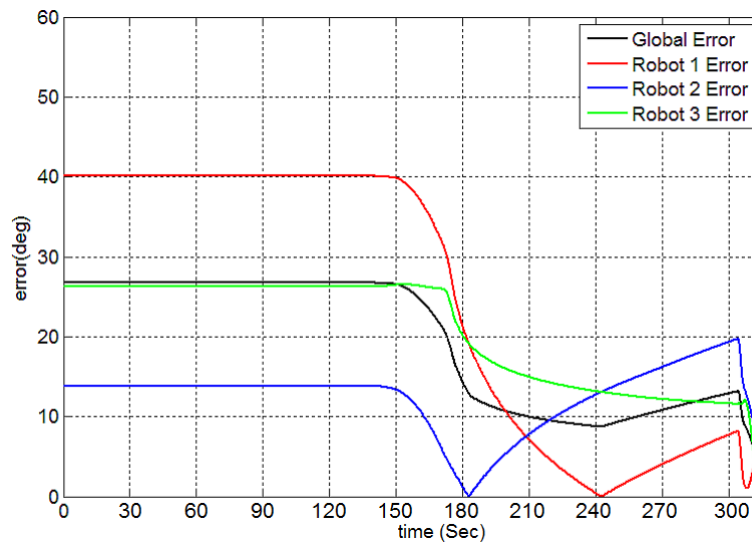
où Θ_i est l'angle du triangle ayant comme sommet le robot i , $i \in \{1, 2, 3\}$

$$e_{global} = \sum e_i / 3 \quad (5.4)$$

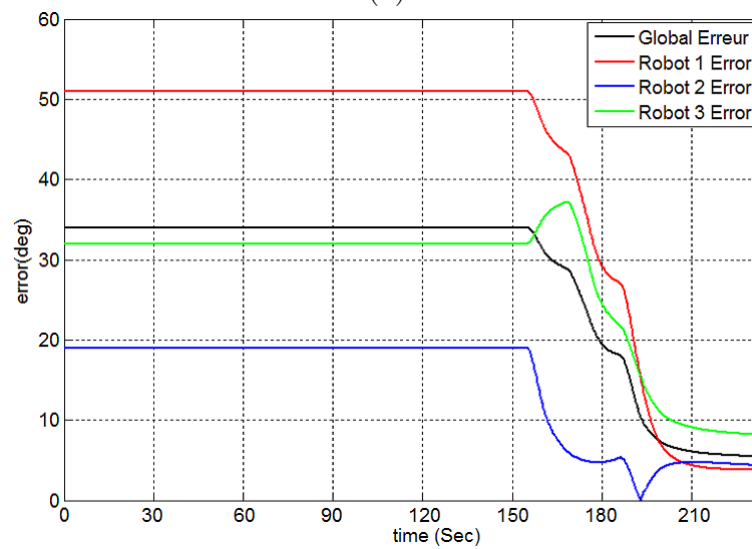
À partir du calcul de l'erreur de convergence de la formation, on pourra avoir une idée sur la stabilité de la formation pour construire un triangle équilatéral à une erreur près. La figure 5.10 illustre la convergence d'une formation d'un triangle initial aléatoire en un triangle équilatéral avec une erreur globale e_{global} (5.4) sur 3 différents essais. L'erreur globale n'est que la moyenne des erreurs individuelles e_i (5.3). Comme les trois robots doivent construire un triangle équilatéral, l'angle sous lequel un robot perçoit ces deux voisins doit être de 60 degrés. L'erreur individuelle e_i (5.3) d'un robot i exprime l'écart entre l'angle séparant les deux voisins sur l'image acquise par celui-ci et 60 degrés.

La figure 5.4 montre la décroissance de l'erreur individuelle e_i (rouge, bleu et vert) et globale e_{global} (en noir) correspondantes à chacun des trois essais durant l'exécution de l'algorithme de mise en formation jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur très faible au-dessous du seuil de convergence traduisant ainsi la construction d'un triangle équilatéral stable 5.10. Dans les essais de la figure 5.4 l'erreur seuil a été fixée à 8 degrés.

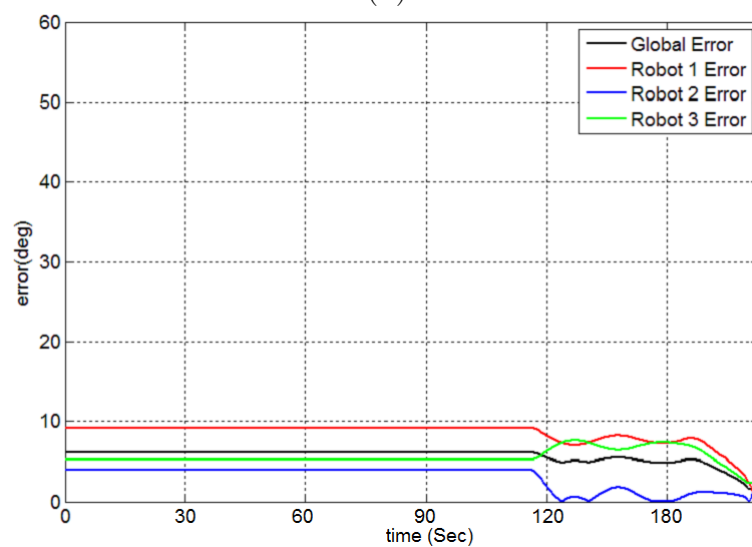
Cette expérience a été répétée d'une façon significative (plus de 100 fois) pour pouvoir évaluer la cohérence statistique de la méthode et de sa durée de convergence. Lorsque les corrections restent en dessous d'un seuil prédéfinie pour tous les robots, la FSM en charge de la coordination hybride permet la commutation de l'état "mise en formation V" à l'état "acquisition vidéo du fonds marins". La valeur du



(a)



(b)



(c)

FIGURE 5.11 : L'évolution des erreurs individuelles de chaque robot (rouge, vert, bleu) et l'erreur globale (noir) durant la mise en formation. Résultats pour trois configurations initiales différentes des robots : (a), (b) et (c).

seuil de convergence a diminué pour la suite des essais de 8 degrés à 0.8 degrés afin d'améliorer la précision et la qualité de la formation triangle.

5.3.1.2 Évaluation du temps de convergence

Pour vérifier la convergence de notre méthode, nous avons tracé l'évolution de l'erreur globale lors de cette campagne de de 100 simulations ou les AUVs ont été mis à l'eau dans conditions initiales différentes (positions, orientations). La figure 5.13 montre que les erreurs globales sont constantes au début du mode essai. Cette phase correspond à l'étape de recherche de voisins ou les robots ne changent pas de position mais plutôt d'orientation. Ensuite, elles décroissent rapidement pour atteindre en fin de simulation une valeur stable faible qu'on va l'étudier statistiquement (voir la figure 5.13). On remarque alors que notre méthode converge en fin de chaque essai. Il nous reste alors qu'étudier la relation entre l'erreur globale au début et à la fin d'une simulation qui sont notées respectivement $e_{i_{global}}$ et $e_{f_{global}}$. Pour s'assurer de la convergence de notre algorithme indépendamment des conditions initiales de l'essai, nous avons analysé statistiquement (plus de 100 essais) l'influence du $e_{i_{global}}$ sur le $e_{f_{global}}$.

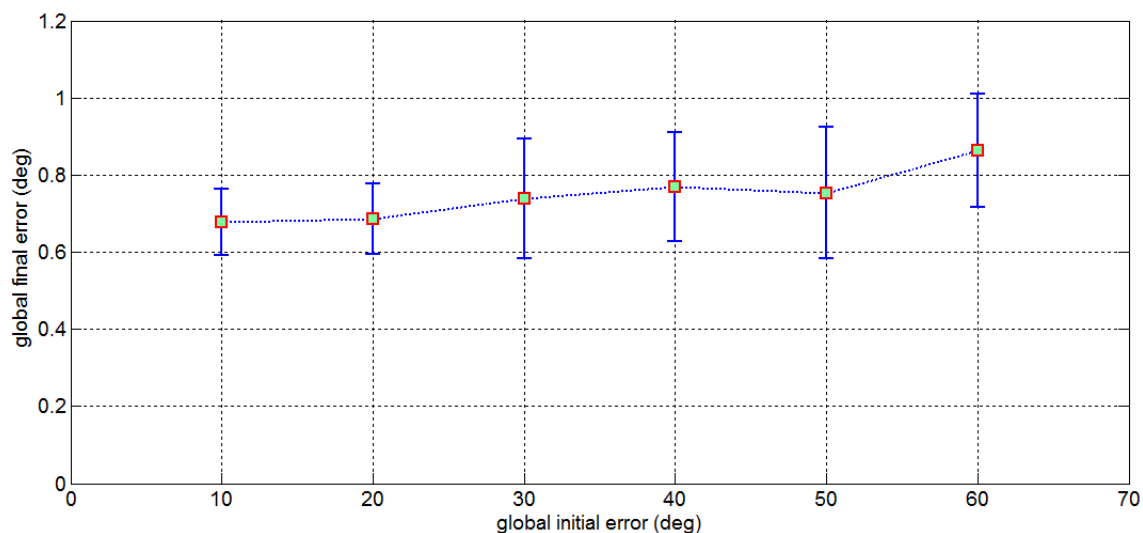


FIGURE 5.12 : L'influence de la valeur de l'erreur globale initiale final au cours des essais sur l'erreur globale finale.

5.3.1.3 Étude de la robustesse de la procédure de mise en formation

Les résultats statistiques présentés dans la FIGURE 5.12 illustrent la valeur moyenne de ef_{global} pour chaque gamme de ei_{global} avec l'écart type correspondant. Une telle courbe illustre expérimentalement que quand ei_{global} croît linéairement, le ef_{global} ne varie pas d'une façon importante. En d'autres termes, la convergence de notre algorithme ne dépend pas des conditions initiales de mise à l'eau des AUVs. L'estimation de ef_{global} reste approximativement entre 0,7 et 0,85 degré. On remarque qu'elle est assez faible, on peut conclure alors que notre algorithme tout d'abord converge vu la faiblesse de ef_{global} et en il est en même temps robuste vu que l'évolution de ef_{global} en fonction de ei_{global} est très peu variable. Dans le

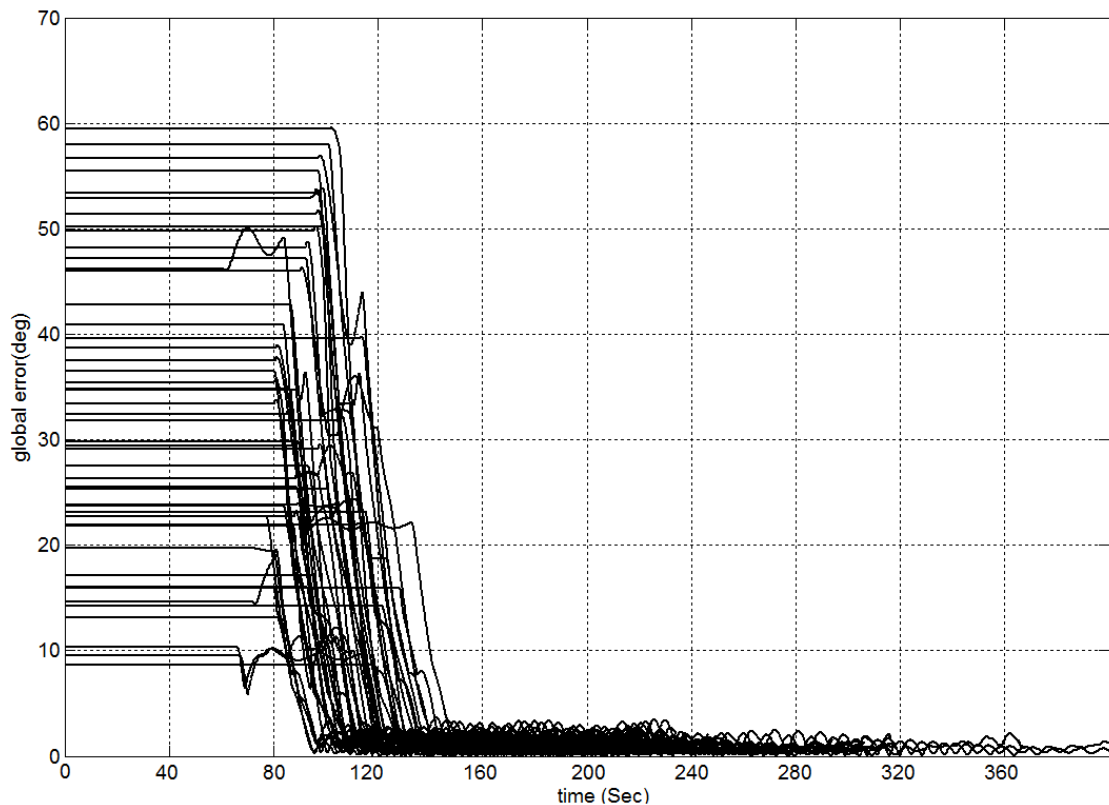


FIGURE 5.13 : L'évolution la valeur de l'erreur globale final au cours des essais en simulation.

domaine sous-marin l'estimation de la durée d'exécution de chaque tâche joue un rôle important dans la qualification de la mission globale d'efficace ou pas. Pour cela, on a décidé à travers une campagne de 100 simulations d'étudier le temps de convergence de notre algorithme de mise en formation. Celui-ci varie souvent

en fonction de la disposition initiale des robots au début de la mission et par conséquent il dépend de ei_{global} .

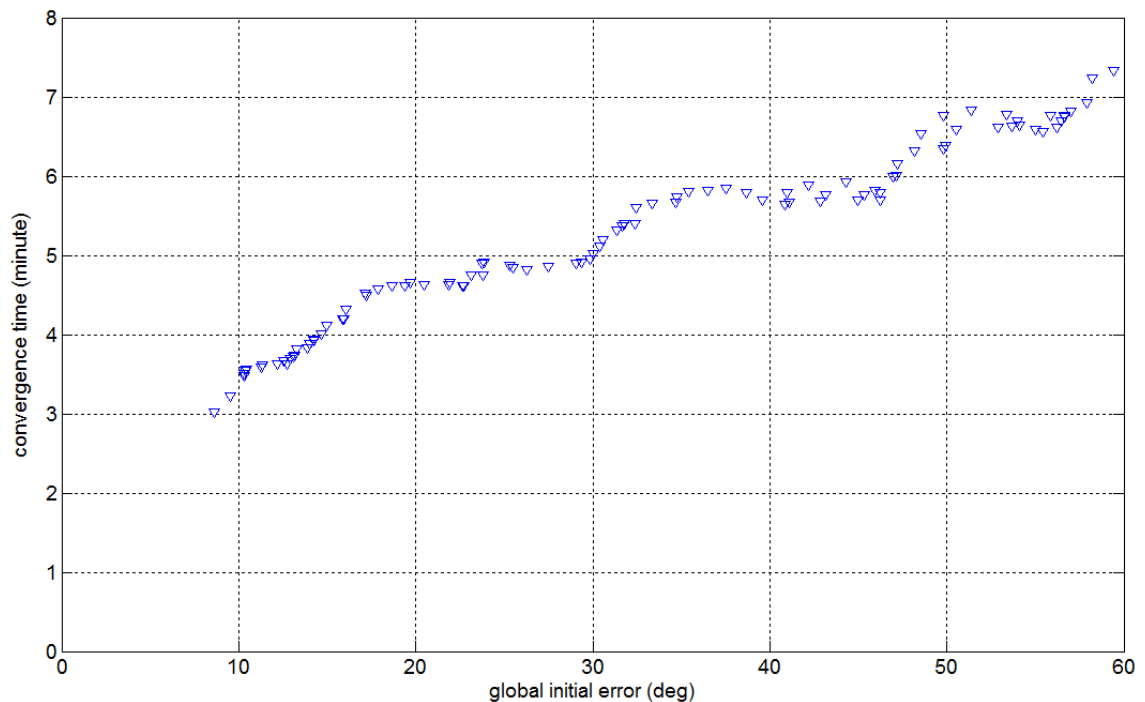


FIGURE 5.14 : Estimation de la Durée d'exécution de procédure de mise en formation en fonction de l'erreur globale initiale.

La figure 5.14 illustre l'évolution du temps de convergence d'une mise en formation triangle en fonction de l'erreur initiale globale. Celle-ci joue un rôle significatif dans la détermination de la durée d'exécution du mode essaim. Il semble qu'elle dépend linéairement de l'erreur globale initiale. Plus l'erreur globale initiale est élevée plus le temps de convergence augmente. Cela signifie en d'autres termes que plus les robots sont proches d'être alignés au début de l'essai plus ils mettent de temps à former un triangle équilatéral. Par contre, lorsque les robots sont dans une configuration proche d'un triangle équilatéral c'est-à-dire une faible ei_{global} , l'algorithme de mise en formation mettra moins de temps à converger. On remarque alors que le temps d'exécution de cette procédure varie de 3 à 7 minutes et dépend de la durée de l'étape de recherche variable suivant l'orientation initiale des AUVs et des distances initiales entre les robots (positions des robots).

5.3.1.4 Évaluation du taux de convergence

Comme on a évoqué avant, on a pu conclure que notre algorithme converge à une erreur globale finale près qu'on a pu évaluer avec un temps de convergence qu'on a su l'estimer. Pour ces deux paramètres on a vérifié leur niveau de dépendance de l'erreur initiale globale. Pour s'assurer de l'efficacité de l'étape mode essaim, il nous reste à évaluer le taux de convergence de celui-ci afin d'assurer d'une part la réussite et la qualité de l'étape de mise en formation.

$$\text{rate of convergence} = \frac{e_{i_global}^i - e_{global}}{e_{i_global} - \text{threshold}} \quad (5.5)$$

Comme le montre la 5.12 le taux de convergence définie à l'équation (5.5), tend à 1 à la fin de la phase de mise en formation. Ceci prouve que la qualité de la formation géométrique est assurée. Dans ce cas chaque robot localise sur l'image de sa caméra ses deux autres séparé d'un angle de 60 degrés avec une erreur angulaire globale en dessous de 0,8 degré. Ensuite, l'équipe poursuit la mission sous le contrôle hiérarchique dans le mode "acquisition des données vidéo".

5.4 Stabilité et convergence du mode hiérarchique

Lorsque le mode hiérarchique est mis en place, un leader est élu par le groupe de robot. Le robot maître guide les autres à une cible sous-marine pour acquérir des données sous-marines optiques par vidéo. Le contrôle des robots suiveurs est réalisé par le robot maître par asservissement visuel. Le robot leader ou maître définie par vision les consignes de commande pour construire une base stéréographique. Le choix du maître dépend de la mission.

Dans ce scénario, où le but est l'acquisition des données vidéo, le maître est le plus éloigné des robots par rapport au cible. Il envoie par LIFI les instructions de déplacements aux robots suiveurs. Une fois élu, celui-ci est responsable de deux tâches. D'une part, il gère le groupe pour maintenir la formation. D'autre part, il étudie le placement dynamique optimal et le chemin optimal pour les autres robots.

