

**THÈSE DE DOCTORAT
DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE**

Spécialité : Mécanique Robotique

**École doctorale : « (ED 391) Sciences mécaniques, acoustique et
électronique »**

réalisée à

Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique

présentée par

Miguel-Angel ROMERO-RAMIREZ

pour obtenir le grade de :

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

Contribution à la commande de voiliers robotisés

Soutenue le 23 Janvier 2012

devant le jury composé de :

L. JAULIN	Professeur à l'ENSTA Bretagne	Rapporteur
S. LACROIX	Directeur de Recherche CNRS, LAAS Toulouse	Rapporteur
P. BIDAUD	Professeur à l'Université Pierre et Marie Curie	Directeur de thèse
Y. BRIERE	Enseignant Chercheur à l'ISAE, Toulouse	Examineur
B. GAS	Professeur à l'Université Paris 6	Examineur
E. LUCET	Chef de projet, Robosoft	Examineur
F. PLUMET	Maître de Conférences à l'Université Versailles St Quentin	Examineur

Remerciements

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Luc JAULIN et Monsieur Simon LACROIX pour avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Je tiens également à remercier Monsieur Yves BRIERE, Monsieur Phillipe BIDAUD, Monsieur Bruno GAS, Monsieur Eric LUCET et Monsieur Frédéric PLUMET de m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury de thèse.

Je tiens à adresser mes remerciements à Monsieur Philippe BIDAUD, Directeur de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique (UMR 7222 - Université Pierre et Marie Curie/CNRS), pour m'avoir accueillie dans son laboratoire et à Monsieur Ramiro VELAZQUEZ-GUERRERO pour m'avoir partagé ses expériences ainsi que les coordonnés de l'ISIR.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères à Monsieur Frédéric PLUMET, mon encadrant, pour m'avoir conseillée, encouragée et soutenue tout au long de la thèse avec patience et disponibilité, et pour la confiance que lui m'a accordée. Je souhaite remercier vivement Monsieur Clément PETRES, pour m'avoir accompagné en tous et chacun des essais expérimentaux. J'adresse également un très grand merci à Messieurs Anis SABANI, Christophe GRAND, Sinan HALIYO, Xavier CLADY et à Madame Delphine BELLOT, qui m'ont donné de précieux conseils.

Je remercie à mes collègues du bureau (Eric, Consuelo et Pierre) et aux *trouvilliens* pour leur sympathie aussi je tiens à remercier individuellement tous les membres de l'ISIR pour son accueil.

Je tiens à remercier vivement aux collègues et amis qui m'ont aidé avec la correction des textes de ma thèse : Pierre JARRAULT (*FLS*), Eric LUCET, Joseph SALINI, Serena IVALDI, Camille SALUN, Camille DIANOUX, Ragu ADY, Sara-Jessica COHEN, Imène JAADANE, Ikram ELZAOUI et Naïma CHALOUR.

Je remercie vivement à mon épouse, Gloria Elisa VILLALPANDO-RODRIGUEZ pour m'avoir soutenue tout au long de la thèse, à mon père Miguel Angel ROMERO-ELIAS, à ma mère Maria del Refugio RAMIREZ-ALONSO et à ma tante Ana-Maria RAMIREZ-ALONSO pour m'avoir encouragé et consolé chaque fois que j'ai eu besoin. Aussi à Juan-Pablo ROMERO-RAMIREZ pour m'avoir accordé quelques seconds de vidéoconférence, même si lui il ne comprend pas pour quoi (il a que 5 ans). En fin je tiens à adresser mes remerciements à mon frère Adolfo ROMERO-RAMIREZ pour m'avoir venu me visiter ainsi que pour les SMS qu'il a eu bien à m'envoyer et à ma sœur pour toutes les fois qu'elle m'a fait rire.

Merci

Miguel Angel ROMERO RAMIREZ

tutti fratelli

Table des matières

1	Introduction	1
2	État de l'art	7
2.1	Les semi-submersibles	8
2.2	Les bateaux autonomes motorisés	10
2.2.1	ASV issus d'initiatives publiques	11
2.2.2	Produits commerciaux	18
2.3	Les voiliers autonomes	24
2.3.1	Les précurseurs	24
2.3.2	Les compétitions de voiliers autonomes	27
2.4	Conclusion	41
3	Modèles et simulateur numérique	45
3.1	Référentiels et cinématique	46
3.2	Modèle aérodynamique	49
3.2.1	Le vent	49
3.2.2	La voile	51
3.3	Modèle hydrodynamique	52
3.4	Equations du mouvement et simulateur numérique	57
3.5	Exploitation du simulateur	59
3.5.1	Interface graphique du simulateur	59
3.5.2	Tests de différentes allures	61
3.5.3	Polaires de vitesse	64
3.5.4	Polaire de gîte	66
3.5.5	Comportement en virage	67
3.6	Conclusion	76
4	Architecture du système	79
4.1	Architecture matérielle - Voilier <i>Asarome</i>	80
4.1.1	Voilier	80
4.1.2	Composants du système de perception	84
4.1.3	Composants du système de navigation	88
4.1.4	Composants du système de gestion bas niveau	93
4.2	Architecture logicielle - Voilier <i>Asarome</i>	94
4.2.1	Module de gestion bas-niveau	95
4.2.2	Module de perception	96
4.2.3	Module de navigation et de commande	98
4.3	Architecture matérielle - Voilier à échelle réduite	99
4.3.1	Voilier	99

TABLE DES MATIÈRES

4.3.2	Composants du système de navigation	102
4.3.3	Composants du système de gestion bas-niveau	104
4.4	Architecture logicielle - Voilier à échelle réduite	107
4.5	Conclusion	110
5	Navigation et commande	111
5.1	Commande	112
5.1.1	Hypothèse de découplage des deux entrées de commande . .	112
5.1.2	Asservissement de cap	115
5.2	Navigation avec évitement d'obstacles	119
5.2.1	Détermination de l'angle de voile	122
5.2.2	Méthode de projection de la vitesse	122
5.2.3	Méthode floue	128
5.2.4	Méthode des champs de potentiels	131
5.2.5	Limitation de la gîte	136
5.3	Conclusion	140
6	Résultats	143
6.1	Conditions de simulation	144
6.2	Navigation réactive sans obstacles	149
6.2.1	Méthode par projection de la vitesse	149
6.2.2	Méthode par inférence floue	152
6.2.3	Méthode des champs de potentiels	153
6.3	Navigation réactive avec obstacle	156
6.3.1	Méthode par projection de la vitesse	157
6.3.2	Méthode par inférence floue	157
6.3.3	Méthode des champs de potentiels	160
6.3.4	Modification de la position des obstacles	165
6.4	Résultats expérimentaux	168
6.4.1	Zone d'essais et conversion des coordonnées GPS	169
6.4.2	Réglage de voile et limitation de la gîte	171
6.4.3	Suivi de cap	172
6.4.4	Navigation réactive	174
6.5	Conclusion	178
7	Conclusion	181
A	Annexe1	189
A.1	Nombre de Froude	189
A.2	Coefficients de Gerritsma	189
A.3	Mécanisme d'actionnement du safran	191

Table des figures

2.1	<i>Dolphin MK-I</i> (International Submarine Engineering, Canada) . . .	9
2.2	<i>ASV-6300</i> (Autonomous Surface Vehicles Ltd, Angleterre)	9
2.3	<i>Caravela 2000</i> (Institut for Systems and Robotics de l'Université de Lisbonne, Portugal).	10
2.4	<i>ARTEMIS</i> (MIT, États-Unis).	11
2.5	<i>AutoCat</i> (MIT, États-Unis)	12
2.6	<i>SCOUT</i> : trois plates-formes en coopération (a) et avec des AUV sur le pont d'un navire lors d'une campagne de test de coopération ASV-AUV (MIT, États-Unis)	13
2.7	ASV de l'Université de Floride, États-Unis	14
2.8	<i>SeaWASP</i> (Université de Santa-Clara, États-Unis)	14
2.9	<i>New Hydrographic Automated Vehicle</i> (Bordeaux, France)	15
2.10	<i>Messin</i> (Université de Rostock, Allemagne)	15
2.11	<i>Sesamo</i> (Université de Gênes, Italie)	16
2.12	<i>Springer</i> (Université de Plymouth, Angleterre)	17
2.13	<i>Delfim</i> (Institut for Systems and Robotics, Portugal)	17
2.14	Démineur autonome <i>MSD</i> (États-Unis)	18
2.15	<i>RMOP</i> (Remote Minehunting Operational Prototype) en déploiement dans le golfe persique	19
2.16	<i>Spartan</i> (US Navy)	19
2.17	<i>Protector</i> (Rafael, Israël)	20
2.18	<i>Stingray</i> et <i>Silver Marlin</i> (Elbit Systems, Israël)	20
2.19	<i>Rôdeur</i> (Sirehna, France)	21
2.20	<i>Inspector</i> (ECA Robotics, France)	21
2.21	<i>USV-5000</i> , <i>USV-600</i> et <i>USV-1000</i> (SeaRobotics, États Unis)	22
2.22	<i>KingFisher</i> (Clearpath Robotics, États Unis)	22
2.23	<i>FMTD-5000</i> , et <i>C-Cat</i> (ASVGlobal, Angleterre)	23
2.24	<i>Catarob</i> (Subsea Tech, France)	23
2.25	<i>Wave Glider</i> (Liquid Robotics, États Unis)	23
2.26	Atlantis (Université Stanford et Université de Californie Santa-Cruz, USA) et HWT X-1 (Harbor Wing Technologies Inc., USA)	25
2.27	Sea Watcher (Unmanned Ocean Vehicles Inc., USA)	26
2.28	Aroo (Université d'Aberystwyth, Pays de Galle, UK)	27
2.29	ASB de l'académie navale des États-Unis	28
2.30	IBoat I et IBoat II (ISAE,France)	30
2.31	ARC et Beagle-B (Université d'Aberystwyth, Pays de Galle, UK)	32
2.32	MOOP et Pinta (Université d'Aberystwyth, Pays de Galle, UK)	34
2.33	RoBoat (INNOC, Autriche)	35

TABLE DES FIGURES

2.34	Architecture logicielle à quatre couches pour le contrôle du voilier RoBoat [1]	36
2.35	Voilier autonome FASt (Université de Porto, Portugal)	37
2.36	Breizh Spirit et Breizh Spirit-DCNS (ENSTA Brest, France)	38
2.37	Avalon, U. de Zurich	40
2.38	Évolution du nombre de publications en lien avec des véhicules de surface autonomes	42
3.1	(a) Repère R_B lié au voilier et (b) définition des angles de voile et de safran	47
3.2	Vent apparent, cap et route	50
3.3	Force aérodynamique s'exerçant sur la voile	51
3.4	Exemple de coefficients de portance et de trainée pour une voile (d'après [2])	52
3.5	Le prototype dans le bassin de traction de l'ECN	55
3.6	Forces hydrodynamiques dans les directions longitudinale et transverse	56
3.7	Interface graphique utilisateur du simulateur numérique	60
3.8	Allures	61
3.9	Réponse en vitesse au près (Cap=45°, Voile = 0°)	62
3.10	Réponse en vitesse au travers (Cap=90°, Voile = 30°)	63
3.11	Réponse en vitesse au large (Cap=135°, Voile = 60°)	63
3.12	Réponse en vitesse par vent arrière (Cap=180°, Voile = 90°)	64
3.13	Courbes polaires représentant l'influence de l'angle de voile sur la vitesse d'avance (vitesse de vent : 10 nd)	65
3.14	Courbes polaires de vitesse du voilier <i>Asarome</i> (par rapport au vent réel)	66
3.15	Courbes polaires de gîte du voilier <i>Asarome</i>	67
3.16	Voilier <i>Asarome</i> dans le bassin d'essais de l'ECN (au près, 5 nd de vent, houle d'amplitude 10cm, période 1,2s)	68
3.17	Comportement en virage (vitesse voilier : 5 nd, safran : 30°)	69
3.18	Comportement en virage : avance à 90°	70
3.19	Comportement en virage : diamètre tactique	70
3.20	Moment sur la mèche de safran en fonction de l'angle de safran	71
3.21	Réponse en vitesse de changement de cap $\dot{\psi}$ à un échelon d'angle de safran de 20° (vitesse voilier : 5,1 nd)	72
3.22	Manceuvre de virement de bord	74
3.23	Evolution de la vitesse, du cap et de la gîte lors d'un virement de bord	75
3.24	Perte d'efficacité lors d'un virement de bord en fonction de la vitesse d'avance	75

4.1	Localisation des capteurs sur le voilier <i>Asarome</i>	80
4.2	Composants du système de perception, de navigation et de contrôle du voilier <i>Asarome</i>	83
4.3	Caméra Prosilica GE1350C	84
4.4	Système de vision panoramique	85
4.5	Capteur catadioptrique en haut du mât	85
4.6	Exemple d'image panoramique	86
4.7	Sonar Micron DST de Tritech	86
4.8	Centrale inertielle avec GPS intégré MTI-G de Xsens	88
4.9	Exemple de trame de données Xsens	89
4.10	Test de dérive du nord magnétique de la centrale inertielle à ciel ouvert	89
4.11	Test de dérive du nord magnétique de la centrale inertielle à l'inté- rieur du bateau	90
4.12	Test de dérive du nord magnétique de la centrale inertielle à l'in- térieur du bateau avec sources de bruit électromagnétique. (a)État des servomoteurs et (b) Nord magnétique mesuré	91
4.13	Dispersion des données de position GPS	91
4.14	Girouette-anémomètre ROWind CV3F	92
4.15	Vérin Linak LA12-300N	93
4.16	Moulinet électrique Kristal XL630	93
4.17	Manette Microsoft Xbox sans fil et télécommande Jay	94
4.18	Modules logiciels du voilier <i>Asarome</i>	95
4.19	Estimation des distances pour chaque pixel dans l'image	97
4.20	Exemple d'image sonar	98
4.21	Composants du système de navigation et de contrôle du voilier à échelle réduite	99
4.22	Voilier à échelle réduite	100
4.23	Adaptation de la quille/ballast pour le transport	101
4.24	Pont arrière du bateau et accès étanches	101
4.25	Conception et construction de la girouette et de l'anémomètre où : A. aile et tige de contrepoids, B. capteur de position angulaire, C. anémomètre à coupelles D. bras de support E. mât, F. grand-voile et G. foc	103
4.26	Test des capteurs du vent : (a) vitesse du vent apparent ; (b) angle de vent apparent	104
4.27	Servomoteurs de commande pour la voile et le safran	105
4.28	Conception et construction du capteur d'angle de voile : A. pièce de fixation du potentiomètre, B. fourche, C. hale-bas, D. écoute, E. bôme, F. grand-voile, G. mât et H. pont	106

TABLE DES FIGURES

4.29	Télécommande manuelle	106
4.30	Modules logiciels du voilier à échelle réduite	108
5.1	Architecture générale du système de contrôle	111
5.2	Effet de la modification de l'angle de voile et de l'angle de safran sur la trajectoire	113
5.3	Effet de la modification de l'angle de voile et de l'angle de safran sur la vitesse et sur le cap	114
5.4	Asservissement de cap : influence des gains du régulateur PID . . .	117
5.5	Réponse indicielle en cap : influence des gains du régulateur PID . .	118
5.6	Variation du gain proportionnel en fonction de la vitesse du vent . .	118
5.7	Effet d'une modification de l'angle de voile sur la vitesse et sur le cap (asservissement de cap)	119
5.8	Polaires de vitesse pour différentes vitesses de vent réel (TWS) et zones d'interdiction à la navigation (<i>no-go zones</i>)	120
5.9	Polaire de gîte pour différentes vitesses de vent réel (TWS)	121
5.10	Réglage de voile en fonction de l'angle de vent apparent	123
5.11	Illustration de la <i>VMG</i> : projection de vitesse du voilier sur la route directe menant au point visé	124
5.12	Exemple de polaire de vitesse normalisée et de <i>VMG</i> pour un ob- jectif situé à 45° par rapport à l'axe du vent (0°)	124
5.13	Planification de mouvement à partir de la <i>VMG</i> (courbe polaire idéale)	125
5.14	Influence du facteur d'hystérésis sur les valeurs d'une polaire idéale normalisée	126
5.15	Influence du facteur d'hystérésis sur la navigation	127
5.16	Variables linguistiques d'entrée du moteur d'inférence flou	130
5.17	Variable linguistique de sortie et surface d'inférence	130
5.18	Potentiel local autour du voilier	133
5.19	Zones interdites (face au vent et par vent arrière), potentiel d'hys- térésis (zone grisée) et définition des angles ϕ , ϕ_{up} et ϕ_{down}	134
5.20	Influence du potentiel d'hystérésis sur la navigation	135
5.21	Représentation du potentiel total du à l'objectif, aux obstacles et au potentiel local autour du point P	136
5.22	Polaires de gîte et polaire de vitesse du voilier <i>Asarome</i> (vitesse de vent $TWS = 10\text{nd}$)	137
5.23	Courbe polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte	137
5.24	Trajectoire du voilier obtenue en utilisant la polaire de vitesse nor- male et la polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte	138
5.25	Evolution temporelle de la gîte avec la polaire de vitesse normale et la polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte	139

6.1	(a) Plan des manœuvres pour la validation des algorithmes de navigation et (b) : allures d'un voilier	144
6.2	Profil de vent réel	145
6.3	Définition des rayons d'approximation	146
6.4	No-go zone des polaires de vitesse idéale et réelle	147
6.5	Courbes polaires utilisées pour les simulations	148
6.6	Sélection de cap par projection de la vitesse (sans obstacle)	151
6.7	Sélection de cap par logique floue (sans obstacle)	153
6.8	Sélection de cap par la méthode des champs potentiels (sans obstacle)	155
6.9	Sélection de cap par projection de la vitesse avec évitement d'obstacle (vent constant)	158
6.10	Sélection de cap par projection de la vitesse avec évitement d'obstacle (vent réel)	159
6.11	Sélection de cap par logique floue avec évitement d'obstacle (vent constant)	161
6.12	Sélection de cap par logique floue avec évitement d'obstacle (vent réel)	162
6.13	Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle (vent constant)	163
6.14	Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle (vent réel)	164
6.15	Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle placé en différents points du parcours (vent constant, polaire idéale et $RI = 30 m$)	166
6.16	Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle. Essais avec différentes distances entre l'obstacle et le point de passage (vent constant, polaire idéale et $RI = 30 m$	167
6.17	Plan de la zone d'essais	169
6.18	Localisation des waypoints	170
6.19	Polaire idéale pour le prototype	171
6.20	Asservissement de cap	173
6.21	Validation expérimentale de la sélection de cap par la méthode des champs de potentiel : essai 1.	175
6.22	Validation expérimentale de la sélection de cap par la méthode des champs de potentiel : essai 2.	176
6.23	Validation expérimentale de la sélection de cap par la méthode des champs de potentiel : essai 3.	177
A.1	Système vérin-safran	191

Liste des tableaux

3.1	Intervalle de validité des caractéristiques géométriques d'une carène pour l'équation polynomiale de Gerritsma	55
4.1	Caractéristiques hydrostatiques de la carène	81
4.2	Caractéristiques du safran	81
4.3	Caractéristiques de la grand voile	81
4.4	Bilan de puissance des équipements embarqués dans le voilier <i>Asarome</i>	82
4.5	Caractéristiques du voilier à échelle réduite	100

1

Introduction

Durant ces dix dernières années, des progrès considérables ont été enregistrés concernant le développement des technologies marines, permettant d'offrir aux scientifiques et aux chercheurs des outils et des méthodes pour l'exploration et l'exploitation des océans. Ces progrès dans le domaine de la robotique en milieu marin, des capteurs, de l'informatique embarquée et des systèmes de communication résultent de la maturité technologique atteinte et des avancées de la robotique (et d'une manière plus large des technologies numériques) observées au cours de ces cinquante dernières années. Les applications de ces avancées scientifiques et technologiques permettent à l'heure actuelle de développer des outils automatisés qui contribueront à offrir des moyens plus sûrs, plus rapides et plus efficaces pour l'exploration de ces environnements naturels que constituent les océans.

D'un autre côté, la communauté scientifique des climatologues et des océanographes exprime un besoin croissant pour la collecte de données relatives aux masses océaniques. L'intérêt des climatologues pour les océans est dû au rôle central que jouent ces derniers dans les évolutions climatiques. La complexité et la finesse des modèles qu'ils développent requièrent de plus en plus de mesures, de nature variée, ainsi qu'un échantillonnage spatial et temporel de ces mesures que les moyens conventionnels (bouées ancrées, bouées dérivantes ou navires océaniques) ne peuvent offrir.

Dans le cadre de l'océanographie, les besoins sont également croissants en termes de récolte de données, que ce soit en halieutique, pour l'exploitation et la gestion des espèces vivantes, en cartographie de zone d'habitats d'espèces végétales ou animales ou pour la mesure de paramètres physico-chimiques (salinité, température, pH, ...) à des fins de corrélation avec ces zones d'habitats. Ces deux disciplines, climatologie et océanographie, peuvent par ailleurs être liées avec par exemple l'étude de l'évolution géographique de certaines populations de zooplanktons en lien avec les courants marins ou les zones de réchauffement.

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

Enfin, les évolutions technologiques déjà mentionnées, en particulier en termes de capteurs, ont conduit à l'apparition ces dernières années de capteurs miniaturisés de faible poids et de faible consommation qui autorisent leur intégration dans des véhicules de petites tailles.

Pour cet ensemble de raisons, l'usage de véhicules robotisés s'impose de plus en plus à la fois en surface et sous la surface. Ces véhicules permettent de répondre au besoin croissant de la communauté scientifique pour des véhicules capables d'explorer librement les océans et de collecter des données océanographiques ou climatologiques. Comme une grande partie de la surface de la terre est recouverte d'eau, ils peuvent permettre également de répondre à un besoin économique en tant qu'outils pour l'exploitation des ressources marines (poissons, algues, champs pétrolifères). En ce qui concerne les fonds sous-marins, la robotique y est d'ailleurs déjà très largement présente mais, par comparaison, très peu présente à la surface.

Le développement de plates-formes fiables qui soient capables de naviguer à la surface des océans de manière autonome présente donc dans ce contexte un intérêt à la fois scientifique et économique : intérêt scientifique puisque, ces véhicules autonomes de surface peuvent désormais être équipés d'un ensemble d'instruments de mesures utiles aux chercheurs en sciences du climat ou aux océanographes, mesures qui peuvent par ailleurs être facilement géo-référencées par l'usage de récepteur GPS. Ils permettent d'envisager des missions de moyenne à longue durée durant lesquelles ces véhicules peuvent effectuer des tâches d'observation et de mesures du milieu marin sans l'intervention directe de l'homme.

Ces véhicules autonomes de surface présentent également un double intérêt économique : ils peuvent fournir, comme tout système robotique, une solution économiquement intéressante en diminuant les coûts d'opération et de logistique (par exemple pour la pose de bouée ou l'organisation de campagnes de mesures à bord de bateaux océanographiques) par leur taille réduite et par le fait qu'ils ne requièrent pas d'équipage humain. De plus, ces véhicules autonomes sont potentiellement capables de fonctionner sur des cycles temporels plus intenses que ceux communément utilisés par des opérateurs humains. Par ailleurs, au-delà de ces missions scientifiques, ces plates-formes peuvent également être équipées pour remplir des missions présentant un impact économique important telles que la surveillance du littoral, la cartographie, le suivi de bancs de poissons ou l'intervention sur des zones de pollution.

Les scénarios envisagés actuellement, pour l'ensemble de ces missions, nécessiteront donc le contrôle de robots seuls ou de plusieurs robots travaillant en coopération pour exécuter des missions en milieu naturel et incertain, avec une su-

pervision minimale de la part d'opérateurs humains, voire sans supervision aucune.

Pour un certain nombre de ces missions, se pose également la question de l'autonomie énergétique de ces engins de surface qui définit la durée de la mission et, indirectement, la dimension de la zone géographique potentiellement explorable par ce type d'engin. Une réponse possible à cette question est d'utiliser des voiliers robotisés, pour lesquels la consommation énergétique pour générer une force de propulsion est réduite du fait de l'usage de voiles qui transforment la force du vent en force de propulsion. Par ailleurs, ces navires peuvent également être équipés de générateurs d'énergie renouvelable, tels que des panneaux solaires ou des éoliennes, afin de fournir l'énergie nécessaire au bon fonctionnement des actionneurs, capteurs et calculateurs embarqués. Si ces voiliers robotisés permettent, au moins en théorie, d'apporter une solution au problème de l'autonomie énergétique, ils en posent une autre qui concerne leur contrôle. En effet, un voilier autonome fait partie des rares systèmes robotisés pour lesquels il n'est pas possible de maîtriser complètement la force de propulsion. D'une part, et de manière évidente, un voilier ne peut pas se déplacer s'il n'y a pas de vent. D'autre part, il existe des directions de l'espace, correspondant à des caps à suivre, qui ne peuvent être empruntées par un voilier. Cet ensemble de directions non navigables correspond en particulier aux zones se situant directement face au vent pour lesquelles la résultante des efforts produits par le vent sur les voiles ne permet pas de disposer d'un effort permettant au voilier de se déplacer.

La contribution principale de cette thèse porte sur le développement d'algorithmes de navigation pour sélectionner en temps réel (et en fonction des données de vent instantanées) un cap permettant au voilier de se déplacer vers un objectif, y compris lorsque celui-ci se trouve dans ces zones. Même si la probabilité de collision en haute mer est faible, préserver l'intégrité de l'engin nécessite que celui-ci soit capable de détecter et d'éviter les obstacles. Les méthodes que nous avons développées intègrent donc également explicitement une carte d'obstacles mise à jour en temps réel afin de définir à tout instant un cap navigable permettant d'éviter les obstacles.

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche qui a débuté en octobre 2007. Ce projet *ASAROME* (*Autonomous Sailing Robot for Oceanographic MEasurements*) regroupait deux partenaires académiques principaux autour d'un partenaire industriel et avait comme objectif principal de démontrer la pertinence de l'usage de voiliers robotisés pour la réalisation de missions de mesures et d'observations en milieu marin. La société *Robosoft*, porteur de ce projet, avait principalement la charge de définir et

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

de réaliser un démonstrateur de voilier robotisé. Le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Nantes (ECN) était en charge du développement d'un simulateur adapté au type de voilier choisi comme démonstrateur. Le rôle de l'Institut des Systèmes Intelligents et de Robotique de l'Université Pierre et Marie Curie dans ce projet était de développer un système de perception afin de localiser les obstacles potentiels au voisinage du voilier et de mettre en place les méthodes permettant au voilier de se déplacer tout en évitant les obstacles. C'est sur ce dernier point (navigation) que mon travail de thèse s'inscrit. Notons enfin que ce projet devait aboutir à la réalisation d'un démonstrateur. Ce démonstrateur n'ayant pas vocation à naviguer pendant de longues périodes, il n'a pas fait l'objet d'une optimisation énergétique : le choix de ses différents composants (actionneurs, calculateurs, ...) s'est plus basé sur des considérations de facilité d'emploi ou de coût que sur leurs performances énergétiques.

Ce mémoire de thèse comporte cinq chapitres que nous décrivons brièvement ci-dessous.

Un premier chapitre est consacré à un **État de l'art**. Même si l'usage de vaisseaux sans équipage est désormais une pratique remontant à plusieurs dizaines d'années, on assiste depuis quelques années à une forte montée en puissance à la fois du point de vue du nombre de prototypes académiques et de produits commerciaux existants que du point de vue de leur autonomie grandissante. Nous nous attacherons dans cette partie à faire un tour d'horizon des principaux produits et projets existants en termes de véhicules de surface motorisés et surtout de voiliers robotisés.

Un deuxième chapitre est consacré aux **Modèles et simulateur numérique**. Le modèle de comportement d'un voilier doit tenir compte des interactions complexes fluide/solide produisant les efforts aéro et hydro-dynamiques sur les voiles, la coque et le safran. La complexité des modèles de ce type d'effort rend difficile l'écriture d'un modèle analytique précis. Un modèle numérique a donc été développé par l'Ecole Centrale de Nantes, dans le cadre d'un des livrables du projet *ASAROME* afin de permettre de simuler le comportement d'un voilier. N'ayant, au début de cette thèse, aucune connaissance sur le monde de la voile et des voiliers, je me suis attaché à comprendre les éléments physiques permettant d'expliquer comment un voilier était propulsé par le vent et comment il pouvait se diriger. Ces notions d'aérodynamique et d'hydrodynamique m'ont également aidé à comprendre la méthodologie utilisée par le Laboratoire de Mécanique de Fluides de l'ECN pour développer son simulateur. Ces différentes notions sont présentées en début de ce chapitre. La dernière partie est consacrée à la présentation du travail

que j'ai réalisé pour exploiter ce simulateur afin d'extraire les informations utiles aux algorithmes de navigation telles que le comportement en virage, le rayon tactique ou les courbes polaires de vitesse et de gîte. Ce simulateur prenant la forme d'un code de calcul, j'ai également développé une interface graphique pour faciliter son utilisation. Ce simulateur a également été utilisé dans les chapitres 5 et 6 afin de valider et comparer les méthodes de navigation développées.

Le chapitre suivant porte sur l'**Architecture du système**. En matière de robotique mobile, et plus particulièrement en ce qui concerne la robotique en milieu naturel, la validation de lois de commande ne peut être effective qu'à travers des expérimentations sur un dispositif réel. Pour ce faire, deux prototypes ont été réalisés. Le premier, développé par la société *Robosoft* dans le cadre contractuel du projet ANR *ASAROME*, est basé sur un voilier commercial de type "*Mini J-class*" de 3,5 m de long.

La mise en place de campagnes de tests sur ce prototype étant assez complexe à organiser, en particulier en raison du poids de l'engin, j'ai développé un second prototype basé sur un modèle réduit de voilier afin de réaliser des tests préliminaires de validation des algorithmes de commande. Sur ce deuxième dispositif expérimental, l'architecture logicielle et matérielle a été conçue de manière à être la plus proche possible de celle intégrée sur le voilier *Asarome* afin de faciliter le portage des algorithmes d'un système à un autre.

L'architecture matérielle de ces systèmes repose sur un ensemble d'actionneurs, de capteurs (GPS, centrale inertielle, magnétomètre, capteur de vent mais également caméra omni-directionnelle, sonar et hydrophones) et de calculateurs qui communiquent à travers un réseau multi-protocoles. Dans ce chapitre, nous présentons également l'architecture logicielle que nous avons définie sur ces systèmes. Cette architecture repose sur plusieurs modules assurant les fonctions de navigation, de commande, de perception et de gestion bas-niveau. Afin de donner un aperçu complet de l'architecture, les composants matériels et logiciels liés à la perception pour la détection d'obstacles sont également décrits dans ce chapitre, même si le développement des algorithmes de perception ne font pas partie du travail que j'ai réalisé dans le cadre de cette thèse.

Dans le chapitre **Navigation et commande**, nous présentons les algorithmes que nous avons développés pour permettre le pilotage d'un voilier afin qu'il rejoigne un point de passage (ou plusieurs points de passage successifs) tout en évitant les obstacles. Ce contrôle est formellement divisé en deux parties : un premier module, dit de navigation, permet de déterminer un cap consigne et un angle de voile

désiré afin d'atteindre l'objectif tout en évitant les obstacles. La détermination de ces deux paramètres dépend évidemment des conditions instantanées de vent ainsi que de la carte des obstacles qui sont mis à jour en temps réel par les capteurs embarqués et le système de perception. Ces deux consignes sont ensuite passées au module dit de commande qui réalise, entre autres, un asservissement sur l'erreur de cap de manière à déterminer un angle de gouvernail désiré qui est transmis au module de gestion et d'asservissement bas-niveau. Nous avons développé trois méthodes différentes pour effectuer cette navigation réactive avec évitement d'obstacles. Un point commun à chacune de ces trois méthodes est qu'elles se basent toutes sur l'utilisation de la polaire de vitesse du voilier. La première méthode détermine un cap consigne par la minimisation d'un critère basé sur la somme pondérée de deux fonctions coût : la première est liée à l'efficacité pour rejoindre l'objectif et la seconde à la distance aux obstacles. La seconde méthode est basée sur un codage par un système d'inférence floue de la première méthode. Le dernier algorithme utilise la méthode des champs de potentiels, pour laquelle un obstacle virtuel est introduit à travers un potentiel local (c'est-à-dire se déplaçant avec le voilier) représentant les capacités de propulsion du voilier.

La validation de ces algorithmes est présentée dans le chapitre **Résultats**. Cette validation est effectuée en premier lieu grâce à des simulations numériques. Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons la définition du protocole de simulation. Ensuite, nous exposons les résultats obtenus à partir des simulations effectuées pour chacune de ces méthodes, d'abord sans obstacles puis en présence d'obstacles. Ces simulations ont été réalisées sous différentes conditions de vent et en utilisant différentes formes de polaire de vitesses du bateau, afin de tester leur robustesse vis-à-vis de ce paramètre. Cette série de simulations permet de conclure d'une part sur l'efficacité de chacun de ces algorithmes de navigation et d'autre part de comparer leurs performances.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus en implémentant la méthode des champs de potentiels sur le modèle réduit de voilier. Cette série d'essais, réalisés sur un lac et consistant à passer par plusieurs points de passage définis par un utilisateur, permet de conclure sur l'efficacité de ces algorithmes

Enfin, ce mémoire se termine par une **Conclusion** sur les travaux menés et donne quelques perspectives sur les voies qu'il nous semble opportun de suivre afin d'aboutir à des voiliers autonomes capables d'assurer une présence quasi-persistante sur les océans.

2

État de l'art

Les véhicules marins autonomes sont des engins auto-propulsés, munis d'une source d'énergie embarquée, qui n'ont aucun lien continu de communication avec des opérateurs humains.

Parmi les véhicules marins autonomes, on distingue les véhicules sous-marins ou UAV (Underwater Autonomous Vehicle) et les véhicules de surface ou ASV (Autonomous Surface Vehicle). Même si les UAV ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche et de développements depuis plusieurs décennies, ces derniers ne seront pas abordés dans cet état de l'art qui se focalisera sur les ASV. Le lecteur pourra se référer par exemple à [3, 4, 5] pour avoir un panorama de ces engins sous-marins. Notons également que l'on trouve assez souvent dans la littérature le terme d'USV (Unmanned Surface Vehicle) qui fait référence à des engins de surface sans équipage. Ce type de véhicule peut être opéré à distance ou disposer d'une autonomie de décision embarquée. Généralement, le terme d'USV est utilisé dans le domaine militaire et fait souvent référence à des véhicules télé-opérés.