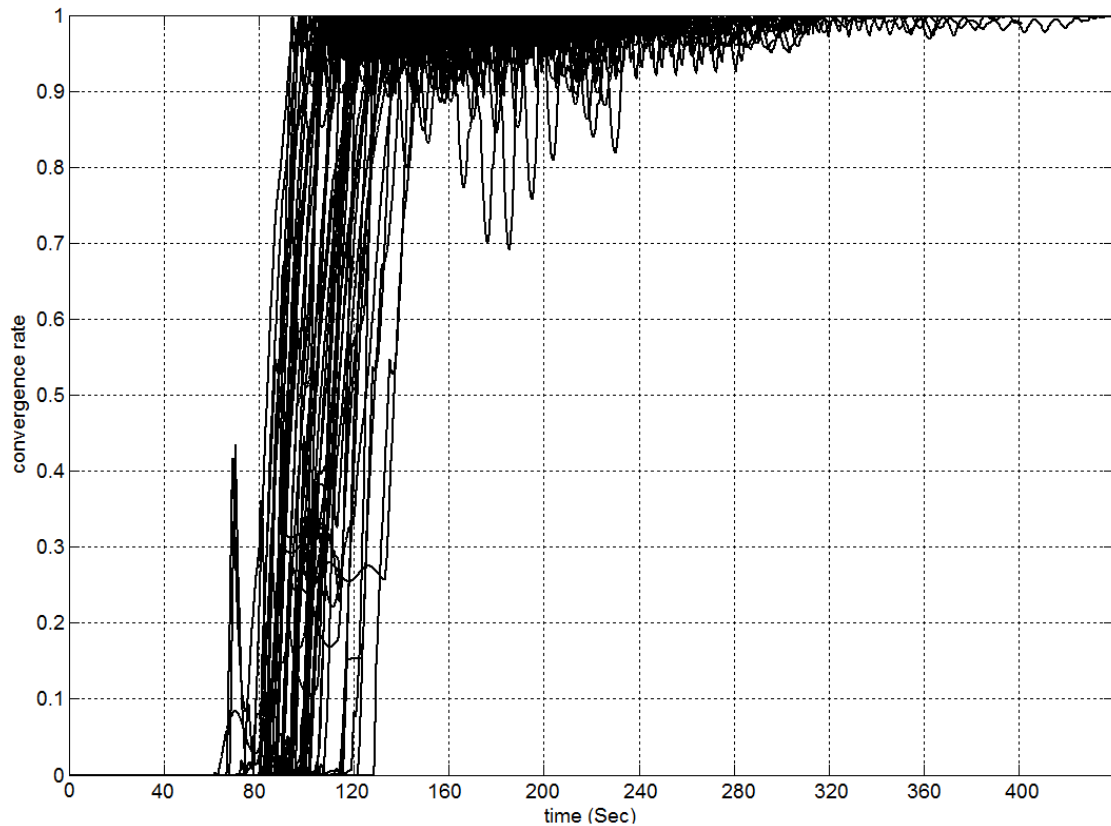


FIGURE 5.15 : Évaluation du taux de convergence de l'algorithme de mise en formation triangle.

L'optimisation à chaque instant de ces différentes contraintes génère un trajet permettant de maintenir la flotte dans une formation triangulaire et de garantir la qualité de la vidéo acquisition réalisée par les robots suiveurs.

L'environnement sous-marin est un des environnements non structurés, en d'autres mots, c'est un environnement sans références définies. Dans ce cas, l'estimation des consignes de déplacement pour le leader devient un problème de navigation compliqué et difficile.

Dans ce type de stratégie de navigation, les références doivent être trouvées dans l'image (les robots suiveurs), identifiés et contrôlés. Il existe fondamentalement trois méthodes qui sont utilisées à cet effet : méthode basée sur le flux optique, sur le suivi des caractéristiques ou la méthode des gradients.

Les méthodes basées sur le flux optique et sur le suivi des caractéristiques peuvent provoquer l'échec des algorithmes de traitement d'images due aux effets de diffusion,

de la mauvaise qualité et la non uniformité de l'éclairage de l'image sous marine. Ceci va causer des problèmes à l'étape de l'identification des robots suiveurs puis des difficultés dans leur contrôle. Par conséquent, nous allons faire face à une perte rapide de ces derniers du champ de vision du maître. En contrepartie, la méthode des gradients utilise les propriétés de la scène comme la profondeur, la portée, les formes ou l'intensité des couleurs, qui sont considérées plus efficace et plus précises [DTA05]. On a choisi d'utiliser cette dernière méthode vu qu'elle convient le mieux à notre contexte de travail.

Lorsque nous parlons de contrôle par vision sous marine, la tenue de la pose du robot est l'un des principaux problèmes que nous devons résoudre. Il consiste à maintenir le robot autour d'une position fixe qui a un intérêt particulier à ce moment de la mission. Dans notre application, nous traitons le même problème. Le leader contrôle les AUVs suiveurs à se déplacer autour de certaines positions fixes sur l'image de la caméra du leader pour des raisons expliquées auparavant. Des exemples similaires de solution de contrôle par vision peuvent être trouvés dans [LLT00], [NXJ99] et [DTA04].

Les mouvements des AUVs suiveurs contrôlés par le robot maître sont :

- mouvement linéaire : l'avance, la dérive and l'ascension
- mouvement de Rotation : le lacet

La loi de contrôle des vitesses de la dérive et de l'ascension dépend de l'erreur entre la position actuelle du robot $p=(x, y)$ et de la position désirée $p^*=(x^*, y^*)$ sur l'image de la caméra du leader. La fonction de régulation (\mathbf{R}) dépend du vecteur erreur (\mathbf{E}), définie respectivement en (5.6) et (5.7).

$$E = p - p^* = \begin{pmatrix} x - x^* \\ y - y^* \end{pmatrix} \quad (5.6)$$

where

$$R = f(E) = \begin{pmatrix} vx \\ vy \end{pmatrix} \quad (5.7)$$

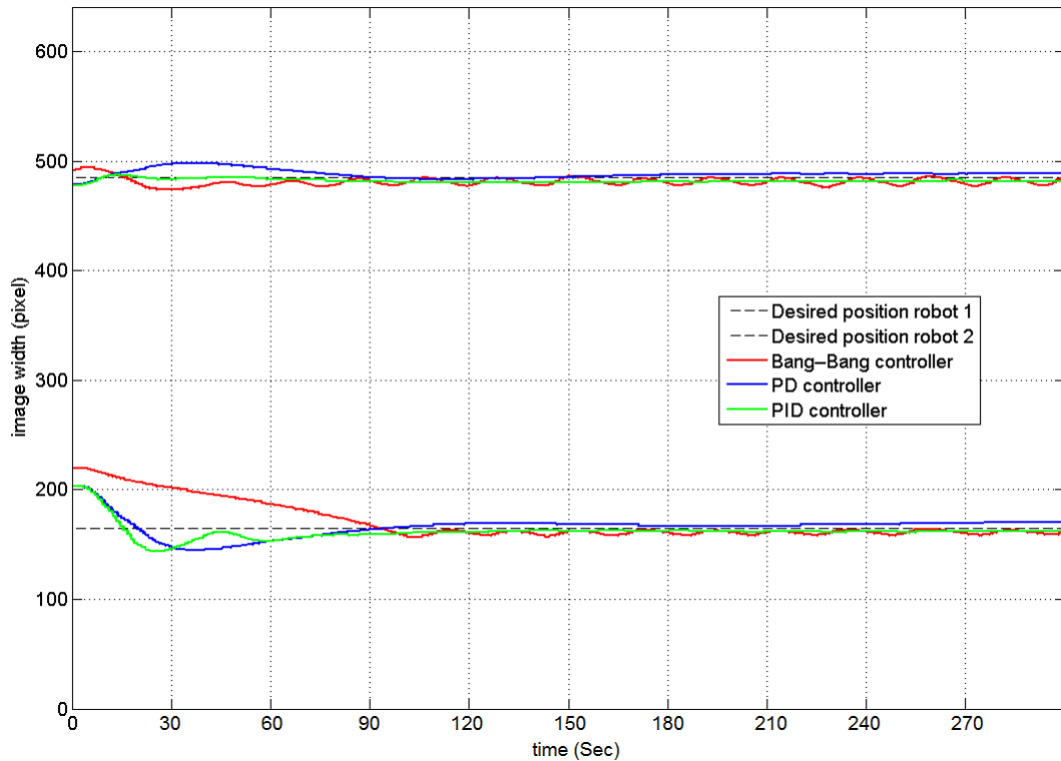


FIGURE 5.16 : Les différents loi d’asservissement Visuel appliqué par le leader sur les deux robot suiveur pour l’acquisition vidéo ne mode hiérarchique.

En mode hiérarchique, le leader garde une vitesse d’avance constante et régule en même temps celles des suiveurs par asservissement visuel. Étant donné que les robots ont une couleur distinctive (jaune), nous appliquons une binarisation sur la composante jaune de l’image de la caméra du leader. La vitesse d’avance des suiveurs sont proportionnellement liés à leur surface dans l’image binarisée du maitre (voir l’équation (5.8)).

$$V_{surgefollower} = \alpha * (S - S^*) \quad (5.8)$$

avec S est la surface du robot suiveurs dans l’image binarisée du leader avec S^* est la valeur seuil pour le déplacement en avance.

La figure 5.16 montre la précision de l’asservissement visuel dans le mode hiérarchique. Le robot maitre contrôle, par asservissement visuel la trajectoire des deux autres robots. Dans la figure 5.16 les positions des deux robots selon la largeur de

l'image du robot maitre au cours du temps ont été tracé. À chaque fois une loi de commande a été testé. Entre le résultat que donne un «bang-bang», un régulateur PD et un PID, le régulateur PID donne les meilleurs résultats au niveau rapidité et précision.

5.5 Stabilité, convergence et robustesse de la stratégie de coordination hybride

Afin d'avoir une idée plus globale sur les caractéristiques de la stratégie de coordination hybride, nous avons étudié la stabilité et la robustesse de celle ci.

La stabilité de cette stratégie consiste dans sa capacité à maintenir la formation géométrique, poursuivre la mission et à atteindre la destination cible malgré l'existence de divers types de perturbation. Ceci revient à étudier la capacité de la machine à états finis à basculer :

D'une part du mode hiérarchique au mode essaim en cas de perte de la formation géométrique désirée à cause d'une perturbation quelconque et d'autre part du mode essaim au mode hiérarchique après la reconstruction de la formation géométrique afin de poursuivre l'acquisition de données optiques.

Par exemple, en cas d'une coupure momentanée des communications entre les AUVs ou l'application d'une fausse consigne par une entité du groupe, l'impact sur la formation ne doit pas se faire sentir au niveau de la continuité de la mission, et peut se traduire par simple passage du mode hiérarchique au mode essaim afin de reconstruire la configuration géométrique voulue et récupérer l'entité robotique perdue. On conclut alors que l'étude de la stabilité de la stratégie hybride consiste à vérifier le bon fonctionnement de la machine à états finis en essayant de créer une perturbation temporaire soit sur les consignes moteurs des robots, soit sur les communications entre les AUVs et vérifier qu'après la perte de formation, celle-ci se reconstitue et la mission continue.

Dans cette étude, nous avons évalué la stabilité de la stratégie de coordination hybride vis-à-vis d'une perte de communication entre le robot maître et les robots suiveurs de la façon suivante : un groupe de trois AUVs CISCREA ont pour mission l'acquisition de données optiques en allant d'un point de départ vers une cible connue. À chaque instant les distances entre les trois entités robotique sont calculées et comparées à la moyenne de ces trois derniers afin de vérifier qu'on est dans une configuration géométrique qui correspond à un triangle équilatéral. La distance moyenne représente le côté du triangle équilatéral le plus proche pour la formation. La distance entre un robot i et un autre j est notée d_{ij} et la distance moyenne est notée d_{moy} (voir l'équation(5.9)).

$$d_{moy} = \frac{d_{12} + d_{13} + d_{23}}{3} \quad (5.9)$$

Durant la simulation, on applique une ou plusieurs perturbations temporaires comme l'arrêt de communication entre les AUVs ce qui engendre la perte de la formation géométrique. Ensuite, on vérifie qu'à chaque fois cet incident se passe la machine à états finis réagi correctement. Elle ordonne le groupe de basculer du mode hiérarchique au mode essaim afin de reconstituer la formation géométrique par suite elle permet de passer au mode hiérarchique afin de poursuivre la mission. Pour cela, on a mené une campagne d'essais en simulation. L'évolution des robots dans l'environnement marin a été tracée afin de visualiser l'effet des perturbations sur le groupe d'AUVs, de remarquer les changements de mode de fonctionnement du groupe et voir l'état de continuité de la mission. Pour cela on a calculé l'écart $ecart_i$ entre la distance moyenne d_{moy} et les distances entre les robots d_{ij} et observé son évolution durant des simulations ou des perturbations ont été appliqués. Pour quantifier l'écart entre la configuration géométrique des robots et un triangle équilatéral on a calculé $ecart_{moyen}$ (voir l'équation(5.10)) qui représente la moyenne des écarts sur chaque robot par rapport à la configuration de référence.

$$ecart_{moyen} = \sum ecart_i / 3 \quad (5.10)$$

Tout D'abord, on a commencé par mener des missions sans ajout de perturbations

pour s'assurer de l'efficacité de la stratégie hybride de coordination dans des conditions de simulation parfaites. Dans la figure 5.17, l'évolution 2D d'un groupe de trois AUVs dans un milieu marin est représenté durant un essai en simulation sans perturbation. Le groupe de robot a pu atteindre sa cible en gardant une configuration en triangle équilatéral. La machine à états finis a permis le passage du mode essaim au mode hiérarchique pour l'acquisition de données optiques après l'étape de mise en formation. En observant l'évolution des distances entre les AUVs,

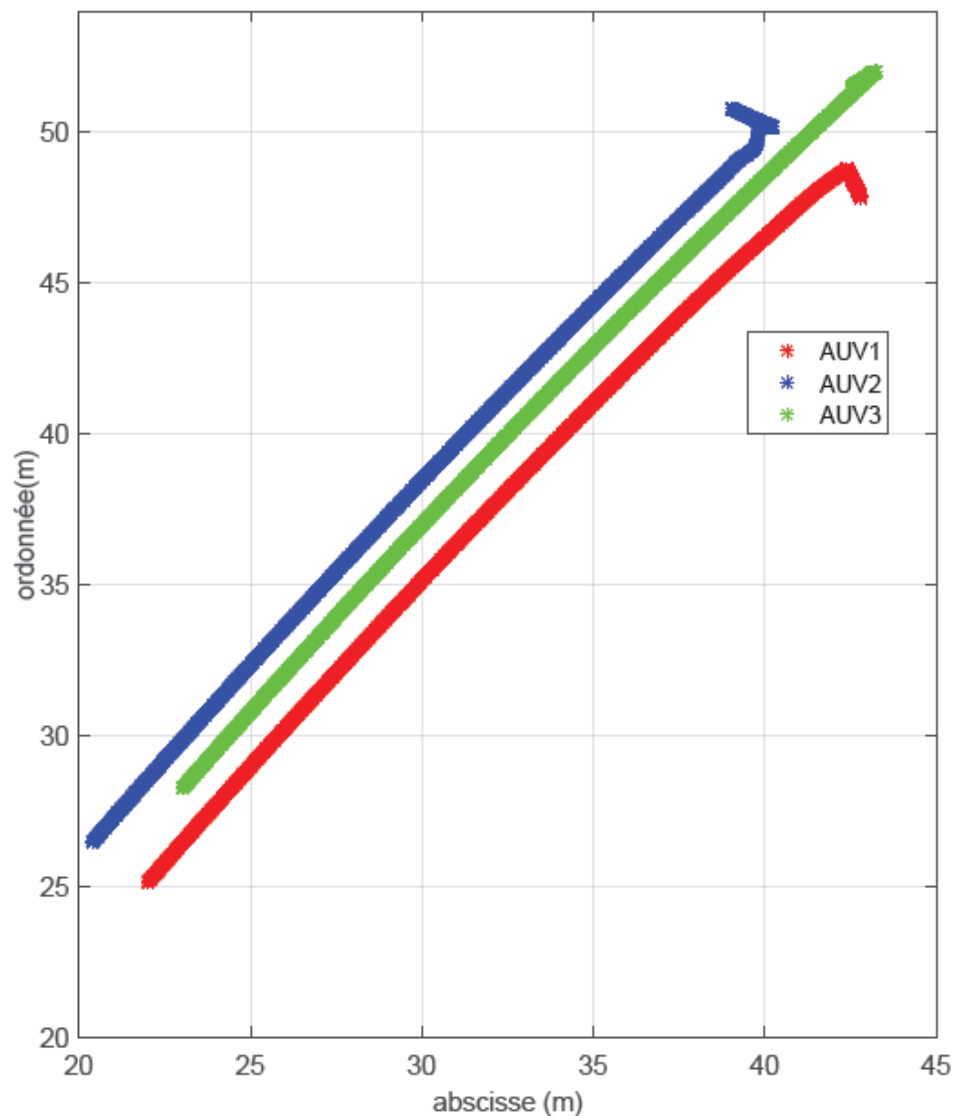


FIGURE 5.17 : L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation sans perte de communication.

on peut distinguer facilement la phase de mise en formation et celle de l'acquisition des données optiques (voir la figure 5.18).

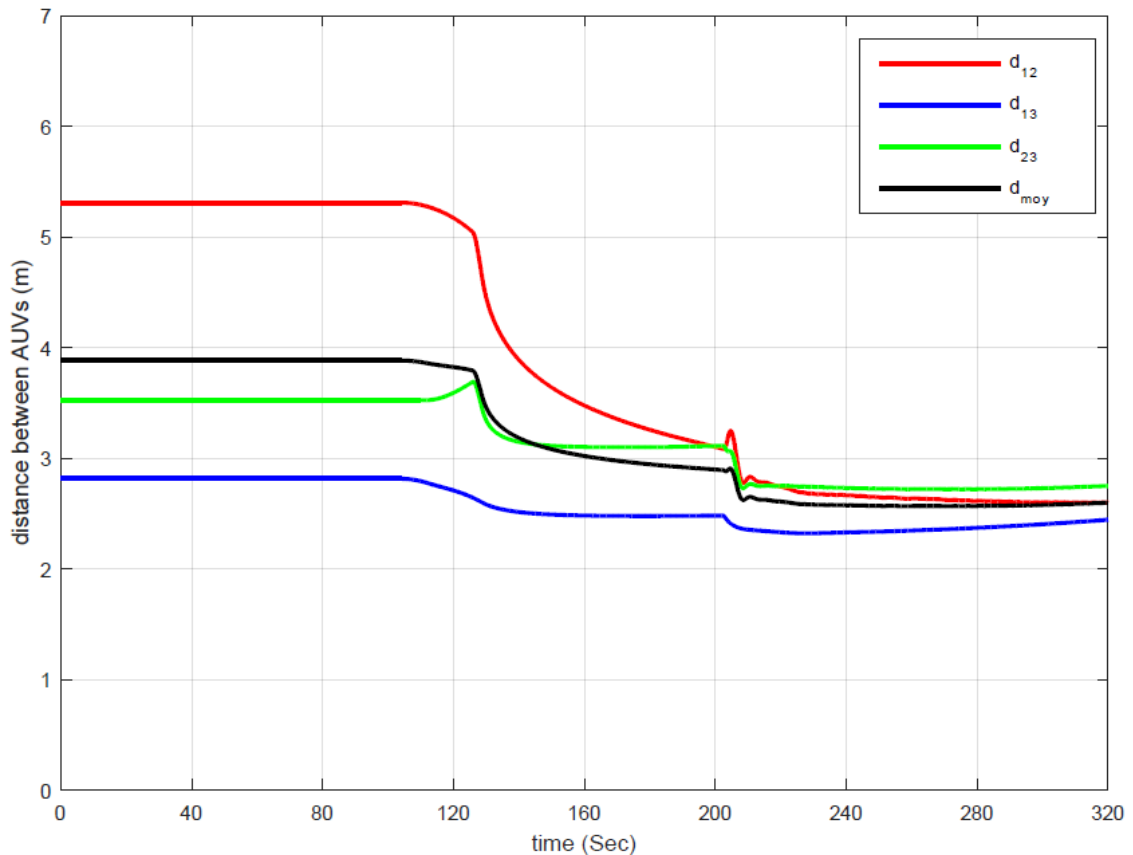


FIGURE 5.18 : L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation sans perte de communication.