Le développement des véhicules autonomes de surface (ASV) est motivé dans le domaine civil par des missions orientées vers la recherche océanographique, la cartographie marine ainsi que pour obtenir des données météorologiques. Dans le domaine militaire, le développement des ASV est sous-tendu par les besoins en opérations de protection du littoral, de surveillance des ports ou de déminage. Ces engins sont généralement des bateaux autonomes de petite taille (inférieurs à 11 m selon la classification des forces navales américaines [6]).

Le développement des ASV conçus pour l'observation océanographique a pris deux directions principales : les ASV motorisés qui sont étudiés depuis longtemps mais qui ont des limitations énergétiques et les bateaux à voile autonomes ou ASB (Autonomous Sail Boats). Les ASB sont un type d'ASV utilisant les énergies renouvelables, notamment les énergies solaire et éolienne. Grâce à l'utilisation des énergies renouvelables, ces ASB peuvent potentiellement mener des missions de

longue durée tout en étant respectueux de l'environnement [7].

Ce chapitre est organisé de la manière suivante : nous présenterons tout d'abord quelques exemples de véhicules semi-submersibles. Ce type d'engin, pour lequel la majorité des surfaces se trouve immergée juste sous la surface de l'eau, constitue en fait un intermédiaire entre les véhicules de surface et les véhicules sous-marins. Puis nous présenterons les ASV motorisés pour terminer par les ASV utilisant la propulsion vélique c'est-à-dire les voiliers robotisés.

2.1 Les semi-submersibles

Le développement de tels engins remonte au début des années 1980. L'intérêt de ce type de véhicule par rapport aux bateaux conventionnels tient principalement au fait de présenter peu de surface portante exposée aux vents et aux vagues, leur conférant ainsi une plus grande stabilité et leur permettant de naviguer dans des conditions de mer difficiles. L'intérêt par rapport aux engins sous-marins consiste en une gestion simplifiée du confinement des sources d'énergie (en particulier le rejet des gaz d'échappement des moteurs thermiques) et surtout à une localisation possible par système GPS. Enfin, pour les applications militaires, les faibles surfaces exposées à l'air libre les rendent difficilement détectables au milieu des vagues.

À notre connaissance, le premier ASV semi-submersible a été présenté au Canada en 1981 par la société International Submarine Engineering (ISE). Plusieurs exemplaires de ce véhicule nommé *DOLPHIN* ("*Deep Ocean Logging Platform with Hydrographic Instrumentation and Navigation*", voir Fig 2.1) ont été construits et livrés par ISE au service hydrographique canadien et à la marine américaine. Ils ont été utilisés principalement comme engins téléguidés pour l'exploration ou la recherche de mine. La propulsion est assurée par un moteur diesel et ses dimensions (7,5 m de longueur, 1,0 m de diamètre pour un poids de 2,8 t) en font une plate-forme capteur bien dimensionnée pour des applications dans des conditions de mer difficiles. Le moteur embarqué lui donne une autonomie de déplacement de l'ordre de 1000 miles nautiques et une vitesse de 12 nœuds¹. La version militaire du *DOLPHIN* peut être télécommandée par une liaison radio d'une portée de 15 km [8, 9].

1. Les marins sont réfractaires à l'usage d'unités du système international. Ils expriment les distances en mile nautique et les vitesses en nœud (nd). Un mile marin vaut 1852 m et un nœud est la vitesse correspondant à un mile nautique à l'heure. Une vitesse de 12 nd correspond donc à environ 22 km/h.

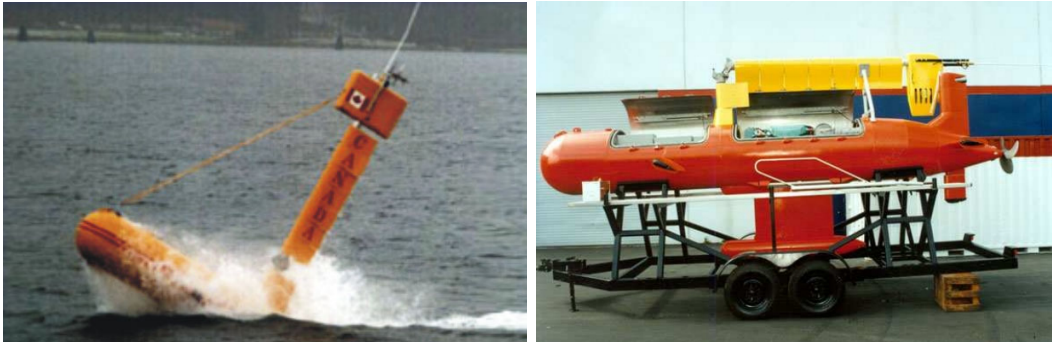


FIGURE 2.1 – *Dolphin MK-I* (International Submarine Engineering, Canada)

En Europe, et plus précisément en Angleterre, le développement de semi-submersibles autonomes remonte à 1995. Ce type de véhicule a été conçu afin de fournir une réponse économiquement viable face aux coûts élevés, en particulier de main d'œuvre, des activités de mesure hydrographique utilisant des vaisseaux conventionnels. Un premier démonstrateur a été testé avec succès en mer en 2004, démontrant ainsi que les caractéristiques hydrodynamiques, les matériaux de construction et les méthodes de fabrication étaient corrects. D'autres tests ont été réalisés par la suite avec une série d'instruments, en particulier une caméra de surveillance, un sonar conventionnel et un sonar de profondeur pour des relevés bathymétrique [10]. Ces engins sont actuellement commercialisés par la société Autonomous Surface Vehicles Ltd sous la dénomination *ASV-6300* (voir Fig. 2.2). Il s'agit d'un semi-submersible de 6,3 m de long pesant 2 t, propulsé par un moteur diesel de 30 chevaux lui permettant d'atteindre une vitesse de 8 nd. Les 150 litres de carburant embarqués autorisent une autonomie d'une cinquantaine d'heures.



FIGURE 2.2 – *ASV-6300* (Autonomous Surface Vehicles Ltd, Angleterre)

En Europe toujours, l'Institut for Systems and Robotics de l'Université de Lis-

bonne (Portugal) a développé en 2000 le semi-submersible autonome *Caravela* (fig. 2.3) à partir d'un financement du programme Eureka-Euromar E1850 (1998-2002). Ici aussi, l'objectif du projet *Caravela* a été le développement d'une plate-forme océanique polyvalente pouvant effectuer régulièrement des missions longues (telles que l'analyse méso-échelle de la dynamique des océans) similaires à celles réalisables avec des navires océanographiques conventionnels mais à moindre coût [11].

Le véhicule est entièrement autonome et capable de répondre aux commandes depuis n'importe quelle plate-forme via une liaison de communication satellite. Au cœur du navire *Caravela* le système de commande lui permet de suivre des trajectoires prédéterminées et d'éviter des obstacles potentiellement dangereux.



FIGURE 2.3 – *Caravela 2000* (Institut for Systems and Robotics de l'Université de Lisbonne, Portugal).

Ce semi-submersible mesure 7 m de long pour 2 m de largeur et 6 m de haut. Le système de propulsion est assuré par deux moteurs électriques qui permettent au véhicule d'atteindre des vitesses de 4 nd. L'énergie embarquée est renouvelée grâce à un petit moteur diesel embarqué, lui conférant une autonomie de déplacement théorique de 700 miles nautiques. A notre connaissance, ce prototype n'a jamais été testé en mer et n'a pas été commercialisé.

2.2 Les bateaux autonomes motorisés

Dans ce mémoire, nous ne nous attacherons pas à établir une liste exhaustive de tous les ASV développés mais à présenter les drones marins qui sont à notre connaissance les plus représentatifs de l'état de l'art en question. Aussi, est-il important de les mentionner car, comme les ROV (Remote Operated Vehicles) ont

2.2. LES BATEAUX AUTONOMES MOTORISÉS

précédé les véhicules autonomes marins, les ASV sont les prédécesseurs des voiliers autonomes (Autonomous Sailing boats ou ASB).

Dans cette partie, nous dissociérons les prototypes d'ASV réalisées par des organismes de recherche des produits commerciaux (civils ou militaires) pour lesquels peu d'informations de fond sont disponibles pour des raisons de protection de la propriété industrielle ou de secret défense.

2.2.1 ASV issus d'initiatives publiques

A notre connaissance, le programme de recherche le plus ancien concernant les bateaux robotisés a été initié par J. Manley au MIT Sea Grant College Program en 1993. Le premier navire robotisé réalisé était *ARTEMIS* (*Autonomous Remote Tracking and Environmental Monitoring Integrated System*), une réplique d'un chalutier de pêche (1,4 m de long) à l'échelle 1/7^e [12, 13]. Sa propulsion était assurée par un moteur électrique et un servo-moteur pilotait l'angle de safran². L'objectif initial de ce projet était de tester des systèmes de pilotage automatique d'un ASV (contrôle automatique de cap et navigation DGPS). Il a été équipé d'une sonde acoustique de profondeur afin d'effectuer avec succès des relevés bathymétriques sur la Charles River à Boston.



FIGURE 2.4 – *ARTEMIS* (MIT, États-Unis).

Sa taille relativement réduite, sa faible tenue à la mer et son autonomie réduite étaient les principaux inconvénients de ce premier prototype. Pour palier à ces inconvénients, une plate-forme de type catamaran a été développée : *ACES*

2. Le safran est une partie du gouvernail d'un navire, constitué d'un plan vertical pouvant pivoter afin de dévier le flux d'eau sous la coque pour changer la direction du navire (Source Wikipédia)

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

(*Autonomous Coastal Exploration System*). Le choix d'une structure de type catamaran était essentiellement guidé par la recherche d'une plus grande stabilité (roulis-tangage) nécessaire pour la précision des relevés bathymétrique. Sa propulsion était assurée par un moteur thermique et il utilisait des moteurs pas à pas pour le réglage des gaz et de l'angle de gouvernail [14].

En raison de difficultés techniques liées au contrôle de la propulsion sur le moteur thermique, une version modifiée de ACES a été développée en 2000 : *Autocat*, qui utilise deux moteurs électriques pour la propulsion [15, 16].



FIGURE 2.5 – *AutoCat* (MIT, États-Unis)

A partir de 2000, les recherches menées par Manley au MIT se sont progressivement tournées vers les AUV (Autonomous Underwater Vehicle).

A partir de 2004, avec *SCOUT* (*Surface Craft for Undersea and Oceanographic Testing*), une voie différente a été explorée par une autre équipe du MIT consistant à utiliser des coques de type kayak de mer et de les motoriser afin de réaliser des plates-formes à bas coût, facilement déployable (légèreté) et offrant une bonne tenue en mer.

Les recherches menées avec ce type de plate-forme concernent principalement le déploiement et la localisation coopérative par réseaux de capteurs [17, 18]. Ces véhicules sont également utilisés, en particulier en coopération avec des gliders, pour l'acquisition de données coordonnées et simultanées afin de réaliser une cartographie de paramètres pertinents pour la modélisation océanographique ou pour la classification de sources sonores sous-marines [19]. Cette plate-forme a également été utilisée pour l'implémentation de règles de navigation fondées sur la convention COLREGS en exploitant des algorithmes de contrôle comportemental (optimisa-

2.2. LES BATEAUX AUTONOMES MOTORISÉS



FIGURE 2.6 – *SCOUT* : trois plates-formes en coopération (a) et avec des AUV sur le pont d'un navire lors d'une campagne de test de coopération ASV-AUV (MIT, États-Unis)

tion multi-objectifs) [20, 21].

Des travaux de recherche ont également été menés sur la conception des ASV afin d'améliorer leur stabilité en mer, en particulier en abaissant la ligne de flottaison³.

Par exemple, à l'université de Floride (USA), une équipe menée par A. Leonessa s'est intéressée en 2003 au développement d'un ASV en tant que relais de positionnement GPS pour des AUV [22]. Un design préliminaire a été effectué sur la base d'un catamaran avec une quille large et très profonde permettant d'augmenter la stabilité et la tenue à la mer du navire. La quille est dimensionnée de sorte à pouvoir accueillir la charge utile d'instruments de mesure, les batteries et les calculateurs embarqués. Ce véhicule n'a pas été réalisé mais des recherches ont été menées sur le contrôle adaptatif [23] et sur le contrôle neuronal [24] de ce type d'engin (fig. 2.7).

Sur un principe un peu similaire à celui utilisé par A. Leonessa, C. Kitts (Robotic Systems Laboratory, Université de Santa Clara USA) a présenté en 2005 un design préliminaire d'ASV, le *WASP* : "*Autonomous Surface Vessel*" conçu sur la base d'une plate-forme et de deux flotteurs immergés afin d'augmenter la stabilité de l'engin [25]. Un des objectifs de cette plate-forme est de réaliser des relevés bathymétriques en eaux peu profondes. Le prototype réalisé, *SeaWASP*, fig. 2.8, a été testé avec succès dans différents environnements naturel tels que le Lac Tahoe

3. Ligne de flottaison : désigne la ligne qui sépare la partie immergée de la coque d'un navire de celle qui est émergée (Source Wikipédia)

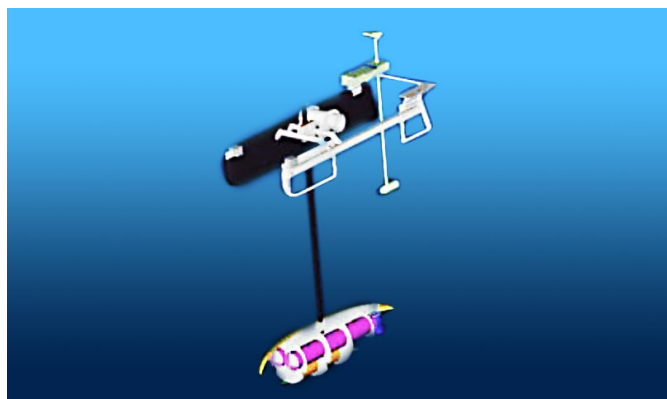


FIGURE 2.7 – ASV de l'Université de Floride, États-Unis

(Nevada) [26].



FIGURE 2.8 – *SeaWASP* (Université de Santa-Clara, États-Unis)

En Europe, parmi les plus anciens projets d'ASV basé sur une structure monocoque, on trouve le "*New hydrographic automated vehicle*". Ce projet a été commencé sous la supervision de l'autorité portuaire de Bordeaux (France), en 1994. Ce bateau autonome a été développé à partir d'un bateau "*zodiac*" de 5 m de longueur pour un poids de 600 kg capable d'atteindre une vitesse maximale de 15 nd. Le prototype a été terminé et testé en 1995 mais, comme ses capacités pour la récupération des données hydrographiques et bathymétriques ont été jugées insuffisantes, le projet a été abandonné [27].

Dans plusieurs pays européens, différents projets utilisant tous une structure de catamaran ont émergé dès le début des années 2000.

2.2. LES BATEAUX AUTONOMES MOTORISÉS



FIGURE 2.9 – *New Hydrographic Automated Vehicle* (Bordeaux, France)

Ainsi, l'Université de Rostock (Allemagne) a développé de 1998 à 2000 *Messin*, un catamaran à propulsion électrique. Cet ASV de type de catamaran a été conçu pour optimiser sa charge utile en instruments de mesures tout en minimisant les mouvements dans des eaux agitées. Le type de mission envisagée concerne le suivi d'éléments polluants et la récupération de données environnementales et hydrographiques en eaux peu profondes (fleuves, réservoirs, canaux, et eaux côtières). Les travaux relatifs à cet ASV portent principalement sur le positionnement et le suivi de chemin précis [28]. Ce projet semble à l'heure actuelle abandonné.



FIGURE 2.10 – *Messin* (Université de Rostock, Allemagne)

En Italie, à partir de fonds du CNR (Centre National de la Recherche italien), l'Université de Gênes développe depuis 2002 un programme de recherche pour l'étude de l'interface air-mer en Antarctique. Ces recherches ont conduit au développement de *Sesamo*, un catamaran de 2,4 m de longueur, propulsé par deux moteurs électriques indépendants. Cet ASV a été utilisé avec succès pour une mission d'étude et de mesures des interactions air-mer de surface en Antarctique en 2004 [29, 30].

La structure de type catamaran du prototype *Sesamo* est particulièrement adaptée en raison de sa stabilité, de sa capacité de charge utile pour les instruments de mesures et la facilité d'accès au pont [31]. Par ailleurs, compte-tenu des



FIGURE 2.11 – *Sesamo* (Université de Gênes, Italie)

contraintes liées aux appareils de mesure, cet ASV a été conçu pour naviguer par faible vent et mer calme.

Le changement de cap est assuré par une commande différentielle des vitesses de rotation des deux propulseurs. Les travaux basés sur cette plate-forme portent également sur l'identification du modèle de l'ASV [32] et l'estimation du mouvement dans le plan horizontal par caméra [33].

Au Royaume-Uni, depuis 2006, le "Marine and Industrial Dynamic Analysis Research Group" (MIDAS) de l'Université du Plymouth, développe un ASV nommé *Springer* (fig.2.12).