Au début de la première, les distances sont constantes ce qui correspond à l'étape de recherche de voisins. Arrivant à sa fin les distances d_{ij} convergent vers une valeur moyenne et la formation géométrique devient stable. Tout au long de la deuxième phase, les valeurs des d_{ij} s'approchent de plus en plus de la valeur moyenne d_{moy} . Pour quantifier l'écart entre la configuration géométrique de référence et celle réalisée, on a calculé la valeur $decart_{moyen}$ durant la mission. On a remarqué que celui-ci diminue tout au long de mission. Il passe de 0.915 m pour atteindre 0.11 m qui est une valeur proche de zéro (voir la figure 5.18). Dans la suite des essais, on a ajouté des perturbations temporaires sur la communication entre les AUVs. Elles consistent à créer un pourcentage donné de pertes de messages communiqués entre les robots. Par exemple, quand on applique 10 pour cent de perte de communication, sur cent messages envoyés de l'AUV 1 à l'AUV2, il y aura que 10 reçus par l'AUV2. Ensuite, on observe d'une part le mode de fonctionnement désigné par la machine à états finis afin d'éviter que ces perturbations génèrent

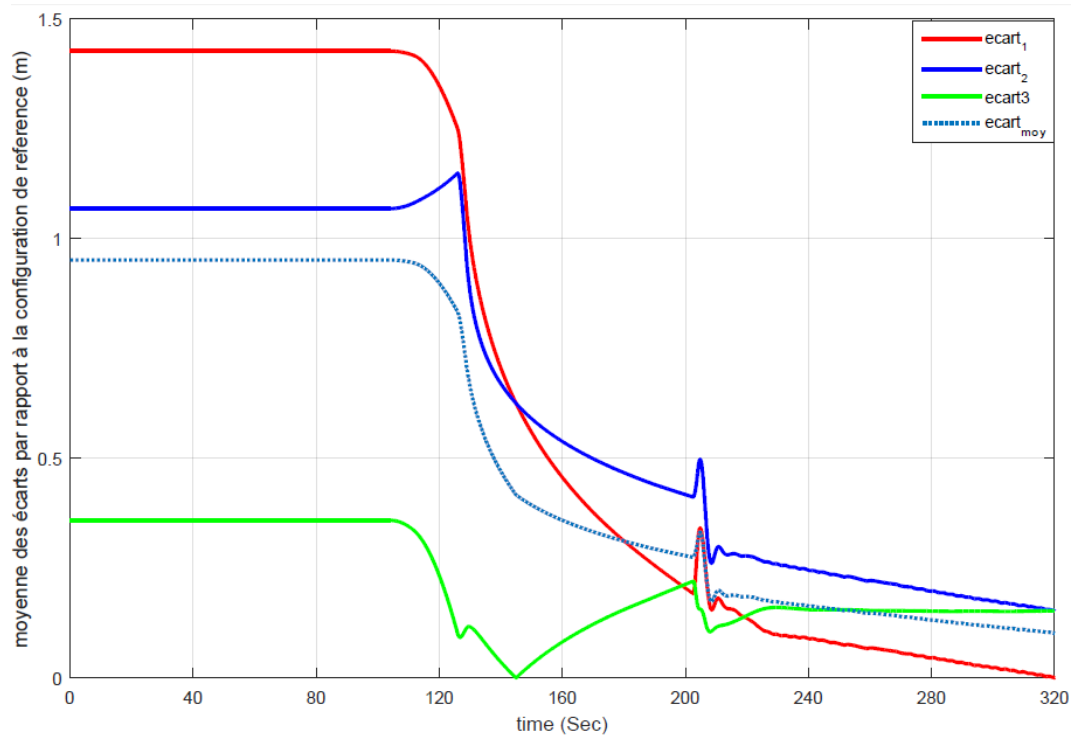


FIGURE 5.19 : L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation sans perte de communication.

l'interruption la mission. D'autre part, on vérifie leurs influences sur la valeur de l'écart moyen $ecart_{moyen}$ par rapport à la configuration de référence pour évaluer la robustesse de notre stratégie de coordination envers ces perturbations et vérifier les limites de fonctionnalité de la stratégie hybride par rapport aux écarts créés par les perturbations de communication. On a calculé la valeur de $ecart_{moyen}$ que peut causer un pourcentage de perte de communication bien définie. Une campagne de 100 simulations a été effectuée afin de montrer la stabilité de la stratégie de coordination hybride et ses limites de validité.

Dans la figure 5.20, une perte de 80 % des informations communiquées entre les AUVs a été appliquée à deux reprises de la mission ($t=190$ sec, $t=360$ sec) (voir la figure 5.21). On peut remarquer que la mission n'a pas été interrompue et que le groupe atteint sa cible. À chaque perte de formation, le mode essaim est activé par la machine à états finis ensuite celle-ci relance le mode hiérarchique afin de poursuivre la mission de nouveau. On peut remarquer aussi que la phase de mise en formation s'établit correctement car à la fin de celle-ci les distances entre les robots d_{ij} converge vers une valeur d_{moyen} traduisant ainsi la constitution d'un

triangle équilatéral à une erreur près. Durant le mode hiérarchique, les valeurs des d_{ij} s'approchent de plus en plus de d_{moyen} et suivent son évolution ce qui traduit le maintien de la configuration géométrique dans ce mode. Suite aux deux perturbations appliquées la valeur de d_{moyen} à la fin du mode essaim ont été respectivement 3.8 m et 5 m (voir la figure 5.21). Les écarts moyens causés par chacune des deux perturbations sont respectivement 0.65 m et 1.7 m (voir la figure 5.22).

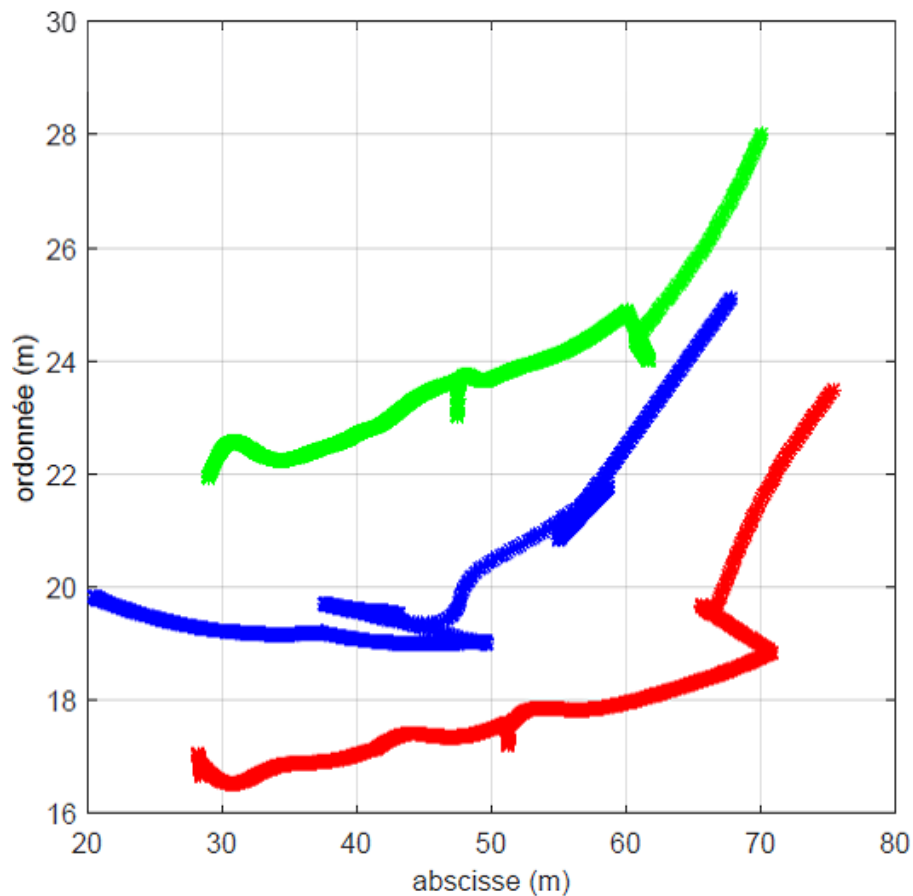


FIGURE 5.20 : L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation avec perte de 80 % de communication.

Dans la figure 5.23, une perte de 40 % des informations communiquées entre les AUVs a été appliqué à $t=200$ sec (voir la figure 5.24). On peut remarquer que la mission n'a pas été interrompue et que le groupe atteint sa cible. Durant la perte de formation, le mode essaim est déclenché par la machine à états finis. Dès que la configuration géométrique est établie, le mode hiérarchique est activé afin que le groupe d'AUVs reprenne la mission. On peut conclure aussi que la phase de mise

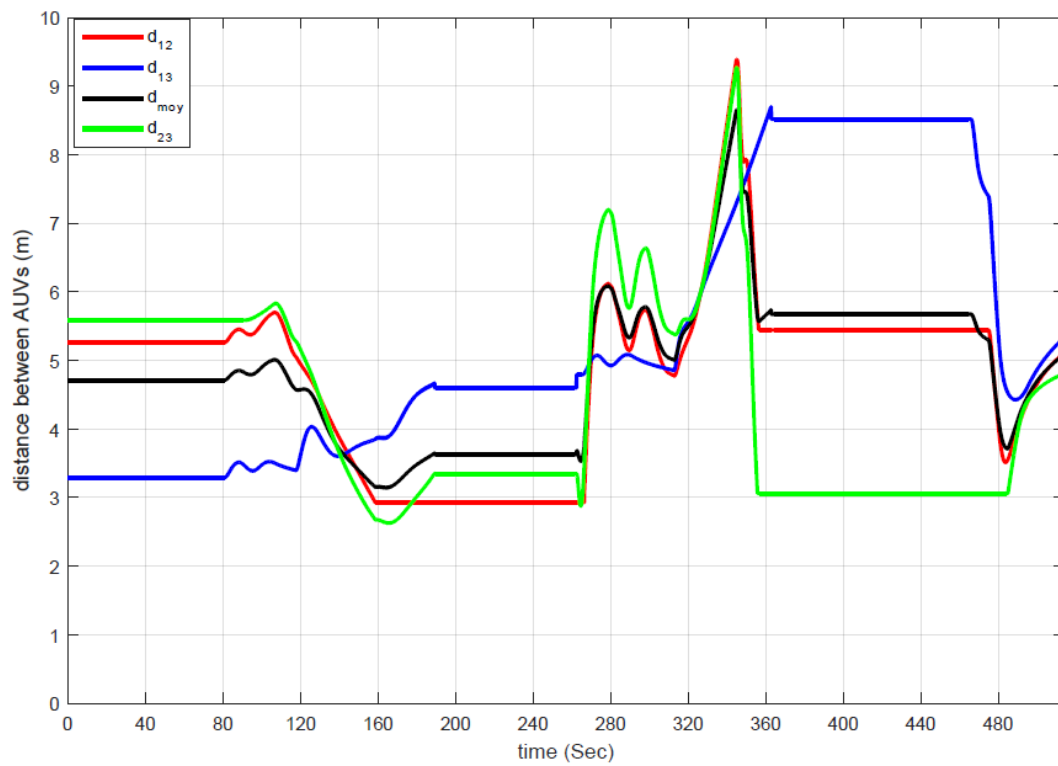


FIGURE 5.21 : L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation avec perte de 80 % de communication.

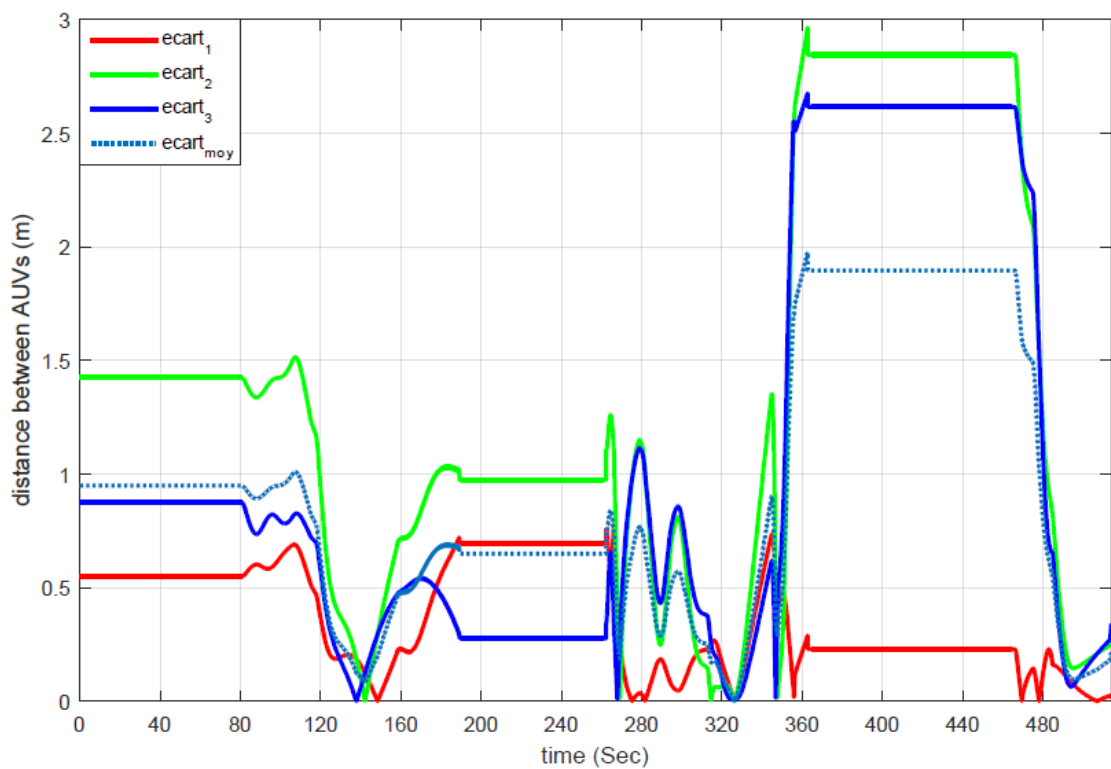


FIGURE 5.22 : L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation avec perte de 80 % de communication.

en formation s'établit correctement car à la fin de celle-ci les distances entre les robots convergent vers une valeur d_{moyen} traduisant ainsi la formation d'un triangle équilatéral à une erreur près. Suite à la perturbation appliqué la valeur de d_{moyen} à la fin du mode essaim est de 4.1 m (voir la figure 5.24). L'écart moyen $ecart_{moyen}$ causé est de 0.45 m (voir la figure 5.25).

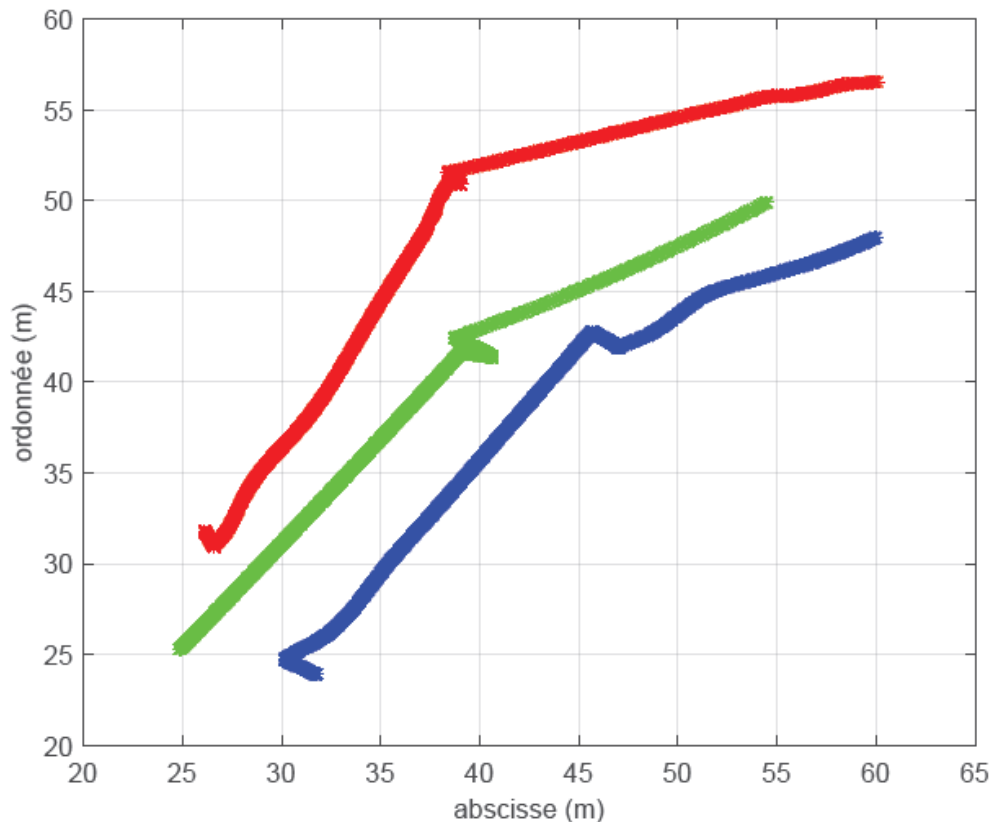


FIGURE 5.23 : L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation avec perte de 40 % de communication.

Dans la figure 5.26, une perte de 20 % des informations communiquées entre les robots durant la mission a été appliqué à $t=245$ sec (voir la figure 5.27). On peut remarquer que la mission n'a pas été interrompue et que le groupe atteint sa cible. Durant la perte de formation, le mode essaim est mis en place par la machine à états finis. Dès que la configuration géométrique est réalisée, le mode hiérarchique est déclenché afin que le groupe d'AUVs reprend la mission. On peut constater aussi que la configuration géométrique s'établit correctement car à la fin du mode essaim les distances entre les robots converge vers une valeur d_{moyen} traduisant ainsi la formation d'un triangle équilatéral à une erreur près. Suite à la perturbation

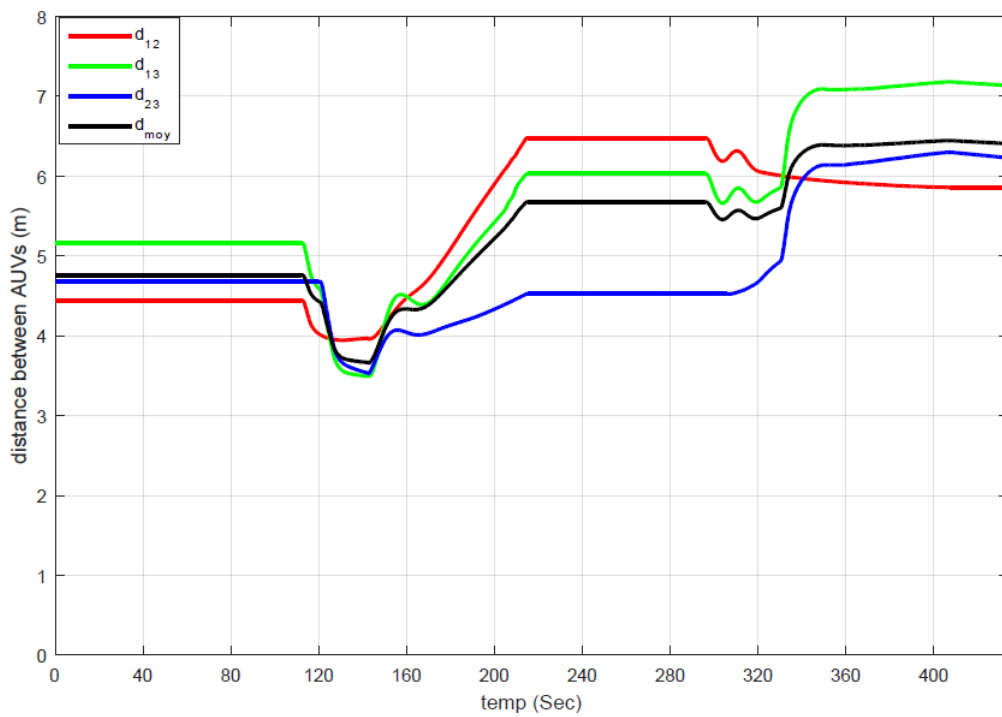


FIGURE 5.24 : L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation avec perte de 40 % de communication.

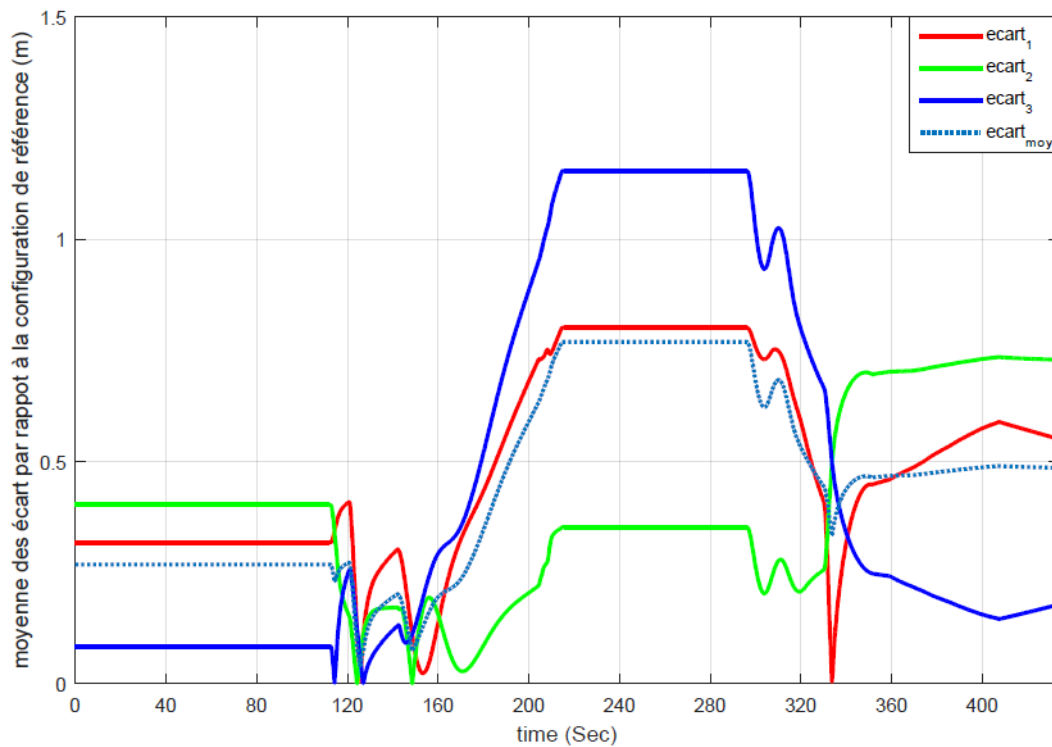


FIGURE 5.25 : L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation avec perte de 40 % de communication.

appliqué la valeur de d_{moyen} à la fin du mode essaim est de 4.1 m (voir la figure 5.27). L'écart moyen $ecart_{moyen}$ causé par celle-ci est de 0.42 m (voir la figure 5.28).

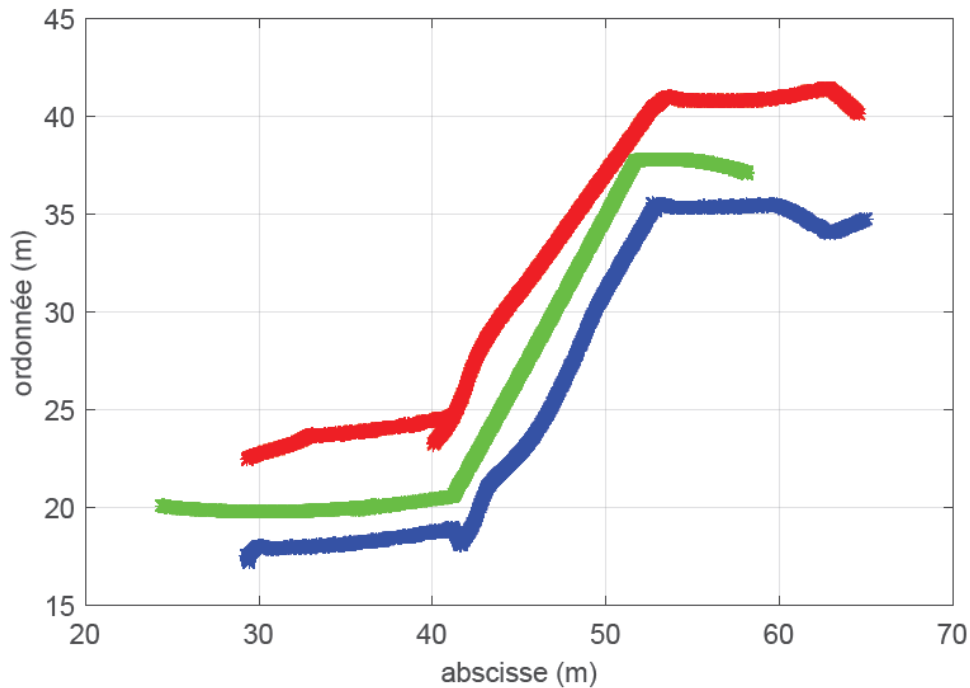


FIGURE 5.26 : L'évolution des AUV dans un milieu sous marin durant une simulation avec perte de 20 % de communication.

À partir de 90 % de perte de communication, nous avons pu constater, lors de nos simulations, l'apparition de collisions entre les AUVs et une perte totale des AUVs causant ainsi l'interruption de la mission.

On remarque alors que la machine à états finis réagit d'une façon efficace jusqu'à une limite de perte de communication de 90 %. Le passage dans les deux sens entre le mode essaim et le mode hiérarchique se fait d'une façon automatique dès la détection d'une perte de formation et du moment où celle-ci est reconstituée la mission se poursuit. On peut conclure alors, que la stratégie de coordination est stable jusqu'à une limite de perte de communication arrivant à 90 % des informations communiquées entre les AUVs.

Pour étudier la robustesse de la stratégie hybride de coordination par rapport au facteur perte de communication, une étude statistique sur 100 simulations a été menée. Durant celle-ci, on a appliqué une perte de communication aléatoire et on a enregistré l'écart moyen qui est causé par cet incident et qui n'a pas abouti à une

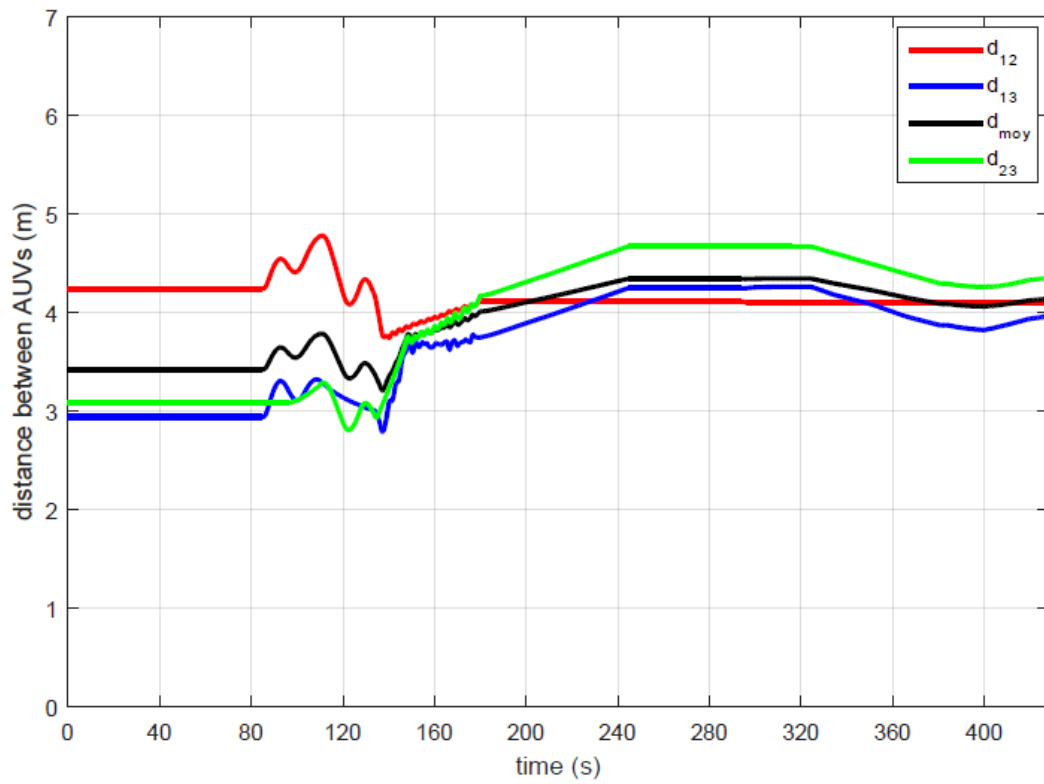


FIGURE 5.27 : L'évolution des distances entre les AUVs durant une simulation avec perte de 20 % de communication.

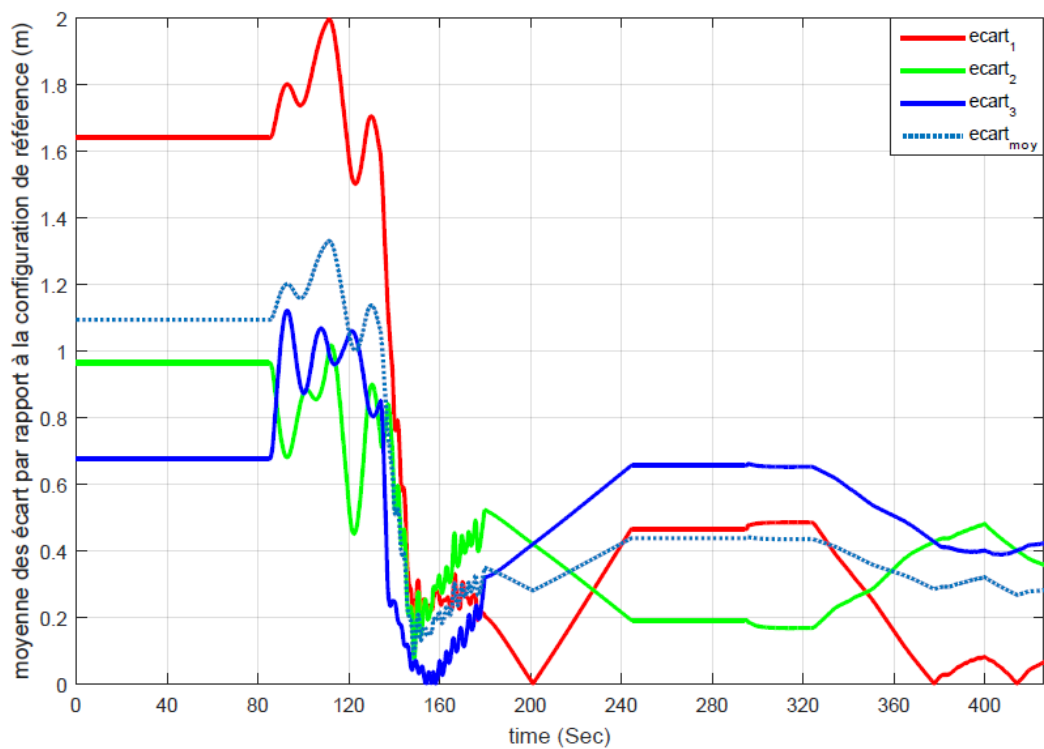


FIGURE 5.28 : L'évolution des écarts entre d_{moyen} et les d_{ij} durant une simulation avec perte de 20 % de communication.

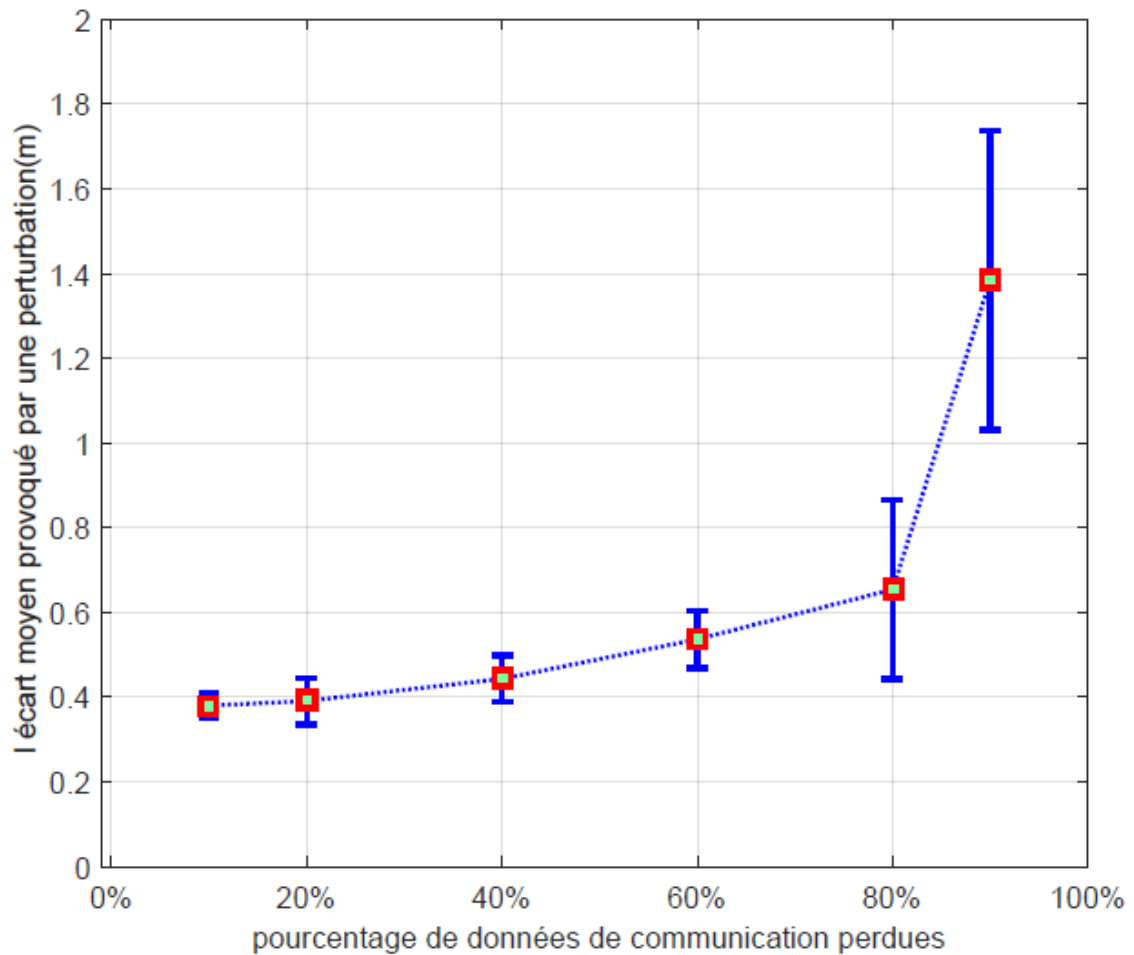


FIGURE 5.29 : L'influence de la perte de communication entre les AUVs sur $ecart_{moyen}$.

interruption de la mission. Les résultats présentés dans la 5.29 illustrent l'écart moyen causé par un pourcentage de perte de communication entre les AUVs. On a remarqué qu'en existence d'une perte de communication entre 10 % et 60 %, l'écart moyen causé est constant d'une moyenne entre 0.39 m et 0.56 avec un écart type entre 0.1 m et 0.03 m. Par contre, il croît rapidement à partir de 80 % de perte de communication pour atteindre 0.65 m à 80 % et 1.38 à 90 %. A partir de 90 % de perte la mission est interrompue et la machine à états finis n'est plus capable d'assurer la continuité de celle-ci. On peut conclure alors que la stratégie de coordination est assez robuste par rapport à une perte de communication aléatoire et reste efficace jusqu'à un écart moyen de 1.38 m qui correspond à une perte de 90% de l'information communiqués entre les AUVs.

5.6 conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble d'essais pour de nos attentes. Ces essais ont pour but de nous permettre de mesurer la réponse d'un groupe d'AUVs par rapport à notre stratégie de coordination hybride théorique. De cette façon, nous vérifions que l'approche de mise en formation adoptée lors de la conception de notre algorithme mène aux résultats souhaités. D'un autre côté, nous souhaitons également vérifier que notre groupe de robots CISCREA remplit la tâche qui lui est assignée en mode hiérarchique en conservant la configuration géométrique acquise en mode essaim. Pour cela, Nous avons donc mené une campagne d'essais en simulation afin d'évaluer certaines notions opérationnelles de la procédure de mise en formation comme l'erreur de convergence, le temps de convergence et le taux de convergence ainsi que l'influence des conditions initiales des essais sur chacun de ces paramètres pour tester la robustesse de cette procédure. Pour ces paramètres. On a pu aboutir à des valeurs satisfaisantes. Ils nous ont permis de conclure que notre algorithme de mise en formation est tout d'abord assez précis à travers sa valeur taux de convergence qui tend vers 1. Ensuite, il assure aussi une bonne qualité au niveau de configuration géométrique désirés en ayant une erreur de convergence très faible. Enfin, il nous garantit un temps de convergence convaincant pour une mission sous marine. En ce qui concerne le mode hiérarchique, le choix de la loi de contrôle par asservissement visuel s'est basé sur les résultats acquis par différents types de lois de commande afin d'aboutir au rendement souhaité. En dernier lieu, Nous avons vérifié la stabilité de la globalité de la stratégie de coordination hybride en études statistiquement d'une part la capacité de la machine à états finis à prendre les bonnes décisions en choisissant le bon mode de fonctionnement au groupe (essaim, hiérarchique) selon les circonstances qui peuvent intervenir durant une mission. On a aussi montré la robustesse de celle-ci par rapport au facteur de perte de communication en appliquant une coupure aléatoire de celle ci au cours d'une mission. Notre stratégie reste stable pour des écarts élevés par rapport à la configuration géométrique triangulaire, ce qui prouve sa robustesse. L'utilisation de ces résultats nous ont permis de raffiner de plus en plus nos algorithme pour

améliorer la qualité et la précision du contrôle du groupe des robots, valider la stabilité et la robustesse de la stratégie hybride de coordination et optimiser le temps d'exécution de la mission.

Conclusions et perspectives

Les travaux réalisés dans cette thèse répondent à la volonté d'améliorer les stratégies de coordinations pour les systèmes multi-robots mobiles. L'intérêt est porté plus particulièrement sur la coordination et la coopération des entités robotiques autonomes sous marines dans le but de réaliser une acquisition détaillée et systématique des fonds marins. Considérant les caractéristiques désirées dans notre application (mise en formation géométrique, acquisition systématique de données vidéo) une méthodologie unique de coordination n'est pas optimale vu que les tâches à réaliser par le groupe sont de nature très différentes lors des différentes phases de la mission. Pour résoudre ce problème, On propose dans cette thèse, une architecture hybride de coordination, contrôlée par un automate à états finis, qui indique au groupe de robots le mode de coordination le plus approprié à la phase de la mission en cours de réalisation.

Dans le premier chapitre de ce manuscrit, nous avons d'abord abordé la robotique mobile d'une manière générale et la sous marine en particulier. Nous commencerons par l'historique des robots sous marins ainsi que leurs applications dans divers domaines, nous étudions ensuite les systèmes multi-robots, leur apparition et leurs applications et on s'intéressera en particulier à l'étude des systèmes multi-robot sous marin. Par suite, nous nous focalisons principalement sur les architectures de coordinations et les stratégies de coopération qui leur sont dédiées leurs types et leur classification. Enfin, nous avons étudié les enjeux liés à la coordination d'un groupe d'entités autonomes et les diverses méthodologies de coopération existants pour relever ses enjeux. Au vu du contexte des travaux de thèse relatifs au contrôle d'un système multi-robots (SMR) sous marin, l'état de l'art réalisé s'est focalisé

particulièrement sur les architectures de contrôle/commande existantes dédiées à ces systèmes. L'objectif étant de s'inspirer des approches traitées dans la littérature afin de proposer la stratégie de coordination la plus appropriée pour le contrôle du SMR.

Se plaçant dans ce cadre, nous avons commencé le deuxième chapitre par la description du but de l'application sous marine qu'on compte mener et ses caractéristiques afin de choisir la stratégie de coordination adéquate. La stratégie adoptée est une stratégie hybride qui est composée principalement de deux modes : un mode essaim et un mode hiérarchique. Ils permettent d'accomplir deux tâches : la mise en formation et la navigation en groupe. L'objectif de ce chapitre est de justifier le choix de cette stratégie et d'expliquer le but de chacun des deux modes de fonctionnement du groupe de robots de robots sous marins. Nous avons décrit aussi minutieusement les étapes de mise en oeuvre de chaque mode et les mécanismes mis en place pour permettre le passage d'un mode à l'autre selon les circonstances de la mission. L'aspect hybride, notamment pour l'autonomie décisionnelle qu'il offre aux entités, se repose sur la permutation entre les différentes stratégies existantes, à savoir centralisées ou distribuées, permettant une meilleure exécution d'une mission. Nous avons précisé dans ce chapitre que l'image sous marine est la source principale dans notre application dans les deux modes de fonctionnement.

Le chapitre 3 illustre alors les concepts principaux de traitement d'images sous marines nécessaires pour le contrôle par vision des robots. Il présente le développement d'algorithmes de reconnaissance d'objets en vidéo sous-marine, avec une attention particulière apportée aux tâches exécutées par des robots sous marins. Ces algorithmes seront embarqués sur chacun des robots du groupe pour la détection, la reconnaissance et l'estimation de certains paramètres relatifs aux autres unités du groupe. Des essais expérimentaux ont été effectués pour évaluer l'efficacité de ces algorithmes.