Springer est un catamaran d'environ 4m pouvant être utilisé pour des applications liées à la recherche de polluants et à des relevés environnementaux et hydrographiques en rivière, bassin ou zones côtières (eaux peu profondes). Un autre objectif du projet *Springer* est d'être une plate-forme utilisable par d'autres institutions universitaires et scientifiques impliquées dans la collecte de données environnementales, la recherche dans le domaine de l'instrumentation, l'ingénierie de systèmes de commande ou des systèmes de puissance basés sur des sources d'énergie alternatives [34].

Sur la base de ce véhicule, divers travaux sont entrepris portant sur la conception, la fusion de données et la commande floue et neuro-floue [35].

Au Portugal, l'ISR (Institut for Systems and Robotics) de l'Université technique de Lisbonne développe depuis les début des années 2000 une activité de

2.2. LES BATEAUX AUTONOMES MOTORISÉS



FIGURE 2.12 – *Springer* (Université de Plymouth, Angleterre)

recherche sur les ASV et sur les AUV.

Concernant les ASV, le développement d'un prototype nommé *Delfim* a été une des retombées du projet européen MAST-III ASIMOV (Advanced System Integration for Managing the Coordinated Operation of Robotic Ocean Vehicles) [36].



FIGURE 2.13 – *Delfim* (Institut for Systems and Robotics, Portugal)

Ce prototype est construit sur une base de catamaran avec deux moteurs électriques pour assurer sa propulsion. L'objectif de ce projet était la coordination d'un ASV et d'un AUV tout en maintenant un lien de données entre les deux véhicules par modem acoustique : l'ASV, équipé d'un récepteur DGPS, fournissait dans ce cas une référence géographique aux données collectées par l'AUV [37]. A travers ce dispositif expérimental, différents travaux de recherche ont été menés tels que la construction d'estimateurs basés sur les filtres complémentaires [38] ou la commande non linéaire de systèmes sous-actionnés [38, 39].

2.2.2 Produits commerciaux

Dans le domaine militaire, l'usage de navires sans équipage remonte à une soixantaine d'années. Ainsi, pendant la seconde guerre mondiale des ASV ont été développés et utilisés pour des opérations de détection de mines et d'évaluation de dégâts de batailles. Par exemple, en 1946, pendant l'opération *Crossroads*⁴, des bateaux sans équipage ont été utilisés pour obtenir des échantillons d'eau radioactive après chaque explosion nucléaire. Plus tard, en 1960, une coque de fibre de verre de 23 pieds, motorisée par un moteur à gaz, a été modifiée pour opérer à distance comme bateau démineur.

Un certain nombre de ces bateaux ont été assignés à la division 113 à Saigon, Viêt-Nam, pour opérations de déminage (fig.2.14) [6].

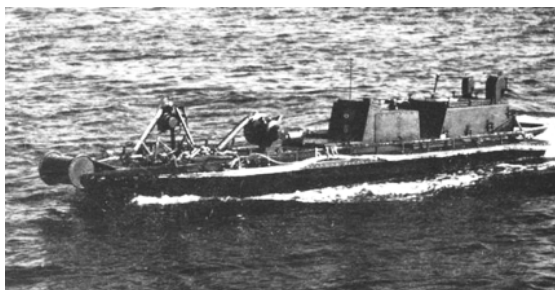


FIGURE 2.14 – Démineur autonome *MSD* (États-Unis)

Entre janvier et février 1997, le *Remote Minehunting Operational Prototype (RMOP)* a été télé-opéré avec succès depuis le USS Cushing afin de mener 12 jours d'opérations de déminage dans le Golfe persique (fig. 2.15).

Ces expériences sur des terrains de conflit ont permis à la défense américaine de valider ces concepts d'ASV et d'AUV, permettant l'augmentation et la diversification des moyens de défense de la flotte américaine. Ainsi, l'US Navy a considéré les véhicules sans pilote comme un des outils les plus importants pour le déminage pendant l'opération "Iraqi Freedom" en 2003 [6].

Depuis le début des années 2000, le Département de la Défense des Etats-Unis, finance un ambitieux programme, le projet *Spartan Scout*, ayant comme objectif

4. L'opération *Crossroads* est une série d'essais nucléaires qui eurent lieu dans l'atoll de Bikini au cours de l'été 1946, il s'agissait des premiers essais atomiques depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. C'est aussi la dernière grande expérimentation du projet *Manhattan* avant sa dissolution et le transfert de ses activités à la Commission de l'énergie atomique des États-Unis.

2.2. LES BATEAUX AUTONOMES MOTORISÉS



FIGURE 2.15 – *RMOP* (Remote Minehunting Operational Prototype) en déploiement dans le golfe persique

central la validation de solutions de véhicules sans équipage pour des missions de détection de mine, de surveillance et de reconnaissance. Les prévisions du marché, en 2003, portaient sur l'achat potentiel de 300 USV pour un budget total de 1,8 milliards de dollars US d'ici à fin 2011 [40]. Plusieurs prototypes ont été réalisés dans le cadre de ce programme par des entreprises privées telles que Lockheed Martin, Lockheed Martin, Radix Marine, Sirehna, etc.

La figure 2.16 illustre un de ces prototypes, basé sur une structure gonflable à coque rigide de 7 m, lors d'un déploiement dans le Golfe persique pour des missions de surveillance et de reconnaissance.



FIGURE 2.16 – *Spartan* (US Navy)

En Israël, *Protector* (2006) est un ASV équipé de systèmes d'armes, de caméras hautes performances et d'un radar. L'ASV *Protector* peut être commandé à distance pour des missions telles que la protection, la lutte anti-terroriste, la surveillance et la reconnaissance. Le *Protector* a été développé par "RAFAEL" (*Israeli RAFAEL Armament Development Authority*) en réponse aux menaces terroristes

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

contre des actifs maritimes (fig. 2.17).

Basé sur un bateau gonflable à coque en V rigide de 9 mètres, le *Protector* est un navire rapide et manœuvrable. Sa plateforme modulaire a été conçue afin d'envisager des reconfigurations pour l'adapter à des missions variées. Son moteur diesel lui permet de naviguer avec une vitesse maximale de 50 noeuds.



FIGURE 2.17 – *Protector* (Rafael, Israël)

En Israël toujours, la compagnie Elbit Systems commercialise depuis 2005, principalement pour les forces navales, un USV de 4 m nommé Stingray. Le successeur de Stingray, Silver Marlin (voir Fig. 2.18), est un USV de 10 m pour un poids de 4 tonnes, capable d'atteindre une vitesse maximale de 45 noeuds. Ce véhicule semble être un des seuls USV à pouvoir fonctionner en autonomie, sans lien de communication avec une base d'opération.



FIGURE 2.18 – *Stingray* et *Silver Marlin* (Elbit Systems, Israël)

En France, dès 2000, l'entreprise Sirehna, désormais filiale de DCNS, a lancé son premier ASV basé sur une plateforme de jet-ski. Depuis 2007, Sirehna développe un drone de surface marin sur la base d'un bateau semi-rigide de 9,2 m. Ce véhicule peut embarquer différents type de capteurs ainsi que des calculateurs

2.2. LES BATEAUX AUTONOMES MOTORISÉS

permettant le contrôle dynamique du véhicule (navigation, positionnement dynamique, stabilisation de mouvements), la détection et l'évitement d'obstacles (2.19).



FIGURE 2.19 – *Rôdeur* (Sirehna, France)

Toujours en France, sur une base similaire de plateforme gonflable à coque rigide ou sur une plateforme entièrement rigide, ECA Robotics commercialise une gamme d'USV appelée *Inspector* (Fig. 2.20).



FIGURE 2.20 – *Inspector* (ECA Robotics, France)

Comme on peut le constater à la lecture de ce bref tour d'horizon sur l'usage militaire des ASV, la majorité de ces véhicules sont conçus pour fonctionner en mode semi-autonome c'est-à-dire qu'ils intègrent des algorithmes de commande bas niveaux et/ou des algorithmes de détection d'obstacles mais ils restent fondamentalement pilotés à distance par un opérateur humain. Le lecteur intéressé par ces applications militaires pourra se référer à [41, 42] pour un tour d'horizon plus complet des différents projets d'ASV à usage militaire, à [6] pour une étude prospective de l'US Navy sur l'opportunité d'utiliser des ASV dans des conflits

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

armés ainsi qu'à [43] pour les aspects exploitation et maintenance de ces véhicules dans la marine de guerre américaine.

Actuellement (en 2011), les ASV ont atteint une certaine maturité technologique et un intérêt commercial certain puisqu'il est possible de trouver plusieurs sociétés privées qui commercialisent ce type de véhicules de surface. Par exemple, SeaRobotics, aux Etats-Unis, commercialise plusieurs USV (monocoques, catamaran, trimaran) affichant des vitesses de l'ordre de 5 à 10 noeuds pour un poids de 15 à 60 kg. Leur autonomie est de l'ordre de quelques heures (voir Fig. 2.21).

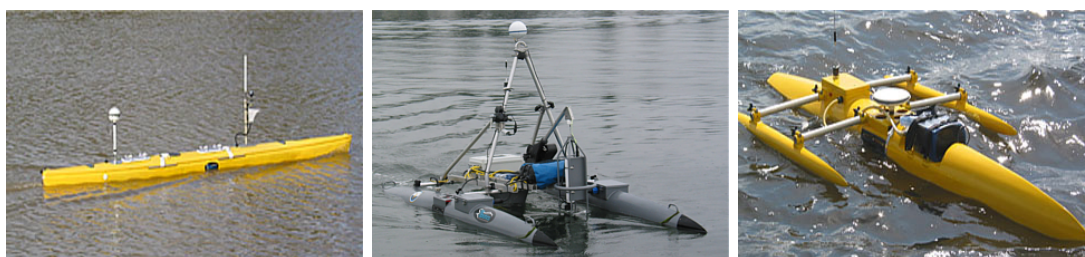


FIGURE 2.21 – *USV-5000*, *USV-600* et *USV-1000* (SeaRobotics, États Unis)

Sur une gamme de produits à peu près équivalente, Clearpath Robotics propose le King Fisher : trimaran de 30 kg, propulsé par deux moteurs électriques, vitesse de 2,5 noeuds pour une autonomie de 4 heures.

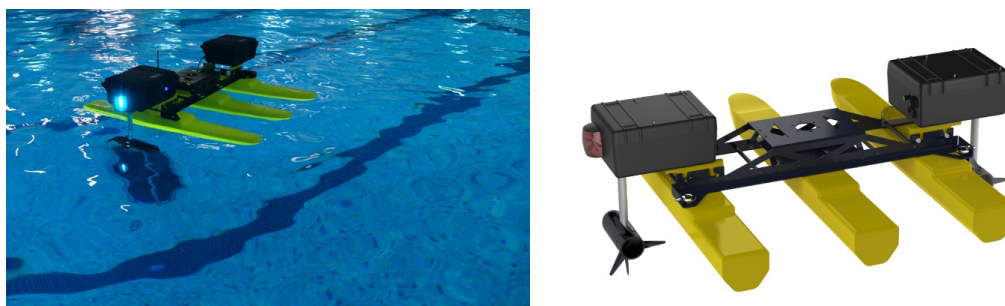


FIGURE 2.22 – *KingFisher* (Clearpath Robotics, États Unis)

Au Royaume-Uni, ASVGlobal commercialise des drones pour l'entraînement au tir des forces navales, telle que la gamme des FMTD (Fast Marine Target Drones) ainsi que des produits à usage civil, tel que le C-Cat (voir Fig. 2.23).

En France, Subsea Tech propose un petit catamaran téléopéré de 30 kg propulsé par deux moteurs électriques de 250 W lui permettant d'atteindre une vitesse de

2.2. LES BATEAUX AUTONOMES MOTORISÉS



FIGURE 2.23 – *FMTD-5000*, et *C-Cat* (ASVGlobal, Angleterre)

5 nœuds et une autonomie de l'ordre de 3 heures (Fig. 2.24).



FIGURE 2.24 – *Catarob* (Subsea Tech, France)

Enfin, citons le WaveGlider (Fig. 2.25) de Liquid Robotics au design innovant, conçu pour assurer une présence continue dans les océans. Ce véhicule embarque des panneaux solaires pour l'alimentation électrique des capteurs embarqués et l'énergie des vagues pour sa propulsion. Des tests ont montré que ce type d'engins pouvait se déplacer sur plus de 2500 miles nautiques, soit plus de 4000 km.

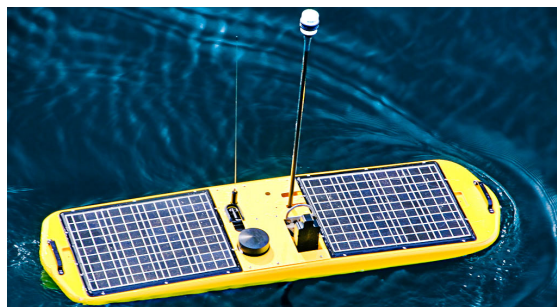


FIGURE 2.25 – *Wave Glider* (Liquid Robotics, États Unis)

2.3 Les voiliers autonomes

Les voiliers présentent un certain nombre d'avantages par rapport aux bateaux propulsés par des moteurs, électriques ou thermiques : leur autonomie énergétique en premier lieu mais aussi le fait d'être plus silencieux (ce qui peut être un atout pour des applications militaires) et moins polluants. Comme pour les ASV à moteur, on trouve dans la littérature des références assez nombreuses sur le développement et la commande d'ASB (Autonomous Sail Boats).

2.3.1 Les précurseurs

Les premières mentions d'ASB remontent à 1991 avec les travaux de W. Warden [44] où il présente un simulateur simplifié de voilier, basé sur les polaires de vitesse, destiné à être testé par des navigateurs afin de construire un système expert d'aide à la navigation. L'objectif ici n'était pas de concevoir un voilier autonome mais d'embarquer un système expert dans des voiliers classiques afin de fournir une aide à la navigation pour des équipages humains.

Des travaux similaires ont été menés plus récemment avec le projet *Robosail* [45, 46] débuté en 1997. Son objectif était de développer un système adaptatif de pilote automatique pour fournir une aide aux skippers en solitaire ou durant des régates. La partie fondamentale du projet était centrée sur le développement de techniques d'apprentissage, de *data mining* et de raisonnement à base de règles. Les mécanismes d'apprentissage étaient fondés sur des enregistrements d'informations pertinentes relatives à l'environnement, au réglage des voiles, à la commande de barre ainsi qu'à la planification des routes lors de course au large. Ce système a en particulier été embarqué sur un des voiliers participant à la Volvo Ocean Race de 2001/2002. Le projet *Robosail* a été stoppé en 2007.

Parmi les travaux précurseurs dans le domaine, citons également E.C. Yeh en 1992 [47] qui a proposé un modèle mathématique simplifié du comportement d'un voilier ainsi qu'une loi de commande de cap fondée sur un moteur d'inférence floue.

Un peu plus tard, en 1997, Abril et al. ont décrit dans [48] un contrôleur flou pour commander le gouvernail et la position de la voile dans un voilier. Leur approche est fondée sur un codage par règles des paramètres de commande en fonction de l'angle de vent apparent (voir définition dans la section §3.2.1 et figure 3.2 page 50).

Ces projets n'ont pas été continués au-delà des références citées.

L'un des projets de voilier autonome le plus abouti a été initié en 2001 par Garbiel H. Elkaim à l'Université de Stanford [49] *Atlantis* (fig. 2.26). Le prototype *Atlantis* est un catamaran de 7,2 m de longueur et de 3 m de large dont la voile a été remplacée par un mât aile (rigide) de $7,65 m^2$. La direction du bateau est contrôlée par deux safrans situés à l'arrière de chaque coque.

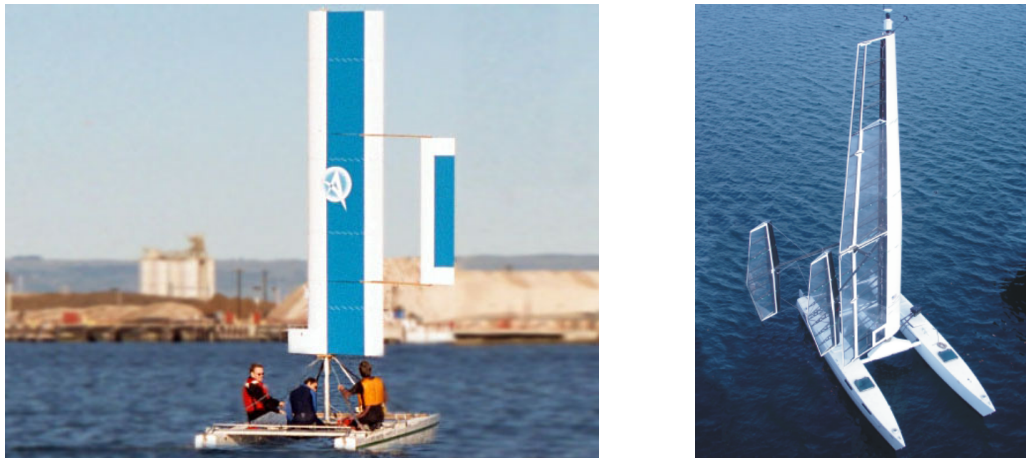


FIGURE 2.26 – Atlantis (Université Stanford et Université de Californie Santa-Cruz, USA) et HWT X-1 (Harbor Wing Technologies Inc., USA)

Le travail effectué par G. Elkaim porte sur plusieurs aspects dont :

- la conception d'un mât aile possédant des caractéristiques aérodynamiques intéressantes et en particulier la capacité d'auto-alignement du mât obtenue par un système de déflecteur. Un moteur électrique de faible puissance permet d'actionner le mât, principalement pour l'éloigner de la singularité correspondant au cas d'un vent arrière [50, 51, 52].
- l'identification d'un modèle analytique représentatif du comportement du catamaran sans et avec son aile rigide [50, 53].
- le contrôle de cap, avec une erreur de suivi de chemin de moins de 1 m, en utilisant un contrôleur LQR [53] ou un contrôleur H_∞ [54] pour des performances similaires.