Le chapitre 4 est consacré à l'étude, la conception et la réalisation d'une plateforme de simulation de véhicules sous marins autonomes. Nous nous focalisons particulièrement sur la simulation d'une flottille de robots CISCREA afin de tester

d'une part l'efficacité de la stratégie de coordination hybride développée dans le deuxième chapitre et d'évaluer d'autre part les algorithmes de traitement d'images mis en place au troisième chapitre. Nous avons débuté ce chapitre par l'évocation de l'importance de la simulation en robotique ensuite par l'énumération d'exemple de simulateurs existants afin d'être en mesure de proposer une plateforme adaptée à notre contexte de travail.

Dans une deuxième partie, nous avons modélisé les différents éléments de la simulation. Ces éléments ne sont que les robots CISCREA et l'environnement marin. Enfin, nous présentons l'architecture du système de simulation qu'on propose. La conception de cette architecture a pris en compte d'une part les propriétés de l'environnement marin (turbidité, viscosité) et des robots CISCREA (dynamique, loi de commande). D'autre part elle a tenu compte des spécificités de la simulation d'un groupe de robots sous marins communicants (communication sous marine).

Après avoir proposé une stratégie hybride de coordination pour un groupe de robots sous-marins, on a conçu une plateforme de simulation et modélisé des éléments intervenants dans une mission multi-robot sous-marine et les caractéristiques physique de chacun d'eux. Nous avons implémenté cette stratégie sur un groupe de robots CISCREA à travers notre outil de simulation afin de tester l'efficacité et d'évaluer la stabilité et la robustesse des deux modes essaim et hiérarchique et de la stratégie en globalité. Ceci en faisant, d'une part plusieurs essais en simulation pour effectuer une étude statistique permettant d'évaluer le taux de convergence, le temps d'exécution de l'algorithme de mise en formation V et les différents facteurs influant sur ces deux paramètres. D'autre part, en testant de différents lois d'asservissement visuel en mode hiérarchique afin d'arriver un contrôle robuste des robots suiveurs. On aussi testé la stabilité et la robustesse de la stratégie de coordination hybride par rapport à des perturbations temporaires de communication durant une mission. Les simulations ont démontré la faisabilité de notre démarche et ont prouvé la stabilité et la robustesse la stratégie de coordination proposée et la qualité de contrôle du groupe.

Les perspectives d'évolution de l'approche porteront sur :

- Une étude expérimentale permettra de valider notre stratégie et d'avoir plus d'informations sur les paramètres qu'il faut améliorer ou qu'il faut régler au niveau contrôle/commande, traitement d'images et communication inter robots.
- L'expansion de la formation de 3 à n robots et par conséquent l'évolution de la topologie du groupe de triangle à d'autres types de géométrie peuvent être proposés et qui permettront une meilleure qualité d'exécution de la mission.
- Une amélioration du mode de contrôle de la stratégie de coordination en remplaçant la machine à état fini par une couche qui contrôle le passage d'un mode à l'autre.
- La généralisation de l'approche proposée à d'autres capteurs à part les capteurs visuels et adapter cette approche pour des données issues d'autres capteurs plus riches en informations permettant ainsi d'augmenter l'autonomie des robots et diminuer par conséquent le flux d'informations échangé ce qui est très demandé dans l'environnement marin et qui augmentera la stabilité et la robustesse de la stratégie hybride.
- L'approche proposée dans ce travail se limite sur deux tâches pour l'acquisition systématique et détaillée des fonds marins. Pour une mission plus complexe, on pourra avoir plusieurs tâches à gérer en parallèle ou séparément et dans ce cas on pourra améliorer notre stratégie hybride afin d'assurer la réussite de missions très complexes demandant un taux de coordination plus élevé et un système de contrôle plus complexe qu'une machine à états finis.

Annexe A

Support logiciel : OpenCv

Nous présentons dans cet annexe la bibliothèque OpenCv (voir le chapitre 3), l'histoire et l'intérêt de son développement, ses applications et ses fonctions.

A.1 Historique

OpenCV (Open Computer Vision) est une bibliothèque graphique libre (voir <http://opensource.org>) disponible à partir de <http://SourceForge.net/projects/opencvlibrary>. En 1999, Elle a été développée par Intel pour le traitement d'images en temps réel dans le cadre d'un projet qui visait à optimiser les applications gourmandes en temps processeur (voir la figure A.1).

À l'année 2000, La première version alpha d'OpenCV a vu le jour. Elle a été présentée ensuite dans le cadre de la conférence IEEE sur la vision par ordinateur et la reconnaissance de formes.

Depuis, de multiples versions bêta ont été mis en ligne entre les années 2001 et 2005 jusqu'à l'apparition de la version 1.0 en 2006. Avec l'appui de la société de robotique Willow Garage OpenCV depuis 2008, la bibliothèque ne cesse d'être développé jusqu'à présent. À la fin de l'année 2008, une version 1.1 du bibliothéque a vu le



FIGURE A.1 : Logo d'OpenCv

jour. En 2009, la version OpenCv 2 a été lancée avec beaucoup de changements au niveau du langage C++ afin de d'améliorer les performances de celle-ci.

A.2 Qu'est-ce que OpenCV ?

OpenCV (Open Source Computer Vision) est une bibliothèque de programmation des fonctions pour la vision par ordinateur en temps réel . Utilisée dans divers domaine, Elle met à la disposition de l'utilisateur de diverses fonctionnalités permettant d'appliquer des opérations classiques en traitement bas niveau comme :

- Manipulation de l'image / des données vidéo
- Affichage, redimensionnement ou sauvegarde d'une image
- Apprentissage et reconnaissance d'objets

Cette bibliothèque est développée à la base en C optimisé et peut profiter de multi-coeurs processeurs. Elle est aussi disponible en Matlab, C++, python et java et opérationnelle sous Linux, Windows et Mac OS X afin d'assurer un calcul efficace en temps réel.

Afin de faciliter la conception d'application complexe, OpenCv fournit plus de 500 fonctions en vision par ordinateur. On peut citer à titre d'exemples : l'inspection des produits, l'imagerie médicale, la sécurité et la robotique. Les sous-bibliothèques sont centrées sur la reconnaissance des formes statistiques.

Au niveau du traitement d'images, elle propose les fonctions suivantes :

- Lecture, affichage, écriture et stockage d'une image.
- Rotation, étirement et redimensionnement d'une image.
- Calcul des différents types d'histogramme (des niveaux de gris ou de couleurs).
- seuillage, lissage et filtrage d'image
- Morphologie mathématique (érosion, dilatation, fermeture), Détection de contours et segmentation en composantes connexes.
- Ajouter à une image, avec plusieurs couleurs un texte, une ligne, un cercle, une ellipse, un rectangle ou une croix.
- Calibration de la caméra : opération importante pour tout traitement d'images pour être une représentation très précise du monde réel (extraire les paramètres de la caméra à partir d'une séquence d'images).

En traitement en temps réel, cette bibliothèque a montré son efficacité vue le nombre de fonction proposée en traitement vidéo :

- Détection des formes géométriques (droite, segment, cercle).
- Détection de visages.
- Détection de point d'intérêts.
- Analyse et suivi d'objet .
- Triangulation de Delaunay et diagramme de Voronoi.
- Enveloppe convexe.

A.3 Applications

Les domaines d'application s'OpenCV sont les suivants :

- Boîtes à outils métrages 2D et 3D,
- Système de reconnaissance faciale
- Reconnaissance des gestes
- Interaction homme-machine (HCI-Human-computer interaction)
- Robotique mobile
- Compréhension de mouvement
- Identification de l'objet

-
- Segmentation et reconnaissance
 - Vision stéréo : perception de la profondeur de 2 caméras
 - Structure du mouvement (SFM-Structure from motion)
 - Le suivi de mouvement

Annexe B

Support logiciel Blender

Nous présentons dans cette annexe le logiciel Blender (voir le chapitre 4), ses fonctionnalités et ses caractéristiques.

B.1 Qu'est ce que c'est Blender ?

Ce logiciel a la spécificité d'avoir une architecture libre et ouverte, open-source, multi-plateforme et accompagnée d'une bibliothèque de modélisation assez importante pour manipuler ses différents fonctionnalités. Les fonctionnalités de cette

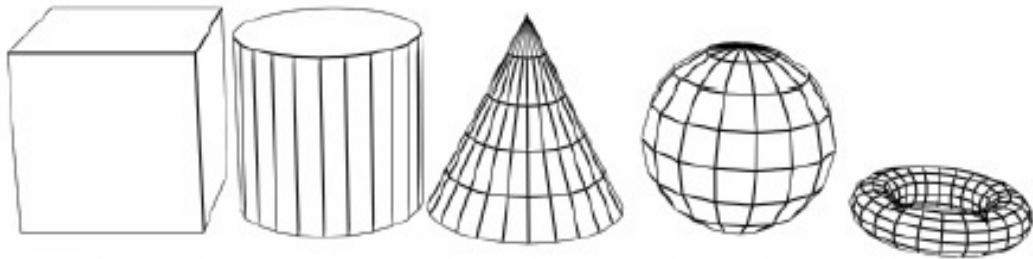


FIGURE B.1 : Exemples d'objets prédéfinis en Blender

bibliothèque permettent de simplifier la représentation des scènes complexes composées d'objets fixes (obstacles) et mobiles (systèmes mécaniques évoluant dans l'espace) ce qui correspond à nos attentes.

La bibliothèque est écrite en langage de programmation C++. Elle est composée d'un ensemble de classes assurant le chargement, la transformation et le rendu de la scène 3D. Les classes principales proposés par Blender [Ble94] sont :

- Vertex : Pour la représentation des vertex (point en 3D), définis par leurs coordonnées cartésiennes.
- Facette : Surface triangulaire élémentaire, composée de 3 vertex représentant les sommets du triangle, et sa normale.
- Polyèdre : il est défini par une liste de faces composant son enveloppe (voir la figure B.1).
- Objet3D : C'est un ensemble de polyèdres liés entre eux par des liaisons de type rigide ou articulation (pivot, prismatique). Il peut être un objet simple(un seul polyèdre)ou complexe, statique ou dynamique (voir la figure B.1).
- Caméra : cette classe représente une caméra, définissant une position d'observation d'un lieu quelconque de l'espace dans une direction donnée.
- Lumière : cette classe permet de définir le type l'intensité et la position de l'éclairage de l'environnement virtuel.

B.2 Les caractéristiques et fonctionnalités de Blender

L'une de ses caractéristiques, c'est qu'il interprète du code python. Le langage python présente l'avantage d'être un langage orienté objet, facilement modifiable et ne pose aucun souci au niveau allocation de mémoire (langage typé non dynamique)[[htt](#)].

pour la conception 3d, Blender nous permet de coder la création, de points (vertices), des arêtes (edges) et des objets(mesh). Il nous donne aussi la possibilité de coder l'importation des objets prédéfinis(cube, sphère, caméra, lampe, armature)ainsi que définir leur configuration (type, position, direction, couleur, intensité) Blender nous offre une haute qualité de rendu et l'aspect visuel réaliste de la scène de façon à ce qu'on utilise les mêmes traitements qu'on applique sur une image réelle.

On peut citer à titre d'exemple le fait qu'on peut intégrer une ou plusieurs caméra sur des éléments de la scène 3D et en passant au rendu on obtient la vue de chaque caméra dans l'environnement Blender par défaut ceci nous permettra de valider notre approche de contrôle par vision des AUVs. On peut aussi coder des mouvements par des courbes IPO.

Annexe C

La vision comme source d'information

C.1 La vision comme source d'information

C.1.1 Caractéristique de l'image numérique

En général, une image est considérée comme une représentation planaire d'une scène ou d'un objet situé dans un espace tridimensionnel. La succession d'images d'une même scène avec une fréquence bien définie (fréquences standard : 24 images/seconde (Cinéma), 25 images/seconde (PAL) ou 30 (NTSC) images/seconde) constituent un flux vidéo permettant d'illustrer un mouvement. Techniquement une image est dite numérique si elle est acquise, créée, traitée ou stockée sous une forme binaire. Elle est composée d'un ensemble de points appelés pixels en anglais "picture element". Il représente l'unité élémentaire constitutive d'une image numérique. Un tableau à deux dimensions contient l'ensemble des pixels constituant ainsi l'image. Une image numérique est caractérisée par trois paramètres :

- Sa définition : le nombre de pixels de l'image
- Sa résolution : le nombre de points par unité de surface (exprimé en Points Par Pouce PPP, en anglais, Dots Per Inch DPI)

- Son format : la nature du codage de la couleur sur un certain nombre de bits
- Il existe plusieurs standards de codage [BFMT04] [Bou05] [Bou03] :
- Le codage noir et blanc : en stockant un bit pour chaque pixel.
 - Le codage niveaux de gris : en stockant un octet dans chaque pixel. Il est alors possible de définir 256 nuances de gris allant du noir au blanc.
 - Le codage couleur : en représentant chaque pixel par trois octets pour les trois composantes RGB, c'est-à-dire au total 24 bits définissant ainsi 16 millions de couleurs.

Ainsi, on peut dire que chaque pixel est caractérisé par sa couleur ou intensité. En effet, celle-ci dépend elle-même d'un autre phénomène qui est la lumière. Elle est définie comme l'ensemble des rayonnements électromagnétiques visibles ou en d'autres termes susceptibles d'être perçus directement par un oeil humain (dont les longueurs d'onde sont comprises entre 400 et 780 nm) (voir la figure C.1).

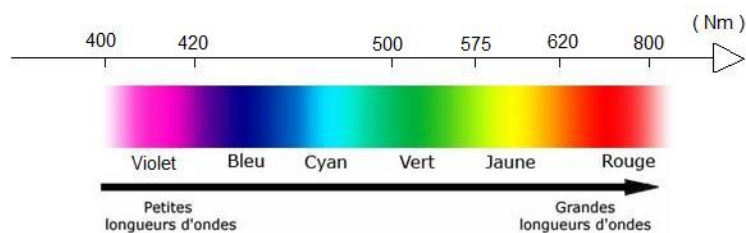


FIGURE C.1 : Spectre de la lumière visible

En réalité, la couleur est une notion beaucoup plus subjective, elle n'est qu'une construction de notre cerveau [Cou92][Nie04]. Physiquement, on peut définir la couleur comme une sensation perçue par l'oeil de l'onde lumineuse reçue résultante d'une longueur d'onde ou d'un mélange de longueurs d'onde. Par exemple, un vert est une onde monochromatique de longueur d'onde 530 nm, par contre la lumière blanche est un spectre continu contenant toutes les longueurs d'onde du domaine du visible. Selon la théorie tri-chromatique de Young-Helmoltz [FMB⁺03][ZB01], trois couleurs peuvent construire une base pour définir la presque totalité des aspects lumineux. Dans le cas du mélange additif aussi (voir Fig. 2.2) (voir la figure C.2), on peut aussi reconstituer toute couleur par une combinaison de rouge, de vert et de bleu, que l'on appelle les couleurs primaires. En fait, ces couleurs correspondent

aux trois longueurs d'onde auxquelles répondent les trois types de cônes de l'oeil humain.

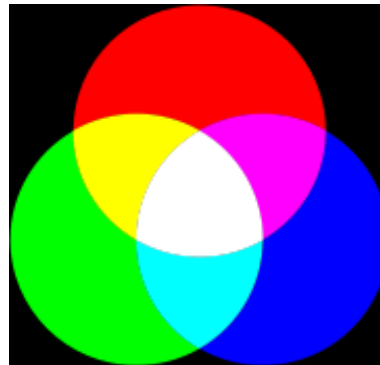


FIGURE C.2 : Synthèse additive des couleurs

C.1.2 La vision humaine comparé à la vision artificielle

Composé de plusieurs éléments permettant la réception du rayonnement incident, la formation de l'image des objets perçus et le traitement des informations recueillies, l'oeil est l'organe de base de la vision humaine (voir la figure C.3).

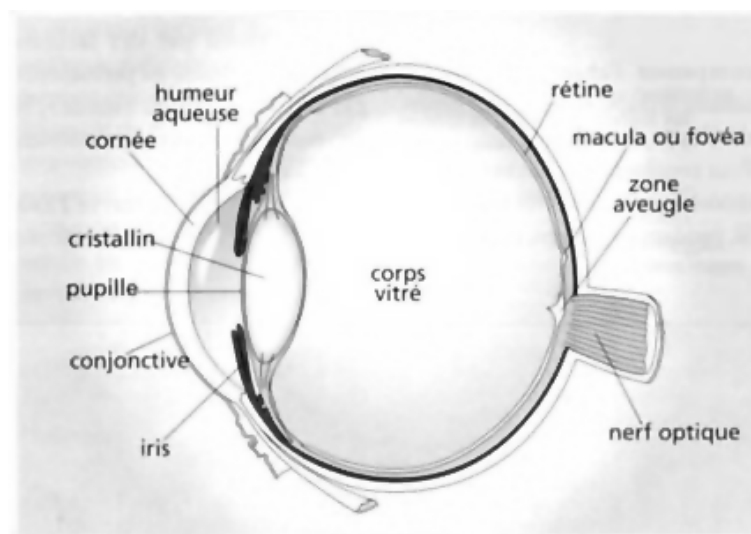


FIGURE C.3 : Image des composants de l'oeil humain [ZMP01],[ZM]

L'oeil humaine est constitué essentiellement de quatre éléments :

- La rétine : contenant des cellules photosensibles : les cônes et les bâtonnets, la rétine est l'organe sur lequel se forment les images.

- L’iris : il a le même rôle qu’un diaphragme. Il dose la quantité de lumière pénétrante dans l’oeil. Son ouverture centrale est la pupille.
- Le cristallin : grâce à sa capacité à modifier sa courbure, il peut être assimilé à une lentille à focale variable.
- La macula est la zone centrale de la rétine caractérisée par une concentration maximale de cônes. Elle contient en son centre une petite dépression appelé la fovéa.

Les bâtonnets sont les organes responsables de la vision nocturne avec un maximum de sensibilité de 510 nm. Leur sensibilité est liée à un colorant qui blanchit à la lumière du jour ainsi on peut expliquer leur insensibilité durant la journée. Les bâtonnets ne fournissent qu’une réponse photométrique et ne permettent donc pas de déterminer les couleurs. Tandis que les cônes fournissent une réponse photométrique et chromatique avec des pigments possédant des maximums d’absorption se situent dans le bleu (450nm), le vert (540nm) ou le rouge (580nm).

Le mécanisme général de fonctionnement de l’oeil humain est ainsi : lorsque les rayons lumineux sont captés par la pupille, elles sont réfractées par la cornée et le cristallin formant ainsi une image sur la rétine. Celle-ci transforme ensuite l’énergie lumineuse en message nerveux riche en information qui seront par suite interprétés et corrigés par le cerveau. Ce processus de perception des couleurs est très complexe. Il demeure difficile à reproduire par des moyens artificiels [FSB84].

L’acquisition d’une image couleur en vision artificielle, peut se faire avec plusieurs types de caméras : caméras analogiques, numériques, linéaires ou matricielles. Chacune de ces caméras possèdent un élément sensible à la lumière reçue.

Nous allons présenter dans cette partie les capteurs standard pour l’acquisition d’images numériques en couleur. Les principaux capteurs analogiques utilisés aujourd’hui pour l’acquisition d’images couleur sont [MKL94] [DA10] [Asc11] :

- Les capteurs CCD (Dispositifs à Couplage de Charge) : ils captent la lumière sur les petits photosites situés à leur surface qui sont généralement organisées en matrice. Les capteurs CCD tirent leur nom de la manière dont le nombre de charges est lu après une exposition à la lumière. La lumière transite par l’objectif

et sera convertie en impulsion électrique par une photodiode sensible à la lumière . Ces impulsions électriques passent par un convertisseur analogique/numérique qui applique des algorithmes pour numérisant ainsi l'image.

- Les capteurs CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductors) : Ce sont des mini circuits gravés sur des puces de silicium. Ils sont très utilisés sur les appareils à bas cout et sont généralement définis comme étant des détecteurs semi-conducteurs à oxyde de métal complémentaire. Chaque mini-circuit est composé d'une photodiode et d'une logique d'amplification puis d'obturation. Ils transforment la lumière capturée en impulsion électrique comme dans le cas des capteurs CDD.