Ce prototype a été testé en particulier pour des applications de navigation sur zone (*station-keeping*) [55].

Une version plus évoluée, le HWT-X1 (9 m de long, 4 m de large et un mât aile

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

de 12 m, voir Fig. 2.26), a été conçue en collaboration avec *Harbord Wing Technology Inc.* pour la surveillance du littoral ou de plateforme off-shore [7]. *Harbord Wing Technology* est, avec *Unmanned Ocean VehiclesTM*, la seule société commerciale à notre connaissance à proposer à son catalogue des voiliers robotisés. Concernant *Unmanned Ocean VehiclesTM*, cette société américaine créée en 2004, propose quatre voiliers autonomes : trois monocoques de 5 m, 8 m et 10 m et un trimaran de 10 m. Tous sont équipés de deux mâts ailes à l'exception de *Sea Watcher*, le plus petit monocoque de 5 m pour lequel un seul mât aile a été installé (Fig. 2.27). Aucune autre information (poids, autonomie et algorithmes de commande) n'est disponible publiquement.



FIGURE 2.27 – *Sea Watcher* (Unmanned Ocean Vehicles Inc., USA)

Un autre projet a débuté en 2004 au Pays de Galles sous la direction de M. Neal. Le prototype *AROO* (*Autonomous Robot for Ocean Observation*, voir Fig. 2.28) [56] a été développé pour démontrer le concept d'un bateau autonome de taille réduite mais raisonnablement durable. La coque d'*AROO*, de 1,5 m de longueur, est construite en plastique ABS. La voile consiste en une aile rigide en aluminium de 1 m de haut qui est positionnée au moyen d'un moteur à courant continu couplé à un mécanisme de réduction. Le système moteur-réducteur est monté à l'intérieur de la coque, à la base du mât, et le mât entier tourne pour déplacer l'aile rigide. Un servomoteur contrôle le gouvernail.

Ce prototype est équipé de deux potentiomètres, pour mesurer la direction du vent et la position de la voile, et d'une boussole magnétique. La source de puissance d'*AROO* est une batterie 12 V permettant d'obtenir une autonomie énergétique

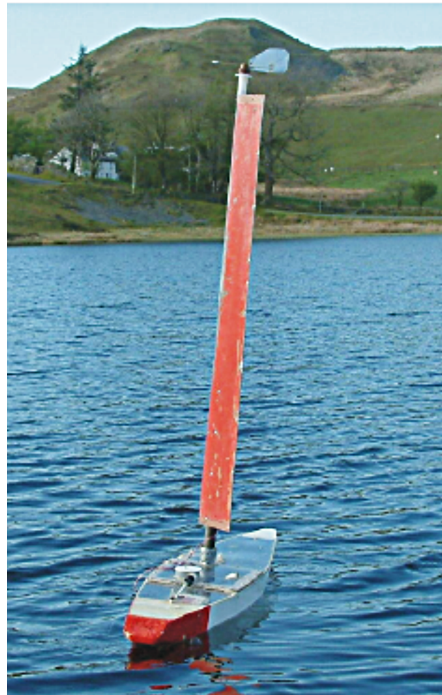


FIGURE 2.28 – Aroo (Université d’Aberystwyth, Pays de Galle, UK)

de 36 heures. Les évaluations d’*AROO* ont démontré la faisabilité de l’usage d’une aile rigide pour la propulsion même avec un vent de 45 nœuds [57].

2.3.2 Les compétitions de voiliers autonomes

En 2006, *Sailbot*, la première compétition de robots voiliers autonomes a eu lieu en Amérique du Nord (Etats-Unis et Canada). L’objectif de cette compétition était et reste de faire concourir des voiliers autonomes ou semi-autonomes conçus et développés par des équipes d’étudiants. La cinquième édition de cette compétition a eu lieu cette année en juin 2011 à Annapolis, Maryland, et a vu s’affronter 6 équipes dans deux classes de voiliers : la *Sailbot class*, pour des voiliers de moins de 2m et une *Open Class* pour des voiliers jusqu’à 4m. Comme cette compétition est avant tout un cadre d’application pour des projets d’étudiants, les travaux menés portent principalement sur l’architecture navale (conception de la coque et des voiles) ainsi que sur l’intégration mécatronique de ses différents composants (capteurs, actionneurs et calculateur embarqué).

A titre d’exemple, nous présentons ici le voilier développé par l’académie navale

des États-Unis (*USNA*) pour la compétition *Sailbot* de 2009 (voir Fig 2.29).



FIGURE 2.29 – ASB de l'académie navale des États-Unis

Ce prototype mesure 2 m pour un poids de 26,7 kg et une voile de $3,1 m^2$ capable de fonctionner théoriquement 24 heures en continu. Le prototype possède trois modes de contrôle : totalement autonome, contrôle autonome de la position de voile avec contrôle manuel du safran et contrôle totalement manuel. Le système de navigation se compose d'un processeur Rabbit 3000 et d'un ensemble de capteurs et d'actionneurs commerciaux : anémomètre Davis, boussole trois axes Micromag, GPS différentiel Magellan AC-12 (pour être compatible avec la précision requise pour les épreuves), servo-moteur de radio-modélisme pour le contrôle du safran. Le système de puissance électrique du bateau a été divisé en deux pour empêcher les interférences dans le système de commande dues aux retours de courant provenant des moteurs. Un modem Zigbee a été intégré afin de pouvoir re-programmer l'ordinateur embarqué à travers ce lien sans-fil ou d'envoyer les données concernant l'état du bateau à un ordinateur déporté (observateur). Par contre, le capteur de direction du vent (girouette) et l'actionneur de grand-voile ont été développés et construits pour s'adapter aux besoins du projet [58].

Toujours en 2006, et ceci complètement indépendamment de la compétition *Sailbot*, Y. Brière et M. Neal ont également été à l'initiative de l'organisation en

Europe d'une compétition de voiliers autonomes : la *Microtransat*. Si ce challenge était à l'origine lui-aussi destiné à fournir un cadre à des projets étudiants, il a rapidement pris une autre dimension afin de devenir une course ayant comme vocation de stimuler le développement de voiliers robotisés. Depuis 2008, la *Microtransat* a donnée naissance à la WRSC (*World Robotic Sailing Championships*) et une conférence internationale, l'*International Robotic Sailing Conference* est organisée en parallèle afin de favoriser les échanges scientifiques entre les différentes équipes ou chercheurs impliqués dans le développement de voiliers robotisés. La quatrième édition de cette compétition, et de la conférence associée, s'est déroulée en août 2011 à Lübeck (Allemagne). Le challenge *Microtransat* est désormais axé sur la promotion et l'organisation d'une course transatlantique en voilier autonome.

Compte-tenu de la proximité de ces travaux avec ceux présentés dans ce mémoire, les développements des six principales équipes européennes travaillant dans le domaine de la navigation de voiliers autonomes sont décrits dans les paragraphes qui suivent en respectant un ordre chronologique de participation au challenge *Microtransat* ou à la *WRSC*.

ISAE - Y. Brière (France)

Dès 2005, Y. Brière a proposé l'idée du challenge *Microtransat* en étendant le défi SGM : une rencontre universitaire permettant de faire s'affronter dans un cadre ludique les étudiants des départements Science et Génie des Matériaux des IUT à travers une projet de réalisation de modèles radio-commandés de voiliers [59].

IBoat, le premier prototype d'Y. Brière, mesure 2,4m pour une surface de voile de $1,5\text{m}^2$ (Fig. 2.30). Il est réalisé en fibre de verre et fibre de carbone, ce qui permet d'obtenir un prototype très léger de 35kg incluant les batteries, les actionneurs et l'électronique intégrée. La performance du bateau en conditions de vent faible n'est pas optimale mais cette surface de voile limitée lui permet d'être plus robuste en cas de vents forts. La voilure est composée d'une grand-voile et d'un foc monté sur un balestron⁵. L'ensemble est orientable et commandé par un seul moteur. Les safrans (un de chaque côté de la coque) sont pilotés par un moteur pas à pas. L'alimentation est fournie par une batterie au plomb de 14Ah rechargée par des panneaux solaires fournissant une puissance crête de 20 W. *IBoat* embarque des capteurs classiques de navigation : une boussole permet d'obtenir le cap du bateau, un capteur de vent (anémomètre - girouette) placé en haut du

5. Balestron : pièce pivotante supportant l'ensemble de la voilure (Source Wikipédia)

mât fournit l'angle de vent et la vitesse de vent apparent et un GPS permet de déterminer la vitesse du voilier par rapport au sol ainsi que sa position.

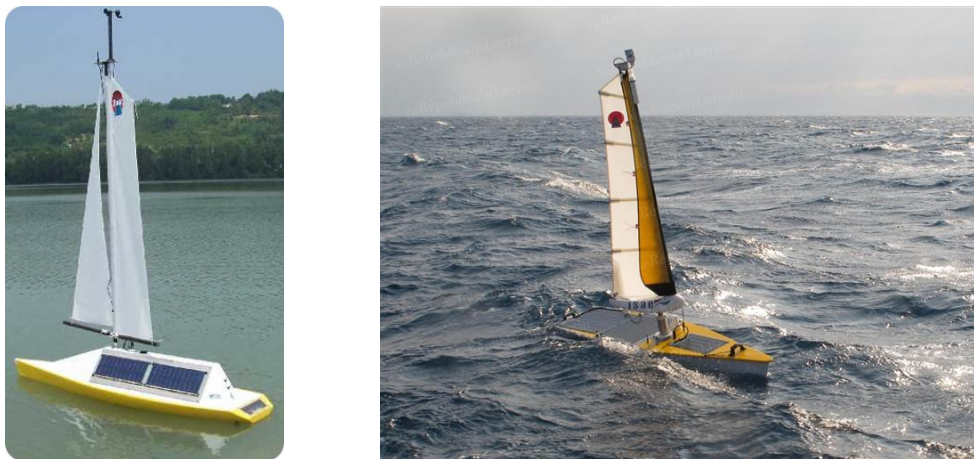


FIGURE 2.30 – IBoat I et IBoat II (ISAE, France)

Y. Brière a proposé et validé expérimentalement sur ce prototype une commande permettant de naviguer vers un objectif avec un vent de face. Cette commande est fondée sur une machine à états finis [60] comportant trois états : un pour la navigation normale (lorsque l'objectif se situe dans une zone atteignable directement), et deux états correspondants respectivement aux manœuvres de tack⁶ et de jib⁷. Le passage de l'état correspondant à une navigation normale à une manœuvre de tack est déclenché lorsque l'angle de vent relatif devient inférieur à 30° (valeur ajustée expérimentalement). Si après 10 s cette manœuvre n'a pas abouti, une manœuvre de jib est alors déclenchée. A chaque état est associé le calcul d'un cap désiré. La position du safran est alors asservie par un correcteur proportionnel sur l'erreur de cap. La voile est asservie de manière à conserver un angle d'attaque constant de 30° sauf pour des angles de vent relatifs faibles où le réglage de voile est constant afin d'économiser l'énergie. Une version étendue de cet algorithme, tenant compte entre autres de la dérive du voilier et basé sur un moteur d'inférence flou a été présentée dans [61].

Y. Brière a également développé et identifié dans [62] un modèle dynamique

6. Tack ou virement de bord : manœuvre consistant à changer de bord (le vent passe alors du côté bâbord au côté tribord ou inversement) permettant de remonter au vent en traversant le lit du vent c'est-à-dire en maintenant la proue (l'avant) du voilier face au vent

7. Jib ou empannage : manœuvre de changement de bord présentant la poupe (c'est-à-dire la partie arrière) du voilier face au vent

plan simplifié à quatre degrés de liberté du voilier.

Enfin, plus récemment, l'auteur s'est également intéressé à la recherche de réglage de voile permettant de réaliser le meilleur compromis entre performances et réduction de la consommation énergétique et a présenté dans [63] un algorithme adaptatif de contrôle de l'angle de voile basé sur une technique de moindres carrés récursifs.

Pour terminer, mentionnons le fait qu'Y Brière est depuis juillet 2011 le détenteur d'un double record du monde avec *IBoatII* (Fig. 2.30), le successeur d'*IBoat* : celui de la plus longue navigation (51 heures) et de la plus grande distance parcourue (109 km) d'un voilier autonome [64].

Université Aberystwyth - M. Neal et C. Sauzé (UK)

Les travaux de M. Neal et de C. Sauzé sont très orientés vers des développements de prototypes expérimentaux. Ils ont ainsi construit et testé quatre autres prototypes en plus du prototype *Aroo* déjà mentionné : *ARC*, *Beagle-B*, *MOOP* et *Pinta*.

Le voilier *ARC* (voir Fig. 2.31 a été construit début 2006 afin de rectifier plusieurs erreurs faites avec *AROO* [65]. Il a participé à la première compétition *Microtransat*. La coque d'*ARC* est de la même longueur que celle d'*Aroo* mais elle est sensiblement plus large. Deux mâts ailes pilotés indépendamment sont utilisés pour la propulsion du voilier, permettant ainsi une redondance en cas de défaillance de l'un des mâts tournants. Il embarque sa propre source d'énergie (batteries 12 V, 2500 mAH, pas de panneau solaire), un ensemble classique de capteurs de navigation (boussole, GPS, anémomètre) et une architecture informatique embarquée fondée sur un microcontrôleur AtMega128 et une carte processeur Gumstix sous Linux. Le contrôleur de navigation embarqué est assez rudimentaire : le safran est piloté par un correcteur proportionnel sur l'erreur de cap, l'angle de voile est réglé par une table de correspondance (*lookup table*) qui lie la direction du vent, par rapport au voilier, à l'angle de voile. Pour atteindre une destination pour laquelle il est nécessaire de remonter au vent, l'algorithme calcule un cap consigne de $+45^\circ$ par rapport la direction du vent et, après un temps prédéterminé, ce cap consigne est changé pour une direction de -45° par rapport au vent. Ces valeurs de $\pm 45^\circ$ ont été déterminées expérimentalement à partir des essais réalisés sur les prototypes [65].

Sur cette plateforme expérimentale *ARC*, M. Neal a également conduit des

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

travaux sur l'exploitation coordonnée des deux mâts ailes indépendants de ARC pour effectuer des asservissements de cap sans utiliser de safran [66].

L'expérience acquise sur *Aroo* et *ARC* a conduit M. Neal et C. Sauzé à intégrer sur leurs autres prototypes une architecture informatique fondée sur des cartes processeurs Gumstix en raison de la flexibilité qu'elles apportent (support des piles protocolaires réseaux, possibilité de threads, environnement de développement standard) et de leur faible consommation [57].

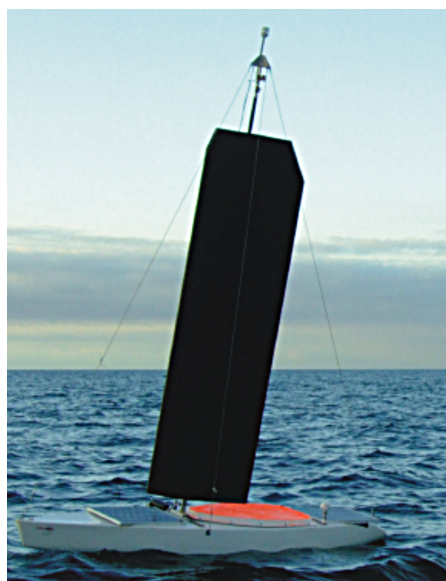


FIGURE 2.31 – ARC et Beagle-B (Université d'Aberystwyth, Pays de Galle, UK)

En reprenant cette architecture informatique et en conservant cette idée d'un mât aile qui avait fait ses preuves en particulier en navigation par vent faible où une voile classique à tendance à *fasseyer*⁸, les auteurs ont fait l'acquisition de *Beagle-B* en 2007, voilier construit par la société Robosoft sur la base d'un coque de Mini-J (3,7 m de long, mât aile en fibre de carbone de 4 m de haut, batteries au plomb rechargeables de 2,5 kWh et deux panneaux solaires capables de fournir une puissance crête de 30 W).