Il existe deux types standard de caméras :les caméras CDD et CMOS.

En ce qui concerne les caméras CCD couleur, on peut distinguer deux types de technologies : mono-CCD et tri-CCD. Comme leur nom l'indique, les cameras couleur mono-CCD sont équipées d'un seul capteur CCD. Les composantes couleurs de la scène sont obtenues en plaçant une mosaïque de filtres colorés, de telle sorte que chaque cellule du capteur CCD ne perçois qu'une des trois composantes rouge, verte et bleue.

Dans le cas des capteurs d'images mono-CCD, ce filtre n'existe pas ce qui veut dire que chaque cellule reçoit un spectre complet. Or pour obtenir l'information couleur complète il faut au moins trois cellules sauf qu'il n'existe qu'une seule ceci engendre une perte de résolution.

C'est à partir de cet inconvénient que les caméras tri-CCD ont vu le jour. Celles-ci sont équipées d'un dispositif à base de prisme, comprenant 3 capteurs CCD, évitent la dégradation de la résolution de l'image couleur par un système de mosaïque et donc chaque point de l'image correspond à 3 cellules CCD.

Comme pour les capteurs CCD, les caméras CMOS sont souvent organisées en lignes et en colonnes et récupèrent l'information de couleur à l'aide d'un filtre. La technologie CMOS est moins chère au niveau cout de fabrication par rapport au CCD. Elle a d'une part une faible consommation d'énergie et d'autre part plus de rapidité pour obtenir l'image. On trouve généralement les capteurs CMOS sur

divers appareils, notamment les caméras USB type webcam. Comme on vient de le voir, les technologies CCD et CMOS sont les plus utilisées.

C.1.3 Les espaces de représentation des couleurs RGB et HSV

Nous venons de voir deux capteurs couleurs qui sont l'oeil et la camera. Dans les deux cas, les images sont codées en RGB (rouge, vert, bleu), il existe cependant plusieurs autres espaces couleurs qui peuvent être utilisés. On s'intéressera particulièrement dans notre étude aux systèmes calorimétriques RGB et HSV.

l'espace RGB est définie par trois vecteurs directeurs qui forment un repère d'un espace vectoriel. Dans cet espace, chaque couleur correspond à un point qui définit un vecteur couleur. La projection du vecteur sur les différents axes du repère peuvent être identifiées comme étant les composantes trichromatiques R_c , G_c et B_c . On peut remarquer que certains de ces points ont des coordonnées négatives. Ils correspondent à des stimuli de couleur que l'on ne peut obtenir par synthèse additive. Le reste des points correspondent à des stimuli de couleur dont les composantes trichromatiques sont positives et par conséquent, ils sont contenus dans le cube des couleurs (voir la figure C.4).

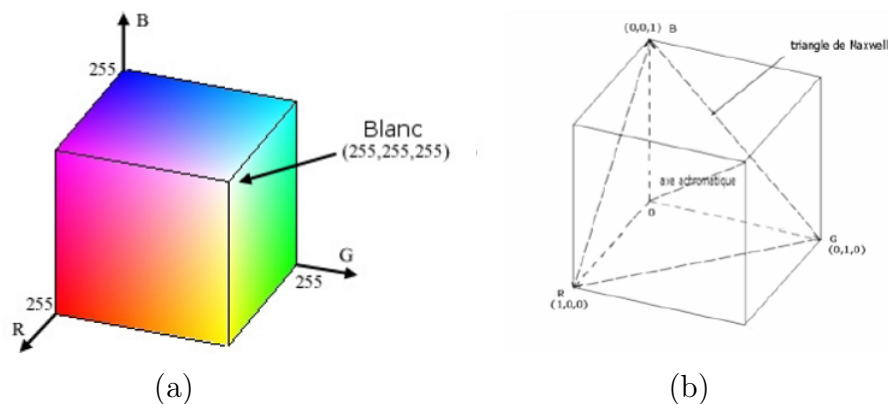


FIGURE C.4 : (a) Cube des couleurs représentant l'espace RGB, (b) le triangle de Maxwell représentant l'espace RGB normalisé.

L'origine de l'espace vectoriel correspond au noir (0, 0, 0), tant dis que le blanc de référence (1, 1, 1) est défini comme le mélange unitaire des trois couleurs primaires. La droite passant par le noir et le blanc est appelée axe achromatique. Les points de cette droite d'équation $R = G = B$ représentent des niveaux de gris allant du noir au blanc. L'espace RGB est l'espace le plus utilisé ceci s'explique par le fait que les différents supports matériels en dépendent comme la carte d'acquisition, cartes vidéos, caméras, écrans. Ces derniers effectuent leurs échanges d'information uniquement en utilisant des triplets d'entiers (R, G, B) codés sur 8 bits (entre 0 et 255).

L'espace HSV (Hue, Saturation, Value) est particulièrement utilisé pour des activités graphiques. Dans diverses applications, on est amené à choisir une couleur qui sera appliquée à un élément. Il est défini par la roue HSV. La teinte est représentée par une forme circulaire. un triangle séparé est aussi utilisé pour représenter la saturation et la valeur. Ainsi, l'axe vertical du triangle représente la saturation, alors que l'axe horizontal représente la Valeur. Une couleur est alors choisie, d'abord en sélectionnant la Teinte sur la partie circulaire puis la saturation et la Valeur sur le triangle.

Annexe D

Publications et conférences

- Publications

1. Ben Saad Seifallah, Zerr Benoit, Dambreville Frédéric, Probst Irvin.
« Hybrid Coordination Strategy of a Group of Cooperating Autonomous Underwater Vehicles ». IFAC Workshop on Multivehicle Systems MVS 2015, May 2015, Genova, Italy. Elsevier, 48 (5), pp.47-52, Proceedings of 3rd IFAC Workshop on Multivehicle Systems MVS 2015.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315007016>.

- Conférences

1. Ben Saad Seifallah, Zerr Benoit, Dambreville Frédéric, Probst Irvin.
« Hybrid coordination strategy for systematic and detailed optical acquisition of the seabed by a group of robots ». Proceedings of the International Conference on Underwater Networks & Systems, Rome, Italy, November 12 - 14, 2014.
<http://doi.acm.org/10.1145/2671490.2677094> .
2. Ben Saad Seifallah, Zerr Benoit, Dambreville Frédéric, Probst Irvin.
« Conception d'un algorithme de coordination et de coopération d'un groupe

de robot sous-marin communicants ». 4ème Journée des doctorants de l'Ecole Doctorale SICMA (Santé, Information, Communication, Mathématiques, Matière). Brest, septembre 2014.

3. 1^{er} Prix de « *Concours "Projet innovant" / Doctoriales Bretagne 2015* ». Rennes, France, Février 2015, pour le projet « I can fly » : création d'une plateforme de co-avionnage.

<https://doctoriales2015.ueb.eu/?q=fr/concours-projet-innovant>.

Bibliographie

- [AAC10] Gianluca Antonelli, Filippo Arrichiello, and Stefano Chiaverini. Flo-cking for multi-robot systems via the null-space-based behavioral control. *Swarm Intelligence*, 4(1) :37–56, 2010.
- [ABMK05] Andreas Arnold-Bos, Jean-Philippe Malkasse, and Gilles Kervern. Towards a model-free denoising of underwater optical images. In *Oceans 2005-Europe*, volume 1, pages 527–532. IEEE, 2005.
- [ACL⁺11] Josep Aulinas, Marc Carreras, Xavier Llado, Joaquim Salvi, Rafael Garcia, Ricard Prados, and Yvan R Petillot. Feature extraction for underwater visual slam. In *OCEANS, 2011 IEEE-Spain*, pages 1–7. IEEE, 2011.
- [Ado05] Lounis Adouane. *Behavioral and reactive architectures of control for the cooperation of a group of mobile robots*. Theses, Université de Franche-Comté, April 2005.
- [AFH⁺98] R. Alami, S. Fleury, M. Herrb, F. Ingrand, and F. Robert. Multi-robot cooperation in the martha project. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 5(1) :36–47, Mar 1998.
- [Alt03] C.V Alt. Autonomous underwater vehicles. Technical report, In Workshop report of Autonomous and Lagragian Platforms and Sensors (ALPS), La Jolla, California, 2003.
- [AMI89] H. Asama, A. Matsumoto, and Y. Ishida. Design of an autonomous and distributed robot system : Actress. In *Intelligent Robots and*

- Systems '89. The Autonomous Mobile Robots and Its Applications. IROS '89. Proceedings., IEEE/RSJ International Workshop on*, pages 283–290, Sep 1989.
- [APP02] Tamio Arai, Enrico Pagello, and Lynne E. Parker. Editorial : Advances in multi-robot systems, 2002.
- [Ark98] Ronald C. Arkin. *An Behavior-based Robotics*. MIT Press, Cambridge, MA, USA, 1st edition, 1998.
- [Arr06] Filippo Arrichiello. Coordination control of multiple mobile robots. *UNIVERSITA DEGLI STUDI DI CASSINO*, 2006.
- [AS91] MD Ardema and JM Skowronski. Dynamic game applied to coordination control of two arm robotic system. In *Differential Games Developments in Modelling and Computation*, pages 118–130. Springer, 1991.
- [Asc11] Georges Asch. *Acquisition de données-3ème édition-Du capteur à l'ordinateur : Du capteur à l'ordinateur*. Dunod, 2011.
- [ASKK08] Noa Agmon, Vladimir Sadov, Gal A Kaminka, and Sarit Kraus. The impact of adversarial knowledge on adversarial planning in perimeter patrol. In *Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems-Volume 1*, pages 55–62. International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, 2008.
- [ATYM93] Peter K Allen, Aleksandar Timcenko, Billibon Yoshimi, and Paul Michelman. Automated tracking and grasping of a moving object with a robotic hand-eye system. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 9(2) :152–165, 1993.
- [AUS11] Noa Agmon, Daniel Urieli, and Peter Stone. Multiagent patrol generalized to complex environmental conditions. In *AAAI*, 2011.

- [BA98] T. Balch and R.C. Arkin. Behavior-based formation control for multirobot teams. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 14(6) :926–939, Dec 1998.
- [BA99] S.C. Botelho and R. Alami. M+ : a scheme for multi-robot cooperation through negotiated task allocation and achievement. In *Robotics and Automation, 1999. Proceedings. 1999 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1234–1239 vol.2, 1999.
- [BALM10] Ahmed Benzerrouk, Lounis Adouane, Laurent Lequievre, and Philippe Martinet. Navigation of multi-robot formation in unstructured environment using dynamical virtual structures. In *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 5589–5594. IEEE, 2010.
- [BAM14] Ahmed Benzerrouk, Lounis Adouane, and Philippe Martinet. Stable navigation in formation for a multi-robot system based on a constrained virtual structure. *Robotics and Autonomous Systems*, 62(12) :1806–1815, 2014.
- [Baz08] Stéphane Bazeille. *Vision sous-marine monoculaire pour la reconnaissance d’objets*. PhD thesis, Brest, 2008.
- [BC04] Tim D Barfoot and Christopher M Clark. Motion planning for formations of mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 46(2) :65–78, 2004.
- [BDD⁺08] A. Bicchi, A. Danesi, G. Dini, S. La Porta, Lucia Pallottino, I.M. Savino, and R. Schiavi. Heterogeneous wireless multirobot system. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 15(1) :62–70, March 2008.
- [Ben11] Ahmed Benzerrouk. *Architecture de contrôle hybride pour systèmes multi-robots mobiles*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II, 2011.

- [BFMT04] P Bonton, C Fernandez-Maloigne, and A Tremeau. Image numerique couleur de l'acquisition au traitement. *DUNOD, ISBN, 2(10) :006843, 2004.*
- [BG91] DP Barnes and JO Gray. Behaviour synthesis for co-operant mobile robot control. In *Control 1991. Control'91., International Conference on*, pages 1135–1140. IET, 1991.
- [BH00a] Tucker Balch and Maria Hybinette. Social potentials for scalable multi-robot formations. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 73–80. IEEE, 2000.
- [BH00b] Tucker Balch and Maria Hybinette. Social potentials for scalable multi-robot formations. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 73–80. IEEE, 2000.
- [BJCR01] P. Baccou, B. Jouvencel, V. Creuze, and C. Rabaud. Cooperative positioning and navigation for multiple auv operations. In *OCEANS, 2001. MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 3, pages 1816–1821 vol.3, 2001.
- [Ble] Blender Online Community. Blender - a 3d modelling and rendering package.
- [Ble94] Blender Online Community. *Blender - a 3D modelling and rendering package*. Blender Foundation, Blender Institute, Amsterdam, 1994.
- [BLF09] Alexander Bahr, John J. Leonard, and Maurice F. Fallon. Cooperative localization for autonomous underwater vehicles. *Int. J. Rob. Res.*, 28(6) :714–728, June 2009.
- [BLH⁺01a] Randal W Beard, Jonathan Lawton, Fred Y Hadaegh, et al. A coordination architecture for spacecraft formation control. *IEEE Transactions on control systems technology*, 9(6) :777–790, 2001.

- [BLH01b] R.W. Beard, J. Lawton, and F.Y. Hadaegh. A coordination architecture for spacecraft formation control. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 9(6) :777–790, Nov 2001.
- [BMF⁺00] W. Burgard, M. Moors, D. Fox, R. Simmons, and S. Thrun. Collaborative multi-robot exploration. In *Robotics and Automation, 2000. Proceedings. ICRA '00. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 476–481 vol.1, 2000.
- [BMMM90] R.A. Brooks, P. Maes, M.J. Mataric, and G. More. Lunar base construction robots. In *Intelligent Robots and Systems '90. 'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS '90. IEEE International Workshop on*, pages 389–392 vol.1, Jul 1990.
- [BMSS05] W. Burgard, M. Moors, C. Stachniss, and F.E. Schneider. Coordinated multi-robot exploration. *Robotics, IEEE Transactions on*, 21(3) :376–386, June 2005.
- [Bou93] Samia Boukir. *Reconstruction 3D d'un environnement statique par vision active*. PhD thesis, Rennes 1, 1993.
- [Bou03] René Bouillot. *Cours de photographie numérique : principes, acquisition et stockage*. Dunod, 2003.
- [Bou05] René Bouillot. *Cours de traitement numérique de l'image*. Dunod, 2005.
- [Bro86] R.A. Brooks. A robust layered control system for a mobile robot. *Robotics and Automation, IEEE Journal of*, 2(1) :14–23, Mar 1986.
- [BTMM05] J. Bom, B. Thuilot, F. Marmoiton, and P. Martinet. Nonlinear control for urban vehicles platooning, relying upon a unique kinematic gps. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 4138–4143, April 2005.
- [BVO08] Matko Barisic, Zoran Vukic, and Edin Omerdic. Introduction of rotors to a virtual potentials uuv trajectory planning framework. In

- Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles*, volume 2, pages 196–201, 2008.
- [CC04a] SY Chiem and E Cervera. Vision-based robot formations with bezier trajectories. In *Intelligent Autonomous Systems*, volume 8, pages 191–198, 2004.
- [CC04b] SY Chiem and E Cervera. Vision-based robot formations with bezier trajectories. In *Intelligent Autonomous Systems*, volume 8, pages 191–198, 2004.
- [CCL⁺90a] P. Caloud, Wonyun Choi, J.-C. Latombe, C. Le Pape, and M. Yim. Indoor automation with many mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems '90. 'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS '90. IEEE International Workshop on*, pages 67–72 vol.1, Jul 1990.
- [CCL⁺90b] P. Caloud, Wonyun Choi, J.-C. Latombe, C. Le Pape, and M. Yim. Indoor automation with many mobile robots. In *Intelligent Robots and Systems '90. 'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS '90. IEEE International Workshop on*, pages 67–72 vol.1, Jul 1990.
- [CCMM] Andrea Caiti, Vincenzo Calabrò, Daniele Meucci, and Andrea Munafò. Underwater robots : Past, present and future.
- [CFKM95] Y.U. Cao, A.S. Fukunaga, A.B. Kahng, and F. Meng. Cooperative mobile robotics : antecedents and directions. In *Intelligent Robots and Systems 95. 'Human Robot Interaction and Cooperative Robots', Proceedings. 1995 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 1, pages 226–234 vol.1, Aug 1995.
- [CFR06] David Camacho, Fernando Fernández, and Miguel A. Rodelgo. Roboskeleton : An architecture for coordinating robot soccer agents. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19(2) :179 – 188, 2006.

- [CGM06] Martina Chiaramonti, Fabrizio Giulietti, and Giovanni Mengali. Formation control laws for autonomous flight vehicles. In *null*, pages 1–5. IEEE, 2006.
- [CL94] Qin Chen and JYS Luh. Coordination and control of a group of small mobile robots. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, pages 2315–2320. IEEE, 1994.
- [Cok93] Peter I Coke. Visual control of robot manipulators, 1993.
- [Cou92] Jean-Pierre Couwenbergh. *L'indispensable pour maîtriser la couleur*. Marabout, 1992.
- [Cou09] Iain D Couzin. Collective cognition in animal groups. *Trends in cognitive sciences*, 13(1) :36–43, 2009.
- [CP02] Stefano Carpin and Lynne E Parker. Cooperative leader following in a distributed multi-robot system. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 2994–3001. IEEE, 2002.
- [CRE91] Francois Chaumette, Patrick Rives, and Bernard Espiau. Positioning of a robot with respect to an object, tracking it and estimating its velocity by visual servoing. In *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, pages 2248–2253. IEEE, 1991.
- [CRL03] C.M. Clark, S.M. Rock, and J.-C. Latombe. Motion planning for multiple mobile robots using dynamic networks. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, volume 3, pages 4222–4227 vol.3, Sept 2003.
- [CSR⁺03] Majed Chambah, Dahbia Semani, Arnaud Renouf, Pierre Courtellemont, and Alessandro Rizzi. Underwater color constancy : enhancement of automatic live fish recognition. In *Electronic Imaging 2004*, pages 157–168. International Society for Optics and Photonics, 2003.

- [CTL⁺06a] Zhiqiang Cao, Min Tan, Lei Li, Nong Gu, and Shuo Wang. Cooperative hunting by distributed mobile robots based on local interaction. *Robotics, IEEE Transactions on*, 22(2) :402–406, April 2006.
- [CTL⁺06b] Zhiqiang Cao, Min Tan, Lei Li, Nong Gu, and Shuo Wang. Cooperative hunting by distributed mobile robots based on local interaction. *Robotics, IEEE Transactions on*, 22(2) :402–406, April 2006.
- [DA10] P Desgouttes and G Asch. Les capteurs en instrumentation industrielle. *Dunod L'Usine Nouvelle*, 2010.
- [dah09] Multi-robot task allocation through vacancy chain scheduling. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(6-7) :674 – 687, 2009.
- [Dan02] E. Danson. The economics of scale : using auvs for wide-area hydrographic survey and ocean data acquisition. In *In Proceedings of FIG XXII International Congress*, pages 1–15, apr 2002.
- [Dav02] A. Davids. Urban search and rescue robots : from tragedy to technology. *Intelligent Systems, IEEE*, 17(2) :81–83, March 2002.
- [DFCI⁺09] Francesco Maria Delle Fave, Stefano Canu, Luca Iocchi, Daniele Nardi, and Vittorio Amos Ziparo. Multi-objective multi-robot surveillance. In *Autonomous Robots and Agents, 2009. ICARA 2009. 4th International Conference on*, pages 68–73. IEEE, 2009.
- [DFK⁺02a] A.K. Das, R. Fierro, V. Kumar, J.P. Ostrowski, J. Spletzer, and C.J. Taylor. A vision-based formation control framework. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(5) :813–825, Oct 2002.
- [DFK⁺02b] Aavek K Das, Rafael Fierro, Vijay Kumar, James P Ostrowski, John Spletzer, and Camillo J Taylor. A vision-based formation control framework. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(5) :813–825, 2002.