Les réalisations expérimentales de M. Neal et C. Sauzé se sont poursuivies et se sont orientées à partir de 2009 vers la conception de systèmes destinés à des missions de longue durée pour lesquelles la gestion de l'autonomie énergétique est

8. Se dit d'une voile insuffisamment bordée qui se dégonfle en partie ou totalement et qui bat au vent comme un drapeau

une préoccupation majeure. *MOOP* (*Miniature Ocean Observation Platforms*, voir Fig. 2.32), une petite plateforme à mât aile (75 cm de long pour un poids de 4 kg, équipée d'un panneau solaire fournissant une puissance crête de 400 mW, de batteries Nimh de 180 Wh et contrôlée par un microcontrôleur PIC 18f4550) a ainsi été développée afin de disposer d'une plateforme rapidement déployable et disposant d'une marge faible sur le budget énergétique.

Sur cette plateforme, M. Neal et C. Sauzé ont testé des algorithmes de pilotage d'inspiration biologique : un contrôleur neuro-endocrinale. Le principe de ce contrôleur consiste à utiliser un réseau de neurones pour le contrôle bas niveau de la voile et du safran et à moduler les poids du réseau de neurones par une couche de plus haut niveau dont le fonctionnement est basé sur celui des glandes endocrinales sécrétant les hormones. Plusieurs hormones peuvent ainsi être définies telle qu'une hormone, liée à la capacité énergétique, équivalente à l'insuline, qui est libérée lorsque les batteries sont à pleine charge et les panneaux solaires actifs ou "une hormone de danger", équivalente à l'adrénaline, qui est relâchée lorsque un danger est perçu, conduisant à une utilisation forte des actionneurs de manière à exhiber un comportement de fuite devant le danger ou encore une "hormone de mission", qui crée pour le robot un désir de réaliser sa mission ce qui peut supplanter son désir d'économie d'énergie [57]. Ce contrôleur neuro-endocrinale a été testé, en simulation puis expérimentalement avec des résultats plus mitigés pour l'instant [67, 68]. En marge de ces travaux, mais toujours dans l'objectif d'augmenter l'intégrité d'un voilier autonome, ces auteurs ont également travaillé sur des algorithmes d'évitement d'obstacles basés sur une méthode classique de lancé de rayon (ray-tracing) [69].

Enfin, mentionnons que M. Neal et C. Sauzé, avec leur voilier *Pinta* (voir Fig. 2.32), a été la première (et la seule) équipe à prendre le départ du challenge Microtransat 2010 pour traverser l'Atlantique avec un voilier autonome. *Pinta* est basé sur un dériveur du type *Topper Taz* de 2,95 m de long qui embarque une carte processeur gumstix et utilise le même type de capteurs que ceux utilisés dans les autres projets développés par M. Neal. Le contrôle de cap est effectué avec un pilote automatique commercial monté directement sur la barre.

Les batteries sont rechargées par des panneaux solaires de 120 W crête placés sur le pont. Malheureusement, la *Pinta* n'a navigué qu'une cinquantaine d'heures en autonomie complète et a parcouru un peu moins de 90 km sans rejoindre son premier point de passage préprogrammé situé à une trentaine de kilomètres de son point de départ. Le voilier a ensuite dérivé pendant une vingtaine de jours avant de cesser d'émettre après avoir parcouru environ 500 km sur une mer présentant

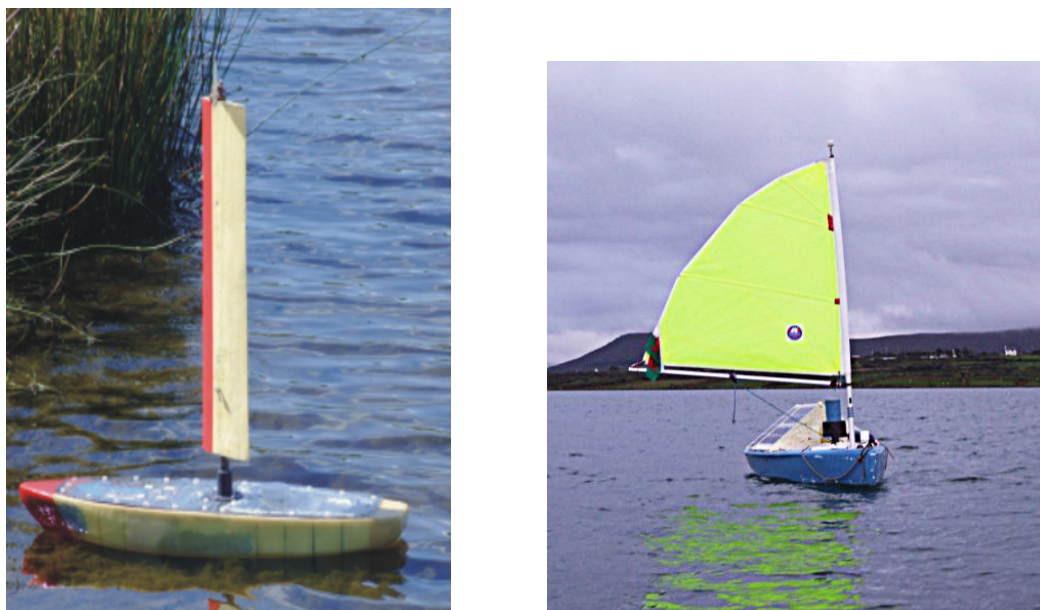


FIGURE 2.32 – MOOP et Pinta (Université d'Aberystwyth, Pays de Galle, UK)

des vagues de près de 3 m.

Innoc - R. Stelzer (Autriche)

R. Stelzer de l'INNOC (*Austrian Society for Innovative Computer Sciences*) a participé dès 2006 au challenge *Microtransat* avec une adaptation d'un voilier télécommandé *Robbe Atlantis* de 1,4 m.

Depuis 2007, R. Stelzer et son équipe sont présents lors des challenges *Microtransat* et *WRSC* avec *RoBoat* (Fig. 2.33), un voilier de 3,75 m de long, une voile de 4,5 m² pour un poids de 300 kg dont 60 kg de lest placé dans la quille. Ce voilier est basé sur un modèle *Laerling*, très utilisé dans les écoles de voile en raison de ses qualités de stabilité. Il est également équipé de panneaux solaires délivrant une puissance crête de 250 W pour le rechargement de ses batteries et embarque un ensemble de capteurs de navigation (GPS, compas, anémomètre,...) sur un bus de communication NMEA-2000.

Dans [1], R. Stelzer présente l'architecture logicielle implémentée dans le calculateur embarqué de *RoBoat*. Cette architecture est fondée sur un modèle à quatre couches communicantes (Fig. 2.34, d'après [1]) :



FIGURE 2.33 – RoBoat (INNOC, Autriche)

- une couche est chargée de la navigation à long terme (interface avec l'utilisateur pour la définition des *waypoints* ou avec un programme de routage commercial tenant compte de prévisions météorologiques à l'échelle de quelques jours),
- une couche de routage local est consacrée à la navigation réactive : calcul du cap désiré, tenant compte des conditions instantanées du vent, de la dérive, des obstacles,...
- une couche d'exécution principalement chargée de l'asservissement bas niveau du safran ainsi que de contrôler l'exécution des manœuvres de Tack ou de Jib.
- une couche réflexe préemptive qui permet de court-circuiter les commandes issues des couches précédentes en cas de risque de chavirement dû à une rafale de vent par exemple.

Une couche appelée "Abstracteur" réalise l'interface de chacune de ces couches avec le monde extérieur : opérateur humain de supervision, capteurs et actionneurs.

Dans [70], R. Stelzer présente une méthode de navigation réactive, permettant de calculer un cap à suivre en fonction des coordonnées de l'objectif et des conditions instantanées de vent. Cette méthode détermine le cap qui maximise la

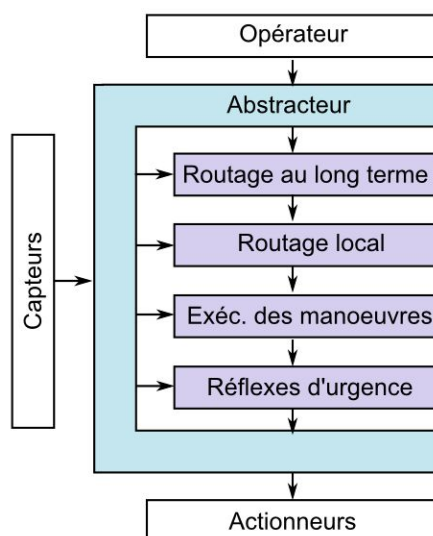


FIGURE 2.34 – Architecture logicielle à quatre couches pour le contrôle du voilier RoBoat [1]

projection du vecteur vitesse du bateau sur le vecteur directeur pointant vers l'objectif, privilégiant ainsi la minimisation du temps requis pour atteindre le *waypoint*. Un mécanisme de pénalisation, favorisant le cap courant, permet de contrôler le nombre de manœuvres de virement de bord lorsque le voilier remonte au vent. L'efficacité de cette planification de mouvements est analysée d'abord en simulation, en comparant les résultats obtenus en utilisant la polaire de vitesse réelle du voilier (voir définition dans la section 3.5.3 page 66) et une polaire simplifiée. L'implémentation de cet algorithme de routage local sur le prototype de voilier a également été réalisée et les routes de navigation sont conformes à celles obtenues en simulations.

Un système d'inférence floue de type Mandani a été présenté dans [71] pour commander, de façon découplée, le réglage de la voile et la sélection du cap. Le système assure l'asservissement de cap du bateau et le réglage efficace de la voile par rapport au vent apparent. Ce système flou a comme paramètres d'entrée la direction du vent relatif, le cap et la gîte⁹ du voilier ainsi que la direction de navigation désirée.

L'algorithme de navigation proposé dans [70] a par ailleurs été étendu plus récemment dans [72] pour éviter de obstacles, en déformant la polaire du voilier en fonction des obstacles perçus.

9. Gîte : inclinaison d'un voilier autour de son axe longitudinal

D'autres contributions de l'équipe d'INNOC autour de R. Stelzer ont également été publiées telles que la proposition d'une architecture de communication fiable entre un voilier autonome et une centre de supervision déporté [73] ou l'application de voiliers autonomes pour la surveillance et l'observation des cétacés [74].

FEU Porto - J. Alves et N. Cruz (Portugal)

Le projet *FASt* (FEUP Autonomous Sailboat) de la FEUP (*Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*) a débuté en 2007 afin de participer à la WRSC 2008 (fig. 2.35).



FIGURE 2.35 – Voilier autonome FAST (Université de Porto, Portugal)

Le voilier de la FEUP mesure 2,5 m de long, 50 kg de déplacement. Il est doté d'une voile conventionnelle de $3,7 m^2$ montée sur une bôme¹⁰ et d'un mât de 3,5 m. La coque et la quille sont réalisées à partir de matériaux composites. Il embarque une carte processeur à base de FPGA, différents capteurs (girouette, anémomètre, capteur de position de bôme, boussole numérique, GPS, inclinomètre) et moyens de communication (lien WiFi, modem GSM et modem Iridium). Trois actionneurs sont utilisés sur le voilier : deux servomoteurs permettent un contrôle indépendant des deux safrans et un moteur à courant continu est utilisé pour le contrôle des deux voiles.

A l'heure actuelle, les publications existantes se concentrent sur une description du voilier et de son électronique embarquée [75], sur le type d'applications envisageables [76] ou sur l'identification d'un modèle de comportement du voilier en virage pour le contrôle de cap [77].

10. La bôme est une pièce de bois ou de métal horizontale maintenant la bordure inférieure de la voile. La bôme est reliée au mât par une articulation nommée vit-de-mullet

ENSTA Brest - L. Jaulin (France)

La première participation de L. Jaulin à la WRSC remonte à 2009 avec *Breizh Spirit*, un voilier de 1,3 m de long pour 12 kg de déplacement. La coque reproduit à échelle réduite celle d'un voilier de classe IMOCA et est réalisé en fibre de verre (Fig. 2.36). De manière à augmenter la stabilité du voilier, le mat a été raccourci et la forme de la grand-voile été modifiée afin d'abaisser le centre d'application des efforts aérodynamiques. Deux safrans ont été montés sur le voilier afin de conserver une bonne manœuvrabilité même lorsque le voilier gîte de manière importante. Il embarque des capteurs de navigation classiques (GPS, anémomètre ultrasonique, compas magnétique), un lien de communication HF ainsi qu'un microcontrôleur PIC18F2550. L'énergie est fournie par une batterie Lithium-Polymère pour modèle radio-commandé [78]. *Breizh Spirit* a traversé avec succès la rade de Brest en septembre 2009 (12 km en deux heures).



FIGURE 2.36 – Breizh Spirit et Breizh Spirit-DCNS (ENSTA Brest, France)

L. Jaulin a proposé dans [79] un algorithme de contrôle d'un voilier basé sur une linéarisation par retour d'état ainsi que sur un automate à état discret pour la détermination de l'angle de voile et du cap consigne. Cet algorithme a été testé en simulation en utilisant un modèle dynamique d'un voilier également décrit dans [79].

L. Jaulin a également appliqué les techniques d'analyse par intervalles et d'inversion, couplées à une linéarisation par retour d'état, pour le contrôle simultané

de la vitesse et du cap d'un voilier [80].

Pour augmenter la robustesse du pilotage d'un voilier en particulier lors de la défaillance de capteurs sensibles tels que les girouettes-anémomètres, L. Jaulin a développé dans [81] un observateur d'état basé sur des techniques d'inversion par intervalles permettant de reconstruire les données de vent à partir de l'état observé du voilier (GPS et centrale inertielle). Toujours pour pallier à la défaillance d'un capteur de vent, L. Jaulin a présenté dans [82] un algorithme de navigation indépendant des mesures de vent. Pour cela, une décomposition de l'espace selon un diagramme de Voronoï est réalisée hors ligne. A chaque centre d'une cellule de Voronoï sont associées deux directions (caps) séparées d'un écart angulaire supérieur à deux fois l'angle limite de remontée au vent. Cet algorithme a été testé avec succès sur le voilier autonome *Breizh Spirit*.

Notons enfin, que Breizh Spirit-DCNS (Fig. 2.36), une version plus robuste de Breizh Spirit et équipée de panneaux solaires, a participé à la course transatlantique en septembre 2011 : il a parcouru 53 miles nautiques (98 km) en 38 heures par un vent de force 7-8 (30-35 noeuds) avant de présenter plusieurs défaillances matérielles l'ont empêché de terminer la course .

ETH Zürich - C. Pradalier (Suisse)

Le projet *Avalon* (Fig. 2.37) a débuté en 2008 afin de participer à la WRSC 2009 et, à plus long terme, à la course transatlantique de voiliers autonomes. Le voilier (coque et mât) a été entièrement dessiné et construit par les étudiants de l'ETH Zürich. La coque de 3,9 m a été réalisée en fibre de verre et résine époxy et deux safrans obliques, commandés indépendamment, permettent de contrôler le cap même en cas de gite importante du voilier. Une quille profonde terminée par un lest de 160 kg assure un couple de redressement suffisant même dans des conditions de mer sévères. La masse totale du voilier *Avalon* est de l'ordre de 450 kg. La voilure est conçue autour d'un mât tournant équilibré (c'est-à-dire tel que le centre de pression du vent sur la voile soit sur l'axe de rotation du mât). Le mât, d'une hauteur de 5,7 m, est réalisé en fibre de carbone et soutient une voile de 8,4 m². Il est commandé par un moteur à courant continu de 200 W à travers un réducteur. La commande directe de l'angle de voile par rotation du mât présente l'avantage d'éliminer les passages de filins et d'écoutes ce qui permet d'augmenter la fiabilité du fonctionnement du voilier. L'énergie est fournie par quatre batteries pour une capacité totale de 2,4 kWh rechargeables par 2 m² de panneaux solaires capables de délivrer une puissance crête de 360 W. Le voilier embarque des capteurs de navigation classiques (centrale inertielle et GPS X-Sens MTI-G, capteur

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

de vent ultrasonique) ainsi qu'un récepteur AIS¹¹ et un PC durci sous Linux pour la gestion de l'ensemble des capteurs et les algorithmes de commande [83].



FIGURE 2.37 – Avalon, U. de Zurich

Le système de commande implémenté sur le voilier *Avalon*, et décrit dans [84], est constitué principalement de deux étages : un premier étage de planification locale est basée sur une machine à état déterminant si l'objectif est directement atteignable ou non et fournissant à l'étage bas niveau la consigne de cap correspondante.

Un étage bas-niveau est chargé des asservissements de voile et de safran. La voile est asservie de sorte à maintenir un angle d'attaque (angle formé par la bôme et la direction du vent) optimal. La valeur de cet angle d'attaque optimal a été identifiée expérimentalement et, par mesure de sécurité, dépend également de la vitesse du vent : plus le vent est fort, plus cet angle d'incidence diminue de manière à limiter la gîte et les risques de chavirement.

La commande de safran est basé sur un correcteur PID sur l'erreur entre le cap consigne et le cap mesuré. Le cap consigne est calculé à partir du cap de navigation,

11. AIS : Automatic Identification System (AIS) système de transmission automatisé de messages entre navires par radio VHF qui permet de connaître l'identité, le statut, la position et la route des navires se situant dans la zone de navigation (Source Wikipédia).

fourni par l'étage de navigation locale, augmenté d'une composante permettant de compenser la dérive.

Un troisième étage, également décrit dans [84], n'a pas encore été implémenté. Il est chargé de la navigation à long terme en effectuant une planification globale fondée sur les prédictions météorologiques mais également sur une quantification du coût énergétique des manœuvres de virement de bord ou d'empannage. Cette planification globale est fondée sur un algorithme A^* .

2.4 Conclusion

Au cours de cette revue bibliographique, nous avons vu que les principaux projets ou réalisations de véhicules autonomes de surface portaient sur des véhicules de taille réduite, inférieure à 10 m et le plus souvent inférieure à environ 4 m. Ces différents véhicules autonomes de surface peuvent être décomposés en trois grandes classe de systèmes.

Les semi-submersibles d'une part, présentent l'avantage d'avoir une grande stabilité due à leur faible surface exposée. Cette caractéristique, qui les rend virtuellement indétectables, permet aussi d'envisager leur utilisation pour des applications militaires.

Les véhicules de surface motorisés d'autre part ont, comme les précédents, l'avantage d'être facilement pilotés (en vitesse et en direction), ce pilotage étant relativement indépendant des caractéristiques de l'environnement (vent, courant). Leur faiblesse, comme pour les semi-submersibles, réside principalement dans leur faible autonomie qui est généralement de l'ordre de 4 à 5 heures.

Enfin, les voiliers présentent l'avantage d'une autonomie énergétique potentiellement plus élevée que celle des véhicules à moteur. Sa capacité à se déplacer silencieusement peut également être un atout pour des applications militaires de surveillance ainsi que pour l'étude de la faune marine. Le pilotage de ces navires est par contre singulièrement plus compliquée du fait que leur capacité de déplacement dépend fondamentalement des conditions de vent et de mer. Le choix d'un voilier, du fait de sa grande autonomie énergétique potentielle, est donc parfaitement adapté pour les objectifs à long terme du projet *ASAROME* qui vise au développement de navires autonomes capables de réaliser des missions de longue durée de mesures et d'observations en milieu marin.

CHAPITRE 2. ÉTAT DE L'ART

Concernant la structure de ces navires, le monocoque et le catamaran sont les deux types de configuration les plus couramment décrites dans les publications. Les multicoques, ont l'avantage d'avoir une plateforme qui gîte moins et qui facilite l'accès aux compartiments des ordinateurs et capteurs embarqués. Cependant, en cas de chavirement, leur grande stabilité empêche toute possibilité de recouvrement. Au contraire des multicoques, les monocoques ont une capacité de charge utile plus réduite mais, s'ils sont bien équilibrés, leur configuration est auto-redressante en leur donnant une seule position stable. Cette dernière propriété a conduit au choix d'un monocoque de type Mini-J comme plateforme expérimentale du projet *ASAROME*.

Enfin, on peut constater une croissance très forte du nombre de réalisations d'ASV et de publications s'y rapportant depuis une demi-douzaine d'années. Cette augmentation est particulièrement évidente sur l'histogramme de la figure 2.38, réalisé à partir des citations de ce chapitre. A noter que la diminution que l'on peut constater sur ce graphique du nombre de publications sur les ASV à moteurs (chiffres qui incluent également les semi-submersibles dans ce cas) lors des quatre dernières années, n'est qu'apparente. En effet, pour les ASV à moteurs, nous nous sommes attachés à référencer les principales réalisations, sans chercher à être exhaustifs. Une recherche sur le site de référencement IEEE sur les années 2010 et 2011 avec les mots clés "*Autonomous Surface*" fournit près de cinquante références ayant trait à l'usage d'engins de surface à moteurs.

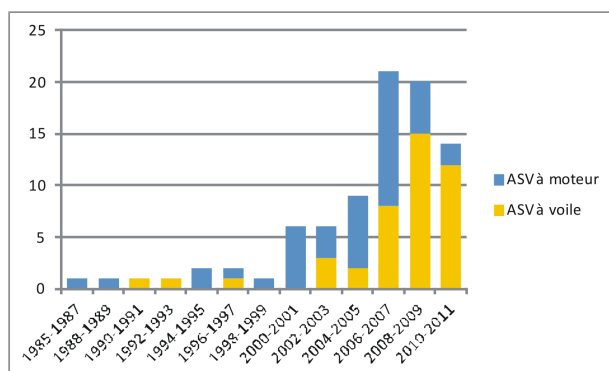


FIGURE 2.38 – Évolution du nombre de publications en lien avec des véhicules de surface autonomes

Une des raisons de cette augmentation est la nécessité de mieux comprendre la physique des océans et de leurs échanges avec l'atmosphère qui jouent un rôle central sur le climat ainsi que l'étude des écosystèmes marins. A titre d'illustration, il est intéressant de constater qu'un certain nombre de réalisations récentes

ont été développées directement par des océanographes ou plus généralement par des chercheurs en sciences de l'environnement afin de pouvoir disposer de moyens de déploiement adaptés de leurs instruments de mesure in-situ.

Des ASV motorisés ont ainsi été développés et exploités dans un contexte opérationnel afin par exemple d'effectuer des mesures de turbidité, de recueillir des données météorologiques et de réaliser des mesures par fluorescence (en particulier pour déterminer la concentration en chlorophylle-A) [85], pour évaluer la prolifération d'algues vertes par mesure conjointe de température, salinité et concentration en oxygène dissout [86], pour analyser la concentration en larves de poissons et en phytoplancton, mesurer par spectrométrie de masse la concentration en gaz dissout et en composants organiques volatils pouvant être liés à des polluants [87], analyser la couche de surface de l'océan pour la recherche de polluants en Antarctique [29] ou pour aider aux opérations de recherches après des catastrophes naturelles telles que le passage de l'ouragan Wilma [88].

Quelques applications de voiliers robotisés en tant que vecteurs de déploiement d'instruments scientifiques ont également été reportées telles que la mesure de la variation de température pour évaluer les rejets à proximité de centrales de production d'électricité [89], ou pour évaluer l'homogénéité (température, salinité, concentration en chlorophylle-A, nutriments et oxygène dissout) de la couche de mélange (couche située jusqu'à 1 ou 2 mètres de la surface) [90].

3

Modèles et simulateur numérique

La modélisation fine de la dynamique d'un bateau est une tâche ardue du fait des interactions fluide-solide sur ce dernier. Le fait qu'un bateau évolue principalement dans un fluide nécessite formellement l'utilisation des équations de Navier-Stokes pour lesquelles il n'existe pas de solution analytique générale. La résolution de ces équations est possible numériquement mais au prix d'une charge de calcul importante. Ces travaux, issus des hydrodynamiciens, trouvent leurs applications par exemple pour le dimensionnement des coques par analyse des champs de pression [91].

A l'opposé de ces techniques de modélisation, on trouve des travaux généralement développés par des ingénieurs navals ou des automaticiens, qui visent à modéliser le comportement global de bateaux à moteur en s'intéressant aux effets produits par les efforts hydrodynamiques sur un bateau [92], afin par exemple d'analyser leur manœuvrabilité ou leur stabilité, ou en vue de leur commande. La plupart de ces méthodes, développées pour des navires de ligne, ont un champ d'application restreint et supposent souvent que la force de propulsion du navire reste constante et que les efforts aérodynamiques sur les parties émergées soient négligeables.

Dans le cadre de la navigation à voile, ces hypothèses ne sont évidemment plus valides. Pour les voiliers, on trouve une littérature assez importante qui traite de la caractérisation et de la comparaison des performances des coques pour, par exemple, analyser l'influence des paramètres géométriques des carènes sur les performances de vitesse [93] [94]. Dans ces travaux, l'effet des voiles n'est pas inclus. Comme il a été vu dans le chapitre 2, un certain nombre d'auteurs ont également proposé des modèles analytiques de comportement pour le pilotage de voiliers [47, 53, 62, 77, 79].

A une position intermédiaire entre les modèles fins des hydrodynamiciens (forcément lourds en temps de calcul) et les modèles analytiques simplifiés de com-

portement (forcément réducteurs), certains auteurs ont proposé des modèles numériques que l'on peut qualifier d'hybrides, basés d'une part sur un modèle exact de la dynamique des corps solides en mouvement et d'autre part sur l'utilisation de lois empiriques pour déterminer les efforts aéro et hydrodynamiques. Cette estimation des efforts liés aux déplacements dans un fluide est généralement sous la forme de données tabulées ou de fonctions polynomiales d'interpolation valables dans certaines gammes dépendant des intensités des efforts et de la géométrie des carènes. Une telle approche permet de réaliser des simulateurs numériques à la fois légers en termes de temps de calcul (qui correspond à peu près à la résolution du modèle dynamique de la partie rigide) tout en restant assez fidèle à la réalité, tout au moins dans la plage de validité des lois empiriques utilisées [95, 96, 97]. C'est ce type d'approche qui est utilisée par l'équipe hydrodynamique et génie océanique de l'Ecole centrale de Nantes (ECN), partenaire du projet *ASAROME*, pour le développement d'un simulateur numérique de voilier.

Dans ce chapitre, nous précisons tout d'abord le système de repères utilisés pour obtenir le modèle cinématique d'un voilier ainsi que le repérage des différents angles utilisés dans ce mémoire. Puis, nous présenterons la méthode utilisée par le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'ECN pour élaborer un simulateur numérique du voilier autonome développé dans le cadre du projet *ASAROME*.

La dernière partie de ce chapitre est consacrée à la présentation du travail que nous avons réalisé pour exploiter ce simulateur afin d'extraire les informations utiles aux algorithmes de navigation telles que le comportement en virage, le rayon tactique ou les courbes polaires de vitesse et de gîte. Ce simulateur prenant la forme d'un code de calcul, nous avons également développé une interface graphique pour faciliter son utilisation. Ce simulateur a également été utilisé dans les chapitres 5 et 6 afin de valider et comparer les méthodes de navigation développées.

3.1 Référentiels et cinématique

Pour analyser le mouvement d'un voilier, nous devons définir deux repères. Les axes de ces deux repères sont définis en respectant les conventions utilisées dans le milieu nautique. Le premier, R_0 , est le repère lié à la terre. L'origine de R_0 est confondue avec celle du repère R_B avec l'axe X_0 pointant vers le nord (N) et l'axe Y_0 vers l'ouest (O). Ainsi la position du voilier sera transposable aisément sur une carte marine. Le second repère, R_B , est un repère lié au voilier. Ce dernier est utilisé pour la résolution du principe fondamental de la dynamique appliqué au voilier. Le repère R_B a pour origine le centre de masse (barycentre) du voilier et ses axes sont définis tels que l'axe X_B positif soit dirigé vers l'avant, l'axe Y_b vers

3.1. RÉFÉRENTIELS ET CINÉMATIQUE

le côté gauche, et par conséquent, l'axe Z_B vers le haut.

Les axes de la voile et du safran sont situés sur l'axe longitudinal X_B du bateau. Les angles de safran et de voile sont mesurés dans le sens trigonométrique. Leurs valeurs possibles appartiennent à l'intervalle $[-90^\circ + 90^\circ]$ (Fig. 3.1(b)).

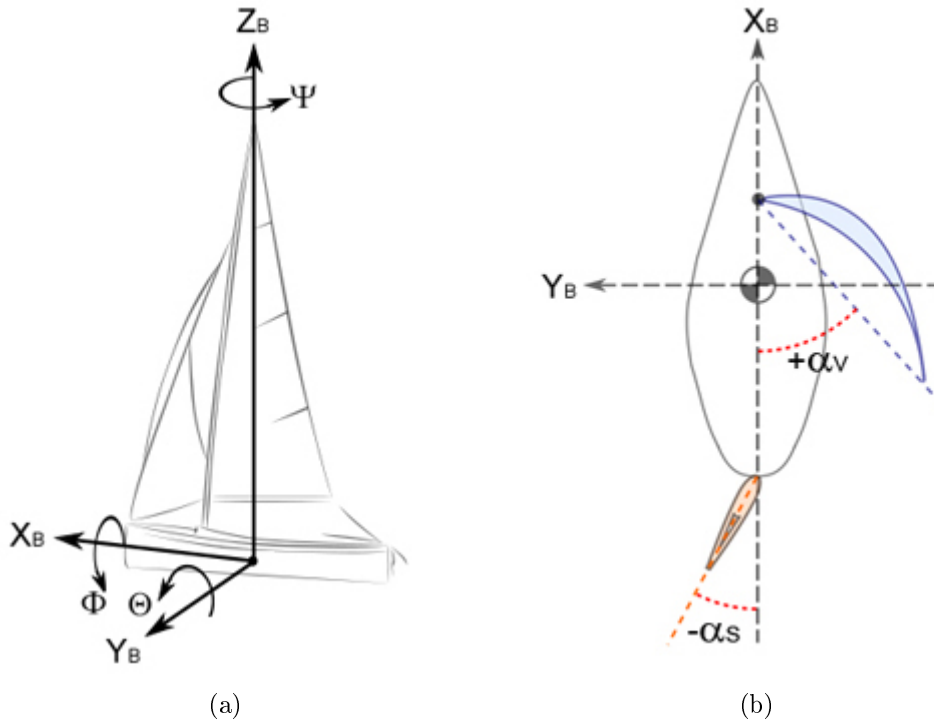


FIGURE 3.1 – (a) Repère R_B lié au voilier et (b) définition des angles de voile et de safran

Les angles d'Euler ψ pour le lacet, θ pour l'assiette (tangage) et ϕ pour la gîte (roulis) (Fig. 3.1(a)) [92] sont utilisés pour décomposer le vecteur vitesse instantané du voilier dans le repère R_B .

La transformation de R_0 à R_B est réalisée par les trois rotations élémentaires suivantes :

Rotation ψ autour de l'axe $\vec{k}_{R_0} \Rightarrow R_1$

$$(X_1, Y_1, Z_1)^t = P_\psi (X_0, Y_0, Z_0)^t = \begin{bmatrix} c\psi & s\psi & 0 \\ -s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (X_0, Y_0, Z_0)^t \quad (3.1)$$

Rotation θ autour de l'axe $\vec{j}_{R1} \Rightarrow R_2$

$$(X_2, Y_2, Z_2)^t = P_\theta (X_1, Y_1, Z_1)^t = \begin{bmatrix} c\theta & 0 & -s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ s\theta & 0 & c\theta \end{bmatrix} (X_1, Y_1, Z_1)^t \quad (3.2)$$

Rotation ϕ autour de l'axe $\vec{i}_{R2} \Rightarrow R_B$

$$(X_B, Y_B, Z_B)^t = P_\phi (X_2, Y_2, Z_2)^t = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi \end{bmatrix} (X_2, Y_2, Z_2)^t \quad (3.3)$$

La matrice de passage $M_{R_0 \rightarrow R_B}$ de R_0 à R_B est décrite en (3.4) et la transformation entre R_B et R_0 en (3.5).

$$M_{R_0 \rightarrow R_B} = P_\phi P_\theta P_\psi = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & s\psi c\theta & -s\theta \\ -s\psi c\phi + c\psi s\theta s\phi & c\psi c\phi + s\phi s\theta s\psi & c\theta s\phi \\ s\psi s\phi + c\psi c\phi s\theta & -c\psi s\phi + s\psi c\phi s\theta & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$M_{R_B \rightarrow R_0} = M_{R_0 \rightarrow R_B}^t \quad (3.5)$$

Finalement, la vitesse angulaire $\vec{\omega}$ du repère R_B par rapport à R_0 exprimée dans le repère R_B est donnée par (3.6).

$$\vec{\omega} = \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -s\theta \\ 0 & c\phi & c\theta s\phi \\ 0 & -s\phi & c\phi c\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = T^{-1} \cdot \vec{\Omega} \quad (3.6)$$

et la relation d'inversion par :

$$\vec{\Omega} = \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = T \cdot \vec{\omega} \quad (3.7)$$

La relation cinématique sur les six degrés de liberté s'écrit finalement comme :

$$\begin{bmatrix} \vec{V}_b \\ \vec{\Omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{R_B \rightarrow R_0} & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \vec{V}_{R_B} \\ \vec{\omega} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

où \vec{V}_b (respectivement \vec{V}_{R_B}) représente le vecteur vitesse linéaire dans un repère fixe dont l'origine est choisie en un point quelconque de la surface terrestre (respectivement R_B).

Les deux repères introduits précédemment permettent également de définir les angles de cap, de route et de dérive qui seront utilisés couramment dans les chapitres suivants (voir Fig. 3.2 pour la représentation de ces angles) :

- Le cap est l'angle entre l'axe x du repère R_0 (Nord) et l'axe x du repère R_B (axe longitudinal du bateau).
- L'angle de route est l'angle entre l'axe x du repère R_0 (Nord) et le vecteur vitesse \vec{V}_b du bateau.
- L'angle de dérive est l'angle entre l'axe x du repère R_B et le vecteur vitesse linéaire du bateau.

3.2 Modèle aérodynamique

Le modèle doit évidemment tenir compte des efforts aérodynamiques produits par l'écoulement de l'air le long de la voilure. La difficulté dans l'élaboration de ce modèle est qu'il n'est pas aisé de se baser sur des simulations numériques car il n'existe que peu d'études et de recherches donnant des résultats numériques sur l'écoulement autour d'une structure souple pouvant subir de grandes déformations. Les problèmes rencontrés dans ce type d'analyse sont les grandes déformations de la voile, le phénomène de recollement constaté lors de l'écoulement et enfin l'aspect fortement turbulent. Pour ces différentes raisons, un modèle simplifié basé sur l'hypothèse d'une voile rigide a été adopté pour le calcul des efforts s'appliquant sur la voile.