- [DJMW96] Gregory Dudek, Michael R.M. Jenkin, Evangelos Milios, and David Wilkes. A taxonomy for multi-agent robotics. *Autonomous Robots*, 3(4) :375–397, 1996.
- [DJP⁺05] Gregory Dudek, Michael Jenkin, Chris Prahacs, Andrew Hogue, Junaed Sattar, Philippe Giguere, Andrew German, Hui Liu, Shane Saunderson, Arlene Ripsman, et al. A visually guided swimming robot. In *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 3604–3609. IEEE, 2005.
- [DKF⁺09] Michael Defoort, Annemarie Kokosy, Thierry Floquet, Wilfrid Perruquetti, and Jorge Palos. Motion planning for cooperative unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges : A distributed receding horizon approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(11) :1094 – 1106, 2009.
- [DM90] Y. Demazeau and J.-P. Müller. Decentralized artificial intelligence. In Y. Demazeau and J.-P. Müller, editors, *Decentralized A.I. : Proc. of the First European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World, Cambridge, England*, pages 3–13. North-Holland, Amsterdam, 1990.
- [DOK98] Jaydev P Desai, Jim Ostrowski, and Vijay Kumar. Controlling formations of multiple mobile robots. In *Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 2864–2869. IEEE, 1998.
- [DTA04] FR Dalglish, SW Tetlow, and RL Allwood. Hammerhead : an auv with an integral laser imaging sensor. *ATUV at Oceanology*, pages 16–17, 2004.
- [DTA05] FR Dalglish, SW Tetlow, and RL Allwood. Vision-based navigation of unmanned underwater vehicles : a survey. part 2 : Vision-based station-keeping and positioning. In *Proceedings of the Institute of Marine*

- Engineering, Science and Technology. Part B, Journal of marine design and operations*, number 8, pages 13–19. Institute of Marine Engineering, Science and Technology, 2005.
- [EBOA04] DB Edwards, TA Bean, DL Odell, and MJ Anderson. *A leader-follower algorithm for multiple AUV formations*. IEEE, 2004.
- [ELDL11a] Gilberto Echeverria, Nicolas Lassabe, Arnaud Degroote, and Séverin Lemaignan. Modular open robots simulation engine : Morse. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 46–51. IEEE, 2011.
- [ELDL11b] Gilberto Echeverria, Nicolas Lassabe, Arnaud Degroote, and SÃ©verin Lemaignan. Modular open robots simulation engine : Morse. In *ICRA*, pages 46–51. IEEE, 2011.
- [ELP87] Michael Erdmann and Tomas Lozano-Perez. On multiple moving objects. *Algorithmica*, 2(1-4) :477–521, 1987.
- [Esp02] François-Xavier Espiau. *Métrologie 3D par vision active sur des objets naturels sous-marins*. PhD thesis, Université de nice-sophia antipolis, 2002.
- [ESR⁺03] Duane R Edgington, Karen Salamy, Michael Risi, RE Sherlock, Dirk Walther, Christof Koch, et al. Automated event detection in underwater video. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 5, pages P2749–P2753. IEEE, 2003.
- [FBKT00] Dieter Fox, Wolfram Burgard, Hannes Kruppa, and Sebastian Thrun. A probabilistic approach to collaborative multi-robot localization. *Autonomous Robots*, 8(3) :325–344, 2000.
- [FCF⁺06] N Fair, AD Chave, Lee Freitag, James Preisig, SN White, Dana Yoerger, and F Sonnichsen. Optical modem technology for seafloor observatories. In *OCEANS 2006*, pages 1–6. IEEE, 2006.

- [FDKO01] Rafael Fierro, Aveek K Das, Vijay Kumar, and James P Ostrowski. Hybrid control of formations of robots. In *Robotics and Automation, 2001. Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 157–162. IEEE, 2001.
- [FG02] Gian Luca Foresti and Stefania Gentili. A hierarchical classification system for object recognition in underwater environments. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 27(1) :66–78, 2002.
- [FGZ98] Gian Luca Foresti, Stefania Gentili, and Massimo Zampato. A vision-based system for autonomous underwater vehicle navigation. In *OCEANS'98 Conference Proceedings*, volume 1, pages 195–199. IEEE, 1998.
- [FIN04] Alessandro Farinelli, Luca Iocchi, and Daniele Nardi. Multi-robot systems : A classification focused on coordination. *IEEE TRANS. SYST., MAN, CYBERN. B*, 34 :2015–2028, 2004.
- [FLB⁺06] Edward Fiorelli, Naomi Ehrich Leonard, Pradeep Bhatta, Derek Paley, Ralf Bachmayer, David M Fratantoni, et al. Multi-auv control and adaptive sampling in monterey bay. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 31(4) :935–948, 2006.
- [FLM⁺04] Edward Fiorelli, Naomi Ehrich Leonard, Senior Member, Pradeep Bhatta, Derek A. Paley, Student Member, Ralf Bachmayer, and David M. Fratantoni. Multi-auv control and adaptive sampling in monterey bay. In *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pages 935–948, 2004.
- [FLS⁺02a] John T Feddema, Chris Lewis, David Schoenwald, et al. Decentralized control of cooperative robotic vehicles : theory and application. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(5) :852–864, 2002.

- [FLS02b] J.T. Feddema, C. Lewis, and D.A. Schoenwald. Decentralized control of cooperative robotic vehicles : theory and application. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(5) :852–864, Oct 2002.
- [FM02] Jakob Fredslund and Maja J Mataric. A general algorithm for robot formations using local sensing and minimal communication. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(5) :837–846, 2002.
- [FMB⁺03] Bruce Fraser, Chris Murphy, Fred Bunting, Philippe Beaudran, Philip Escartin, and Bernard Jolival. *Gestion des couleurs*. CampusPress, 2003.
- [FNKB89] T. Fukuda, S. Nakagawa, Y. Kawauchi, and M. Buss. Structure decision method for self organising robots based on cell structures-cebot. In *Robotics and Automation, 1989. Proceedings., 1989 IEEE International Conference on*, pages 695–700 vol.2, May 1989.
- [For01] Gian Luca Foresti. Visual inspection of sea bottom structures by an autonomous underwater vehicle. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, IEEE Transactions on*, 31(5) :691–705, 2001.
- [Fos02] Thor I Fossen. *Marine control systems : Guidance, navigation and control of ships, rigs and underwater vehicles*. Marine Cybernetics Trondheim, 2002.
- [FP95] Jacques Ferber and Jean-François Perrot. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions, 1995.
- [FPOA98] Carlo Ferrari, Enrico Pagello, Jun Ota, and Tamio Arai. Multirobot motion coordination in space and time. *Robotics and autonomous systems*, 25(3) :219–229, 1998.
- [FR98] Stephen D Fleischer and Stephen M Rock. Experimental validation of a real-time vision sensor and navigation system for intelligent underwater vehicles. In *Proc. of the 1998 International Conference on Intelligent Vehicles*, 1998.

- [FSB84] Jay Wright Forrester and Patrick Sylvestre-Baron. *Principes des systèmes*. Presses universitaires de Lyon, 1984.
- [FUKA92] Toshio Fukuda, Tsuyoshi Ueyama, Yoshio Kawauchi, and Fumihito Arai. Concept of cellular robotic system (cebot) and basic strategies for its realization. *Computers & Electrical Engineering*, 18(1) :11 – 39, 1992.
- [GC02] Shuzhi S. Ge and Yun J Cui. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Autonomous Robots*, 13(3) :207–222, 2002.
- [GCYL03] Jenhwa Guo, Sheng-Wen Cheng, Cheng-Yang Ying, and Te-Chih Liu. Image registration for the underwater inspection using the maximum a posteriori technique. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 28(1) :55–61, 2003.
- [GH08] Tove Gustavi and Xiaoming Hu. Observer-based leader-following formation control using onboard sensor information. *IEEE Transactions on Robotics*, 24(6) :1457–1462, 2008.
- [GHB⁺09] D. Gouaillier, V. Hugel, P. Blazevic, C. Kilner, Jerome Monceaux, P. Lafourcade, Brice Marnier, Julien Serre, and Bruno Maisonnier. Mechatronic design of nao humanoid. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, pages 769–774, May 2009.
- [GL12] Josep Guerrero and Rogelio Lozano. *Flight formation control*. John Wiley & Sons, 2012.
- [GM] Brian P. Gerkey and Maja J Mataric. Murdoch : Publish/subscribe task allocation for heterogeneous agents. In *in Fourth International Conference on Autonomous Agents*, pages 203–204. ACM Press.

- [GM02] Brian P. Gerkey and Maja J. Mataric. Sold! : auction methods for multirobot coordination. *IEEE T. Robotics and Automation*, 18(5) :758–768, 2002.
- [GNC02] Rafael Garcia, Tudor Nicosevici, and Xevi Cufí. On the way to solve lighting problems in underwater imaging. In *OCEANS'02 MTS/IEEE*, volume 2, pages 1018–1024. IEEE, 2002.
- [GPRC02] Rafael García, J Puig, Pere Ridao, and Xavier Cufi. Augmented state kalman filtering for auv navigation. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, volume 4, pages 4010–4015. IEEE, 2002.
- [GS99] Theo Gevers and Arnold WM Smeulders. Color-based object recognition. *Pattern recognition*, 32(3) :453–464, 1999.
- [Hai04] Christine M Haissig. Military formation flight as a model for increased capacity in civilian airspace. In *Digital Avionics Systems Conference, 2004. DASC 04. The 23rd*, volume 1, pages 1–C. IEEE, 2004.
- [hc] <http://www.access.com>. Ac-rov.
- [HFQG06] Jiangyang Huang, S.M. Farritor, A. Qadi, and S. Goddard. Localization and follow-the-leader control of a heterogeneous group of mobile robots. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 11(2) :205–215, April 2006.
- [HKH10] Michael J Hamilton, Stephanie Kemna, and David Hughes. Antisubmarine warfare applications for autonomous underwater vehicles : the glint09 sea trial results. *Journal of Field Robotics*, 27(6) :890–902, 2010.
- [HM95] Radu Horaud and Olivier Monga. *Vision par ordinateur : outils fondamentaux*. Editions Hermès, 1995.
- [HPTO⁺03] T. Huntsberger, P. Pirjanian, A. Trebi-Ollennu, H. Das Nayar, H. Aghazarian, A.J. Ganino, M. Garrett, S.S. Joshi, and P.S. Schenker.

- Campout : a control architecture for tightly coupled coordination of multirobot systems for planetary surface exploration. *Systems, Man and Cybernetics, Part A : Systems and Humans, IEEE Transactions on*, 33(5) :550–559, Sept 2003.
- [HS09] István Harmati and Krzysztof Skrzypczyk. Robot team coordination for target tracking using fuzzy logic controller in game theoretic framework. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(1) :75 – 86, 2009.
- [HSS84] John E Hopcroft, Jacob Theodore Schwartz, and Micha Sharir. On the complexity of motion planning for multiple independent objects ; pspace-hardness of the " warehouseman's problem". *The International Journal of Robotics Research*, 3(4) :76–88, 1984.
- [htt] <http://www.python.org>. python.
- [Hua09] L Huang. Velocity planning for a mobile robot to track a moving target - a potential field approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(1) :55–63, 2009.
- [HV00] Roberto Horowitz and Pravin Varaiya. Control design of an automated highway system. *Proceedings of the IEEE*, 88(7) :913–925, 2000.
- [Ish91] Akira Ishimaru. *Electromagnetic wave propagation, radiation, and scattering*, volume 1. Prentice Hall Englewood Cliffs, NJ, 1991.
- [JB91] Won Jang and Zeungnam Bien. Feature-based visual servoing of an eye-in-hand robot with improved tracking performance. In *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, pages 2254–2260. IEEE, 1991.
- [JBT95] Armin B. Cremers Dieter Fox Thomas Hofmann Frank E. Schneider Jiannis Strikos Joachim Buhmann, Wolfram Burgard and Sebastian Thrun. The mobile robot rhino. In *AI Magazine*, volume 2, pages 31 – 38, 1995.

- [JFLG11] Elizabeth Jensen, Michael Franklin, Sara Lahr, and Maria Gini. Sustainable multi-robot patrol of an open polyline. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 4792–4797. IEEE, 2011.
- [JHR04] Duncan E Jackson, Mike Holcombe, and Francis LW Ratnieks. Trail geometry gives polarity to ant foraging networks. *Nature*, 432(7019) :907–909, 2004.
- [JLB94] Kai Jin, Ping Liang, and G. Beni. Stability of synchronized distributed control of discrete swarm structures. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, pages 1033–1038 vol.2, May 1994.
- [KB91] Yoram Koren and Johann Borenstein. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In *Robotics and Automation, 1991. Proceedings., 1991 IEEE International Conference on*, pages 1398–1404. IEEE, 1991.
- [KC05] Donna M Kocak and Frank M Caimi. The current art of underwater imaging—with a glimpse of the past and vision of the future. *Marine Technology Society Journal*, 39(3) :5–26, 2005.
- [KFK⁺02] Fumio Kanehiro, Kiyoshi Fujiwara, Shuuji Kajita, Kazuhito Yokoi, Kenji Kaneko, Hirohisa Hirukawa, Yoshihiko Nakamura, and Katsu Yamane. Open architecture humanoid robotics platform. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 24–30. IEEE, 2002.
- [KH04] Nathan Koenig and Andrew Howard. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator. In *Intelligent Robots and Systems, 2004.(IROS 2004). Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 2149–2154. IEEE, 2004.

- [Kha86] Oussama Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *The international journal of robotics research*, 5(1) :90–98, 1986.
- [KS98] Nak Yong Ko and Reid G Simmons. The lane-curvature method for local obstacle avoidance. In *Intelligent Robots and Systems, 1998. Proceedings., 1998 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 1615–1621. IEEE, 1998.
- [KSGS⁺08] Gal Kaminka, Ruti Schechter-Glick, Vladimir Sadov, et al. Using sensor morphology for multirobot formations. *Robotics, IEEE Transactions on*, 24(2) :271–282, 2008.
- [LC09a] Geunho Lee and Nak Young Chong. Decentralized formation control for small-scale robot teams with anonymity. *Mechatronics*, 19(1) :85–105, 2009.
- [LC09b] Geunho Lee and Nak Young Chong. Decentralized formation control for small-scale robot teams with anonymity. *Mechatronics*, 19(1) :85–105, 2009.
- [LEF09] Xiang Li, M Fikret Ercan, and Yu Fai Fung. A triangular formation strategy for collective behaviors of robot swarm. In *Computational Science and Its Applications–ICCSA 2009*, pages 897–911. Springer, 2009.
- [Len96] C Lenay. Coopération et intentionnalité. *journées françaises sur les systèmes multi-agents, JFIADSMA*, pages 265–272, 1996.
- [LEP03] Alan C. Schultz Lynne E. Parker, Frank E. Schneider. *Multi-Robot Systems. From Swarms to Intelligent Automata Volume II*. Springer Berlin Heidelberg, 1st edition, 2003.
- [LF01] Naomi Ehrich Leonard and Edward Fiorelli. Virtual leaders, artificial potentials and coordinated control of groups. In *Decision and Control*,

2001. *Proceedings of the 40th IEEE Conference on*, volume 3, pages 2968–2973. IEEE, 2001.
- [LGMI01] Kristina Lerman, Aram Galstyan, Alcherio Martinoli, and Auke Ijspeert. A Macroscopic Analytical Model of Collaboration in Distributed Robotic Systems. *Artificial Life Journal*, 7 :375–393, 2001.
- [Lio06] Lapierre Lionel. *Underwater robots part I : Current systems and problem pose*. INTECH Open Access Publisher, 2006.
- [LJL⁺06] Simon Lacroix, Sylvain Joyeux, Thomas Lemaire, Sebastien Bosch, Patrick Fabiani, Catherine Tessier, Olivier Bonnet, Delphine Dufourd, and Eric Moline. Projet acrobate : Algorithmes pour la coopération entre robots terrestres et aériens. *Quatriemes journées du programme Robea, Paris (France)*, 2, 2006.
- [LLB11] Simon Lacroix and Guy Le Besnerais. Issues in cooperative air/ground robotic systems. In *Robotics research*, pages 421–432. Springer, 2011.
- [LLT00] J-F Lots, DM Lane, and E Trucco. Application of 2 1/2 d visual servoing to underwater vehicle station-keeping. In *Oceans 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 2, pages 1257–1264. IEEE, 2000.
- [LMM⁺09] Cecilia Laschi, Barbara Mazzolai, Virgilio Mattoli, Matteo Cianchetti, and Paolo Dario. Design and development of a soft actuator for a robot inspired by the octopus arm. In Oussama Khatib, Vijay Kumar, and GeorgeJ. Pappas, editors, *Experimental Robotics*, volume 54 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 25–33. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [LRS06] Nicolas Léchevin, Camille Alain Rabbath, and Pierre Sicard. Trajectory tracking of leader–follower formations characterized by constant line-of-sight angles. *Automatica*, 42(12) :2131–2141, 2006.

- [LT97] M Anthony Lewis and Kar-Han Tan. High precision formation control of mobile robots using virtual structures. *Autonomous Robots*, 4(4) :387–403, 1997.
- [LTL00] K Lebart, E Trucco, and DM Lane. Real-time automatic sea-floor change detection from video. In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 2, pages 1337–1343. IEEE, 2000.
- [Lur98] Xavier Lurton. *Acoustique sous-marine : présentation et applications*. Editions Quae, 1998.
- [LW01] Jiming Liu and Jianbing Wu. *Multiagent Robotic Systems*. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, USA, 1st edition, 2001.
- [M⁺94] Richard L Marks et al. Using visual sensing for control of an underwater robotic vehicle. In *In Proceedings of IARP Second Workshop on Mobile Robots for Subsea Environments*. Citeseer, 1994.
- [Mar96] Eric Marchand. *Stratégies de perception par vision active pour la reconstruction et l'exploration de scènes statiques*. PhD thesis, Université Rennes 1, 1996.
- [MAS03] A Martins, JM Almeida, and E Silva. Coordinated maneuver for gradient search using multiple auvs. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 1, pages 347–352. IEEE, 2003.
- [Mat92] M.J. Mataric. Minimizing complexity in controlling a mobile robot population. In *Robotics and Automation, 1992. Proceedings., 1992 IEEE International Conference on*, pages 830–835 vol.1, May 1992.
- [Mat95] Maja J Matarić. Issues and approaches in the design of collective autonomous agents. *Robotics and autonomous systems*, 16(2) :321–331, 1995.
- [MFP02] R. Madhavan, K. Fregene, and L.E. Parker. Distributed heterogeneous outdoor multi-robot localization. In *Robotics and Automation, 2002*.

- Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 374–381 vol.1, 2002.
- [MJ91] Duranton R Michel J. Etat de l'art des vÃ©hicules sous-marins autonomes, verrous technologiques. In *Actes de colloques. Ifremer. Brest*, pages 12 :367–378, 1991.
- [MKL94] Patrick Martinez, Alain Klotz, and Pierre LÃ©na. *Le guide pratique de l'astronomie CCD*. Association ADAGIO, 1994.
- [MLGV02] Francois Michaud, Dominic Letourneau, Matthieu Guilbert, and Jean-Marc Valin. Dynamic robot formations using directional visual perception. In *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 2740–2745. IEEE, 2002.
- [MM00] Javier Minguez and L Montan. Nearness diagram navigation (nd) : A new real time collision avoidance approach. In *Intelligent Robots and Systems, 2000.(IROS 2000). Proceedings. 2000 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 2094–2100. IEEE, 2000.
- [MPAC09] Alessandro Marino, Lynne Parker, Gianluca Antonelli, and Fabrizio Caccavale. Behavioral control for multi-robot perimeter patrol : A finite state automata approach. In *Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on*, pages 831–836. IEEE, 2009.
- [MPPD05] G.L. Mariottini, G. Pappas, D. Prattichizzo, and K. Daniilidis. Vision-based localization of leader-follower formations. In *Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference on*, pages 635–640, Dec 2005.
- [MRH13] P. Maxwell, J. Rykowski, and G. Hurlock. Proposal for the initiation of general and military specific benchmarking of robotic convoys. In *Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), 2013 IEEE International Conference on*, pages 1–6, April 2013.

- [MRL95] Richard L Marks, Stephen M Rock, and Michael J Lee. Real-time video mosaicking of the ocean floor. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 20(3) :229–241, 1995.
- [MSG11] H. Mehrjerdi, M. Saad, and J. Ghommam. Hierarchical fuzzy cooperative control and path following for a team of mobile robots. *Mechatronics, IEEE/ASME Transactions on*, 16(5) :907–917, Oct 2011.
- [MTN⁺08] Robin R Murphy, Satoshi Tadokoro, Daniele Nardi, Adam Jacoff, Paolo Fiorini, Howie Choset, and Aydan M Erkmen. Search and rescue robotics. In *Springer Handbook of Robotics*, pages 1151–1173. Springer, 2008.
- [MWLR94] Richard L Marks, Howard H Wang, Michael J Lee, and Stephen M Rock. Automatic visual station keeping of an underwater robot. In *OCEANS'94. 'Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation. 'Proceedings*, volume 2, pages II–137. IEEE, 1994.
- [Nie04] Gérard Niemetzky. *Gestion de la couleur : calibration & [et] profils ICC : pour l'image numérique et la chaîne graphique*. Eyrolles, 2004.
- [Nor90] F.R. Noreils. Integrating multirobot coordination in a mobile-robot control system. In *Intelligent Robots and Systems '90. 'Towards a New Frontier of Applications', Proceedings. IROS '90. IEEE International Workshop on*, pages 43–49 vol.1, Jul 1990.
- [Nor93] Fabrice R Noreils. Toward a robot architecture integrating cooperation between mobile robots : Application to indoor environment. *The International Journal of Robotics Research*, 12(1) :79–98, 1993.
- [NXJ99] S Negahdaripour, X Xu, and L Jin. Direct estimation of motion from sea floor images for automatic station-keeping of submersible platforms. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 24(3) :370–382, 1999.

- [OFC⁺04] A. Ollero, J. Ferruz, F. Caballero, S. Hurtado, and L. Merino. Motion compensation and object detection for autonomous helicopter visual navigation in the comets system. In *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 1, pages 19–24 Vol.1, April 2004.
- [OFEW04] A Okamoto, JJ Feeley, DB Edwards, and RW Wall. *Robust control of a platoon of underwater autonomous vehicles*, volume 1. IEEE, 2004.
- [ÖL05] Petter Ögren and Naomi Ehrich Leonard. A convergent dynamic window approach to obstacle avoidance. *Robotics, IEEE Transactions on*, 21(2) :188–195, 2005.
- [OLM⁺05] Anibal Ollero, Simon Lacroix, Luis Merino, Jeremi Gancet, Johan Wiklund, Volker Remuß, Iker Veiga Perez, Luis G Gutiérrez, Domingos Xavier Viegas, Miguel Angel González Benitez, et al. Multiple eyes in the skies : architecture and perception issues in the comets unmanned air vehicles project. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 12(2) :46–57, 2005.
- [OMC03] Štěpán Obdržálek, Jiří Matas, and Ondřej Chum. On the interaction between object recognition and colour constancy. 2003.
- [OS06] Reza Olfati-Saber. Flocking for multi-agent dynamic systems : Algorithms and theory. *Automatic Control, IEEE Transactions on*, 51(3) :401–420, 2006.
- [Par82] Brian L Partridge. The structure and function of fish schools. *Scientific american*, 246(6) :114–123, 1982.
- [Par94] Lynne E Parker. Heterogeneous multi-robot cooperation. Technical report, DTIC Document, 1994.
- [Par98] L.E. Parker. Alliance : an architecture for fault tolerant multi-robot cooperation. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 14(2) :220–240, Apr 1998.

- [pC13] Le projet COMET. Sous l'eau, des robots chassent en meute. Website : <http://www.espace-sciences.org/sciences-ouest/303/actualite/sous-l-eau-des-robots-chassent-en-meute/>, 2013.
- [PCB⁺10] J. Pentzer, B. Crosbie, T. Bean, J. Canning, J. Frenzel, M. Anderson, and D. Edwards. Measurement of magnetic field using collaborative auvs. In *OCEANS 2010 IEEE - Sydney*, pages 1–7, May 2010.
- [PHF⁺14] Steven J. Portugal, Tatjana Y. Hubel, Johannes Fritz, Stefanie Heese, Daniela Trobe, Bernhard Voelkl, Stephen Hailes, Alan M. Wilson, and James R. Usherwood. Upwash exploitation and downwash avoidance by flap phasing in ibis formation flight. *Nature*, 505(7483) :399–402, January 2014.
- [PMW82] TJ Pitcher, AE Magurran, and IJ Winfield. Fish in larger shoals find food faster. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 10(2) :149–151, 1982.
- [POS⁺00] A. Pascoal, P. Oliveira, C. Silvestre, L. Sebastiao, M. Rufino, V. Barroso, J. Gomes, G. Ayela, P. Coince, M. Cardew, A. Ryan, H. Braithwaite, N. Cardew, J. Trepte, N. Seube, J. Champeau, P. Dhaussy, V. Sauce, R. Moitie, R. Santos, F. Cardigos, M. Brussieux, and P. Dando. Robotic ocean vehicles for marine science applications : the european asimov project. In *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, volume 1, pages 409–415 vol.1, 2000.
- [PRL01] Yvan Petillot, Ioseba Tena Ruiz, and David M Lane. Underwater vehicle obstacle avoidance and path planning using a multi-beam forward looking sonar. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 26(2) :240–251, 2001.
- [PRS06] Maurizio Porfiri, D.G. Roberson, and D.J. Stilwell. Environmental tracking and formation control of a platoon of autonomous vehicles subject to limited communication. In *Robotics and Automation, 2006*.

- ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, pages 595–600, May 2006.
- [PS03] Oscar Pizarro and Hanumant Singh. Toward large-area mosaicing for underwater scientific applications. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 28(4) :651–672, 2003.
- [Pyt13] Python. <https://docs.python.org/3.4/library/multiprocessing.html>, 2013.
- [Rai] Marc Raibert. BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. In Myung J. Chung, editor, *Proceedings of the 17th IFAC World Congress, 2008*, volume 17.
- [RB02] S.I. Roumeliotis and George A. Bekey. Distributed multirobot localization. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 18(5) :781–795, Oct 2002.
- [RB07] Martijn N. Rooker and Andreas Birk. Multi-robot exploration under the constraints of wireless networking. *Control Engineering Practice*, 15(4) :435 – 445, 2007.
- [RB08] Wei Ren and Randal W Beard. *Distributed consensus in multi-vehicle cooperative control*. Springer, 2008.
- [RCMA⁺98] Vincent Rigaud, Ève Coste-Manière, Marie-José Aldon, P Probert, Michel Perrier, Patrick Rives, Daniel Simon, Dominik Lang, J Kiener, A Casal, et al. Union : underwater intelligent operation and navigation. *Robotics & Automation Magazine, IEEE*, 5(1) :25–35, 1998.
- [RCRG10] Pere Ridao, Marc Carreras, David Ribas, and Rafael García. Visual inspection of hydroelectric dams using an autonomous underwater vehicle. *J. Field Robotics*, 27(6) :759–778, 2010.
- [Ren99] David Popenoe Ren. *Sociology (11th Edition)*. Prentice Hall, 1999.

- [Rey87] Craig W Reynolds. Flocks, herds and schools : A distributed behavioral model. In *ACM Siggraph Computer Graphics*, volume 21, pages 25–34. ACM, 1987.
- [Rob13] Planète Robots. Les robots sont dans le pré. Website : <http://www.planeterobots.com/2013/10/29/les-robots-sont-dans-le-pre/>, 2013.
- [RPB03] Scott Reed, Yvan Petillot, and Judith Bell. An automatic approach to the detection and extraction of mine features in sidescan sonar. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 28(1) :90–105, 2003.
- [SBS05] D.J. Stilwell, B.E. Bishop, and C.A. Sylvester. Redundant manipulator techniques for partially decentralized path planning and control of a platoon of autonomous vehicles. *Systems, Man, and Cybernetics, Part B : Cybernetics, IEEE Transactions on*, 35(4) :842–848, Aug 2005.
- [SBS06] Sanem Sariel, Tucker Balch, and Jason Stack. Distributed multi-av coordination in naval mine countermeasure missions. *Georgia Institute of Technology*, page 17, 2006.
- [SD06] Junaed Sattar and Gregory Dudek. On the performance of color tracking algorithms for underwater robots under varying lighting and visibility. In *Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006. Proceedings 2006 IEEE International Conference on*, pages 3550–3555. IEEE, 2006.
- [SGDP05] Junaed Sattar, Philippe Giguere, Gregory Dudek, and Chris Prachas. A visual servoing system for an aquatic swimming robot. In *Intelligent Robots and Systems, 2005. (IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1483–1488. IEEE, 2005.
- [SH98] Andrew Stuart and Anthony R Humphries. *Dynamical systems and numerical analysis*, volume 2. Cambridge University Press, 1998.

- [SHK⁺03] B. Schulz, B. Hobson, M. Kemp, J. Meyer, R. Moody, H. Pinnix, and M. St Clair. Field results of multi-uuv missions using ranger micro-uuvs. In *OCEANS 2003. Proceedings*, volume 2, pages 956–961 Vol.2, Sept 2003.
- [Sim96] Reid Simmons. The curvature-velocity method for local obstacle avoidance. In *Robotics and Automation, 1996. Proceedings., 1996 IEEE International Conference on*, volume 4, pages 3375–3382. IEEE, 1996.
- [SK04] Yoav Y Schechner and Nir Karpel. Clear underwater vision. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–536. IEEE, 2004.
- [SK08] B. Siciliano and O. Khatib. *Springer Handbook of Robotics*. Springer Berlin Heidelberg, 1st edition, 2008.
- [ŠO98] Petr Švestka and Mark H Overmars. Coordinated path planning for multiple robots. *Robotics and autonomous systems*, 23(3) :125–152, 1998.
- [sou14] Thomas sousselier. *Conception et validation d'un algorithme de mise en formation d'essaim de micro-robots sous-marins auto-organisés. Application à l'exploration de zone en guerre de mines*. PhD thesis, Université de Bretagne Sud, 2014.
- [Spi07] Jean-Mathias Spiewak. *Contribution à la coordination de flottille de véhicules sous-marins autonomes*. PhD thesis, Université Montpellier II-Sciences et Techniques du Languedoc, 2007.
- [SS83] Jacob T Schwartz and Micha Sharir. On the "piano movers" problem i. the case of a two-dimensional rigid polygonal body moving amidst polygonal barriers. *Communications on pure and applied mathematics*, 36(3) :345–398, 1983.

- [SS96] Kazuo Sugihara and Ichiro Suzuki. Distributed algorithms for formation of geometric patterns with many mobile robots. *Journal of robotic systems*, 13(3) :127–139, 1996.
- [Sti02] D.J. Stilwell. Decentralized control synthesis for a platoon of autonomous vehicles. In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 744–749 vol.1, 2002.
- [SV00] Peter Stone and Manuela Veloso. Multiagent systems : A survey from a machine learning perspective. *Autonomous Robots*, 8(3) :345–383, 2000.
- [SWA⁺02] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki, and K. Fujimura. The intelligent asimo : system overview and integration. In *Intelligent Robots and Systems, 2002. IEEE/RSJ International Conference on*, volume 3, pages 2478–2483 vol.3, 2002.
- [SXYW05] Jinyan Shao, Guangming Xie, Junzhi Yu, and Long Wang. Leader-following formation control of multiple mobile robots. In *Intelligent Control, 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Symposium on, Mediterrean Conference on Control and Automation*, pages 808–813, June 2005.
- [SY99] Ichiro Suzuki and Masafumi Yamashita. Distributed anonymous mobile robots : Formation of geometric patterns. *SIAM Journal on Computing*, 28(4) :1347–1363, 1999.
- [SYW06] Jinyan Shao, Junzhi Yu, and Long Wang. Formation control of multiple biomimetic robotic fish. In *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 2503–2508, 2006.
- [SZT04] Felix Schill, Uwe R Zimmer, and Jochen Trumpp. Visible spectrum optical communication and distance sensing for underwater applications. In *Proceedings of ACRA*, volume 2004, pages 1–8, 2004.

- [TK05] H.G. Tanner and A. Kumar. Towards decentralization of multi-robot navigation functions. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 4132–4137, April 2005.
- [TP05] Fang Tang and Lynne E. Parker. Asymtre : Automated synthesis of multi-robot task solutions through software reconfiguration. In *ICRA*, pages 1501–1508. IEEE, 2005.
- [TPK04] Herbert G Tanner, George J Pappas, and Vijay Kumar. Leader-to-formation stability. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, 20(3) :443–455, 2004.
- [TSV⁺98] Xiaou Tang, W Kenneth Stewart, Luc Vincent, HE Huang, Marty Marra, Scott M Gallager, and Cabell S Davis. Automatic plankton image recognition. In *Artificial Intelligence for Biology and Agriculture*, pages 177–199. Springer, 1998.
- [TZ13] Ying Tan and Zhong-yang Zheng. Research advance in swarm robotics. *Defence Technology*, 9(1) :18–39, 2013.
- [TZC96] Guido Tascini, Primo Zingaretti, and Giuseppe Conte. Real-time inspection by submarine images. *Journal of Electronic Imaging*, 5(4) :432–442, 1996.
- [VKR⁺05] Iuliu Vasilescu, Keith Kotay, Daniela Rus, Matthew Dunbabin, and Peter Corke. Data collection, storage, and retrieval with an underwater sensor network. In *Proceedings of the 3rd international conference on Embedded networked sensor systems*, pages 154–165. ACM, 2005.
- [VSS03] Rene Vidal, Omid Shakernia, and Shankar Sastry. Formation control of nonholonomic mobile robots with omnidirectional visual servoing and motion segmentation. In *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on*, volume 1, pages 584–589. IEEE, 2003.

- [Wan91] PKC Wang. Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation. *Journal of Robotic Systems*, 8(2) :177–195, 1991.
- [WEK04] Dirk Walther, Duane R Edgington, and Christof Koch. Detection and tracking of objects in underwater video. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on*, volume 1, pages I–544. IEEE, 2004.
- [WR00] C.R. Weisbin and G. Rodriguez. Nasa robotics research for planetary surface exploration. *Robotics Automation Magazine, IEEE*, 7(4) :25–34, Dec 2000.
- [WSB08] K.M. Wurm, C. Stachniss, and W. Burgard. Coordinated multi-robot exploration using a segmentation of the environment. In *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, pages 1160–1165, Sept 2008.
- [WV10] J. Wawerla and R.T. Vaughan. A fast and frugal method for team-task allocation in a multi-robot transportation system. In *Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on*, pages 1432–1437, May 2010.
- [YAB01a] Hiroaki Yamaguchi, Tamio Arai, and Gerardo Beni. A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations. *Robotics and Autonomous Systems*, 36(4) :125 – 147, 2001.
- [YAB01b] Hiroaki Yamaguchi, Tamio Arai, and Gerardo Beni. A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations. *Robotics and Autonomous Systems*, 36(4) :125 – 147, 2001.
- [YAB01c] Hiroaki Yamaguchi, Tamio Arai, and Gerardo Beni. A distributed control scheme for multiple robotic vehicles to make group formations. *Robotics and Autonomous systems*, 36(4) :125–147, 2001.

- [Yam99] Brian Yamauchi. Decentralized coordination for multirobot exploration. *Robotics and Autonomous Systems*, 29(2 - 3) :111 – 118, 1999.
- [YAM06] I. YAMAMOTO. Research and development of past, present, and future auv technologies. *the Society for Underwater Technology Masterclass in AUV Technology for Polar Science, National Oceanography Centre, Southampton*, apr 2006.
- [YCM⁺14] Rui Yang, Benoit Clement, Ali Mansour, Hua Jun Li, Ming Li, and Nai Long Wu. Modeling of a complex-shaped underwater vehicle. In *IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions, ICARSC 2014*, Portugal, 2014.
- [YJAC12] Zhi Yan, N. Jouandeau, and A. Ali-Cherif. Multi-robot heuristic goods transportation. In *Intelligent Systems (IS), 2012 6th IEEE International Conference*, pages 409–414, Sept 2012.
- [YJBB07] DanaR. Yoerger, Michael Jakuba, AlbertM. Bradley, and Brian Bingham. Techniques for deep sea near bottom survey using an autonomous underwater vehicle. In Sebastian Thrun, Rodney Brooks, and Hugh Durrant-Whyte, editors, *Robotics Research*, volume 28 of *Springer Tracts in Advanced Robotics*, pages 416–429. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [YJC10] Zhi Yan, Nicolas Jouandeau, and Arab Ali Cherif. Sampling-based multi-robot exploration. In *Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK)*, pages 1–6, June 2010.
- [YJC12] Zhi Yan, Nicolas Jouandeau, and Arab Ali ChÃ©rif. Acs-prm : Adaptive cross sampling based probabilistic roadmap for multi-robot motion planning. In Sukhan Lee, Hyungsuck Cho, Kwang-Joon Yoon, and Jangmyung Lee, editors, *IAS (1)*, volume 193 of *Advances in Intelligent Systems and Computing*, pages 843–851. Springer, 2012.

-
- [ZB01] Libero Zuppiroli and Marie-Noëlle Bussac. *Traité des couleurs*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 2001.
- [ZM] B. Zana and Moine. Website :<http://www.cndp.fr/revuetdc/817-41419.htm>.
- [ZMP01] B. Zana, C.L. Moine, and C. Pédersen. *La perception visuelle : un système de haute technologie : dossier*. Textes et documents pour la classe TDC. C.N.D.P., 2001.
- [ZZ98] Silvia Maria Zanoli and Primo Zingaretti. Underwater imaging system to support roV guidance. In *OCEANS'98 Conference Proceedings*, volume 1, pages 56–60. IEEE, 1998.

Conception d'un algorithme de coordination hybride de groupes de robots sous-marins communicants - Application : acquisition optique systématique et détaillée des fonds marins

Résumé

Cette thèse présente l'étude d'une stratégie de coordination hybride d'un groupe de robots sous-marins pour la recherche d'objets de petites dimensions ou de singularités sur les fonds marins. Chaque robot est équipé d'un module de perception utilisant la librairie de traitement d'image OpenCV qui lui permet d'apercevoir les autres éléments de la meute ainsi que l'environnement d'évolution de la mission.

Cette stratégie hybride est constituée de deux phases : une phase de mise en formation géométrique et une phase d'acquisition des données vidéo. La première phase s'appuie sur des algorithmes de type "essaims" alors que la seconde se fonde sur une méthode hiérarchique de coordination. En cas de perte de la formation, le groupe de robots quitte le mode hiérarchique et reprend le mode essaim pour se reformer. Ces changements de modes sont contrôlés par une machine à états finis. Avant d'entamer une expérimentation en grandeur nature, la méthodologie et les algorithmes de coordination doivent être testés et validés par simulation.

Dans ce contexte, un simulateur basé sur le logiciel Blender a été conçu de façon à ce qu'il tienne compte des différentes contraintes liées à l'évolution des robots dans l'environnement sous-marin. Les résultats de simulation d'une meute de 3 AUVs montrent la capacité de notre stratégie à optimiser l'exécution d'une mission d'acquisition vidéo par un groupe de robots autonomes contrôlés par la vision et coordonnés par une stratégie hybride.

Mots clés : Coopération multi-robots, Stratégie de coordination, Contrôle de la formation, Architectures de commande, Simulateur multi-robot, Contrôle visuel.

-0-

Design of a hybrid coordination algorithm for groups of communicating submarine robots – Application : optical acquisition Systematic and detailed seabed

Abstract

In the underwater environment, the needs of data acquisition have significantly increased over the last decades. As electromagnetic waves show poor propagation in sea water, acoustical sensing is generally preferred. However, the emergence of small and low cost autonomous underwater vehicles (AUV) allow for rethinking the underwater use of optical sensors as their small coverage can be significantly improved by using a fleet of coordinated underwater robots. This paper presents a strategy to coordinate the group of robots in order to systematically survey the seabed to detect small objects or singularities. The proposed hybrid coordination strategy is defined by two main modes. The first mode relies on a swarm algorithm to organize the team in geometrical formation. In the second mode, the robot formation is maintained using a hierarchical coordination. A finite state machine controls the high level hybrid strategy by defining the appropriate coordination mode according to the evolution of the mission. Before sea validation, the behavior and the performance of the hybrid coordination strategy are first assessed in simulation. The control of individual robots relies on visual servoing, implemented with the OpenCV library, and the simulation tool is based on Blender software. The dynamics of the robots has been implemented in a realistic way in Blender by using the Bullet solver and the hydrodynamic coefficients estimated on the actual robot. First results of the hybrid coordination strategy applied on a fleet of 3 AUV's, show execution of a video acquisition task by a group of autonomous robots controlled by vision and coordinated by a hybrid strategy.

Keywords : Multi-robot cooperation, coordination, formation control, control architectures, visual control simulator.