3.2.1 Le vent

Nous supposons que les caractéristiques du vent sont connues à l'instant courant et considérons la projection TW dans le plan $(X_0 Y_0)$ du vent. Ce vent, dit vent réel, TW (de l'anglais *True Wind*), est caractérisé par son angle TWA (de

l'anglais "*True Wind Angle*") mesuré à partir du Nord, positif dans le sens Nord-Ouest et par sa vitesse TWS (de l'anglais "*True Wind Speed*"). Cette vitesse est usuellement exprimée en m/s ou en Nœuds et correspond à l'amplitude du vecteur vitesse du vent.

Aucune hypothèse particulière n'est faite concernant l'instationnarité : ce vecteur peut évoluer dans le temps et dans l'espace.

Le vent apparent est le vent réellement subi par un observateur placé sur le voilier. C'est donc le vent apparent qui agit physiquement sur la voilure. Par voie de conséquence, les réglages de la voilure doivent être effectués en fonction de ce vent et non du vent réel.

D'un point de vue vectoriel, le vent apparent (\overrightarrow{AW}) est égal à la différence entre le vecteur du vent réel (\overrightarrow{TW}) et le vecteur vitesse du vaisseau ($\overrightarrow{V_B}$) (Fig. 3.2).

$$\overrightarrow{AW} = \overrightarrow{TW} - \overrightarrow{V_B} \quad (3.9)$$

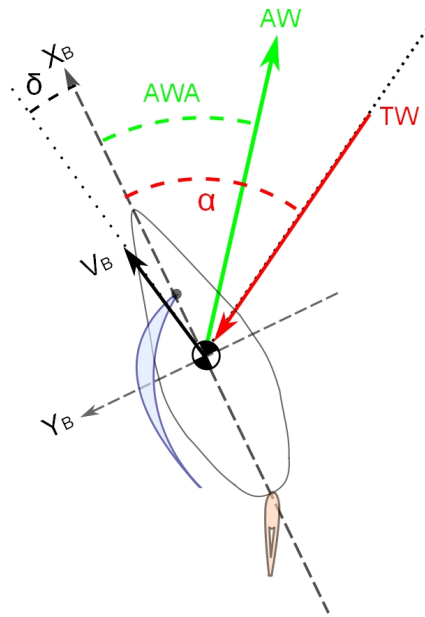


FIGURE 3.2 – Vent apparent, cap et route

Son intensité AWS (de l'anglais "*Apparent Wind Speed*") et sa direction AWA (de l'anglais "*Apparent Wind Angle*") par rapport à l'axe longitudinal X_B du voilier, s'obtiennent à partir de considérations trigonométriques simples sur le triangle

$(\overrightarrow{TW}, \overrightarrow{V_B}, \overrightarrow{AW})$. Ces relations sont données par les équations 3.10 et 3.11 où δ représente l'angle de dérive.

$$AWS = \sqrt{TW S^2 + V_B^2 + 2 \cdot V_B \cdot TWS \cdot \cos(\alpha)} \quad (3.10)$$

$$AWA = \arccos\left(\frac{V_B + TWS \cdot \cos(\alpha)}{AWS}\right) - \delta \quad (3.11)$$

3.2.2 La voile

La force aérodynamique s'appliquant sur la voile dépend de la vitesse de l'écoulement d'air et de sa direction par rapport à la voile, c'est-à-dire du vent apparent, caractérisé par son intensité AWS , sa direction AWA et de l'angle d'incidence γ (Fig. 3.3).

$$\overrightarrow{F_A} = f(AWA, AWS, \gamma) \quad (3.12)$$

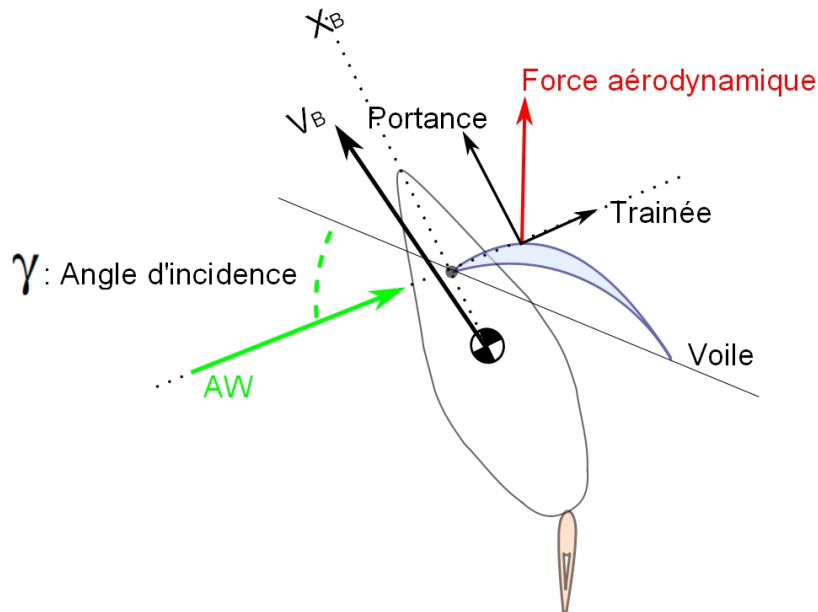


FIGURE 3.3 – Force aérodynamique s'exerçant sur la voile

La force aérodynamique s'exerçant sur la voile peut être décomposée en deux parties : d'une part l'effort de traînée ($F_D^{(v)}$) et d'autre part la portance ($F_L^{(v)}$). L'effort de traînée a la même direction que le vent apparent, tandis que l'effort

de portance est perpendiculaire à l'effort de traînée (Fig. 3.3) [98]. Leurs amplitudes sont proportionnelles respectivement aux coefficients de traînée $C_D^{(v)}$ et de portance $C_L^{(v)}$. Dans ces expressions, l'exposant (v) fait référence au vent, l'indice D à la traînée (*Drag* en Anglais) et l'indice L à la portance (*Lift* en Anglais).

Les coefficients de traînée, $C_D^{(v)}$, et de portance, $C_L^{(v)}$, sont des nombres sans dimension dépendant de la forme de l'élément mobile. Leur valeur dépend de l'angle de vent apparent (voir un exemple figure 3.4. Sur cette figure β_{eff} représente l'angle d'incidence par rapport au vent apparent). Ils permettent de quantifier les forces de résistance de la voile lorsqu'elle se déplace dans l'air et les efforts de portance.

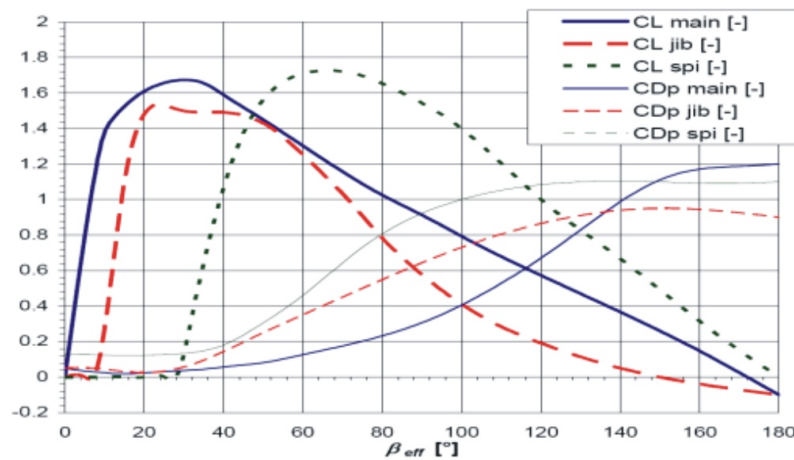


FIGURE 3.4 – Exemple de coefficients de portance et de traînée pour une voile (d'après [2])

Ces efforts peuvent être calculés dans le repère voile en utilisant les équations 3.13 et 3.14 où $\rho^{(v)}$ est la densité de l'air, $S^{(v)}$ la surface de la voile et $V^{(v)}$ la vitesse moyenne de l'écoulement d'air dans un repère lié à la voile. L'application de ces efforts est supposée s'effectuer au niveau du centre du plan moyen de la voile.

$$F_D^{(v)} = \frac{1}{2} \rho^{(v)} S^{(v)} V^{(v)2} C_D^{(v)} \quad (3.13)$$

$$F_L^{(v)} = \frac{1}{2} \rho^{(v)} S^{(v)} V^{(v)2} C_L^{(v)} \quad (3.14)$$

3.3 Modèle hydrodynamique

Un bateau en déplacement génère une force dans la direction contraire à son mouvement; cette force est plus souvent appelée la résistance. Elle résulte d'un

certain nombre de phénomènes physiques, qui tous varient avec la vitesse, mais de différentes façons. Ces phénomènes sont influencés entre autres par la taille et la forme de la coque. La résistance due au frottement, $R_{Friction}$, est produite par la viscosité du liquide et la vitesse du bateau. De plus, elle est directement liée à la surface mouillée du bateau, c'est-à-dire à la partie immergée de la coque.

La courbure de la coque produit un changement de pression le long du bateau. En raison de la viscosité, ce changement de pression cause la séparation de flux au niveau de la surface ce qui produit des vortex où l'énergie du déplacement est dissipée en donnant une résistance à l'avancement appelée *eddy-making resistance*. À basse vitesse, telle que celles du voilier *Asarome* de l'ordre d'une dizaine de nœuds, il n'y a aucune production de vague significative, donc la résistance due aux vortex peut être négligée [99].

Quand un bateau se déplace, les forces qui sont produites ne sont pas que le résultat de la viscosité ; elles sont aussi issues des vagues superficielles créées par les variations de pression autour du navire. La forme de la surface du fluide affecte aussi le flux autour de la coque, ainsi que la surface mouillée réelle en donnant la force de formation des vagues (*Wavemaking*) ou résistance résiduaire, $R_{Residuary}$. Pour le simulateur numérique, cette résistance est calculée à partir du modèle de Gerritsma [93]. Ce modèle est précis pour calculer la résistance résiduaire, sauf pour des vagues courtes aux vitesses élevées où la résistance induite est sous-estimée à cause de la diffraction des vagues. Ces auteurs ([93], [100]) ont également montré que, même si l'effort de formation des vagues et la résistance visqueuse ne sont pas entièrement indépendants, ces deux phénomènes peuvent être traités séparément.

La résistance au mouvement et la pression du vent dans les voiles font que le voilier s'incline latéralement, formant un angle de gîte. Ces forces induisent aussi que l'angle entre l'axe longitudinal du bateau et la direction d'avance, c'est-à-dire la route, diffère de zéro, donnant comme résultat un angle de dérive (cf Fig. 3.2). Cette gîte et cette dérive produisent des résistances de gîte et de dérive dues à la modification, par rapport à la direction de l'écoulement, de la forme de la partie immergée de la coque.

L'évaluation de l'effort hydrodynamique total se décompose selon l'équation 3.15 où $R_{Friction} + R_{Residuary}$ est la résistance de la coque évaluée sans dérive ni gîte, R_{Leeway} est la résistance induite par la dérive et R_{Heel} est la résistance induite par la gîte [2].

$$R_{Hydro} = R_{Friction} + R_{Residuary} + R_{Leeway} + R_{Heel} \quad (3.15)$$

La résistance induite par le frottement, $R_{Friction}$ est calculée en utilisant la formule *ITTC 57* (eq. 3.16) qui précise la valeur de cette résistance en fonction du coefficient de frottement de la coque (eq. 3.17), du nombre de Reynolds (eq. 3.18) et de la surface mouillée S_W [101].

$$R_{Friction} = \frac{1}{2} \rho S_W V^2 C_F \quad (3.16)$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log_{10} R_n - 2)^2} \quad (3.17)$$

$$R_n = \frac{\rho V L_{WL}}{\mu} \quad (3.18)$$

La résistance résiduaire, $R_{Residuary}$, est calculée à partir de l'équation polynomiale de Gerritsma (eq. 3.19), où les coefficients $a_0 \dots a_9$ sont donnés en fonction du nombre de Froude (Fn) dans l'intervalle $0,125 < Fn < 0,450$ (voir Annexe A.1 et A.2 pour une définition de ces grandeurs). Les valeurs des coefficients de la forme polynomiale de Gerritsma données en annexe sont extraites de [102]).

$$\begin{aligned} \frac{R_{Residuary}}{\Delta_c} = & a_0 + a_1 \cdot C_P + a_2 \cdot LCB + a_3 \cdot \frac{B_{WL}}{T_C} + a_4 \cdot \frac{L - WL}{Vol^{\frac{1}{3}}} + \\ & a_5 \cdot C_P^2 + a_6 \cdot C_P \cdot \frac{L_{WL}}{Vol^{\frac{1}{3}}} + a_7 \cdot LCB^2 + a_8 \cdot \left(\frac{L_{WL}}{Vol^{\frac{1}{3}}} \right)^2 + \\ & a_9 \cdot \left(\frac{L_{WL}}{Vol^{\frac{1}{3}}} \right)^3 \end{aligned} \quad (3.19)$$

Les paramètres utilisés dans l'équation de Gerritsma sont : la longueur à la flottaison L_{WL} , le volume immergé Vol , la largeur à la flottaison B_{WL} , le tirant d'eau de la coque sans appendice T_C , le tirant d'eau maximal T , l'aire de la surface de flottaison A_W , la position longitudinale du centre du volume immergé LCB , le coefficient prismatique C_P et le déplacement Δ_C .

Le modèle de Gerritsma peut être utilisé dans notre cas puisque les caractéristiques géométriques de la carène utilisées pour le prototype de voilier *Asarome* entrent dans l'intervalle de variations possible. Le tableau 3.1 donne cet intervalle de validité des paramètres géométriques (extrait de [102]) ainsi que les valeurs obtenues en mesurant les caractéristiques de la carène du voilier, de type Mini-J. On

3.3. MODÈLE HYDRODYNAMIQUE

vérifie bien sur ce tableau que ces paramètres appartiennent bien à l'intervalle de validité du modèle de Gerritsma.

Coefficient	Min	Max	Valeur mesurée
L_{WL}/B_{WL}	2.76	5	4.2
B_{WL}/T_C	2.46	19.32	3.0
$L_{WL}/Vol^{1/3}$	4.34	8.5	5.2
LCB	0	-6%	-2%
C_P	0.52	0.6	0.55

TABLE 3.1 – Intervalle de validité des caractéristiques géométriques d'une carène pour l'équation polynomiale de Gerritsma

Les composantes de résistance R_{Leeway} et R_{Heel} ont été identifiées de façon expérimentale à partir d'essais en traction effectués dans le bassin de carène de l'École Centrale de Nantes ($150m \times 5m \times 3m$). La carène seule (c'est-à-dire sans ses appendices tel que le safran) a été fixée à un dynamomètre permettant de mesurer les 6 composantes d'effort sans restriction sur les mouvements verticaux (pilonnement) et sur l'assiette (Fig 3.5). L'ensemble est ensuite tracté sur le bassin d'essais de carène par un chariot se déplaçant à une vitesse paramétrable. Plusieurs essais de traction ont été réalisés avec des conditions de test différentes :

- Angles de dérive et angle de gite nuls, essai effectué avec 10 vitesses différentes dans l'intervalle $0,5 nd \leq v \leq 5 nd$ par pas de $0,5 nd$.
- Angle de dérive nul et angle de gite égal à $0^\circ, 10^\circ$ puis 20° , pour des vitesses d'essai de 2, 3 et 4 nd .
- Angle de dérive de 2° et angle de gite égal à $0^\circ, 10^\circ$ puis 20° , pour des vitesses d'essai de 2, 3 et 4 nd .

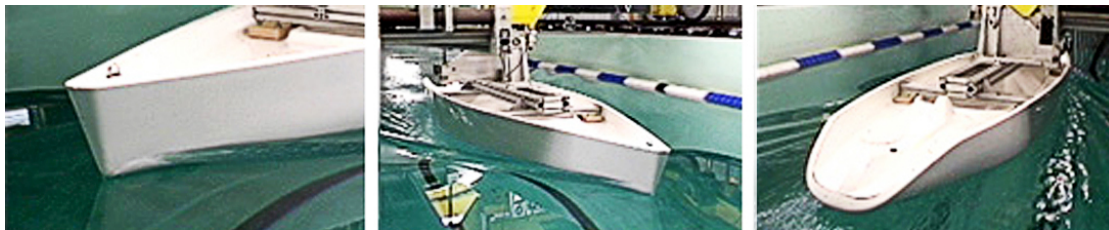


FIGURE 3.5 – Le prototype dans le bassin de traction de l'ECN

Ces différents tests permettent d'obtenir les valeurs d'effort liés à la composante de dérive R_{Leeway} en effectuant des essais, à différentes vitesses, avec un angle de

CHAPITRE 3. MODÈLES ET SIMULATEUR NUMÉRIQUE

gite nul, ce qui annule la composante R_{Heel} . De manière analogue, des tests effectués à différentes vitesses avec un angle de dérive nul permettent d'obtenir les valeurs d'efforts liés à la composante de gite R_{Heel} . Les mesures à angle de gite et angle de dérive non nuls permettent de vérifier l'indépendance de ces deux composantes. A noter que les couples importants générés sur la structure de traction ont obligé à limiter la valeur de l'angle de dérive à 2° . La figure 3.6 montre un exemple de résultats obtenus lors de ces essais en bassin de traction (extrait de [103]).

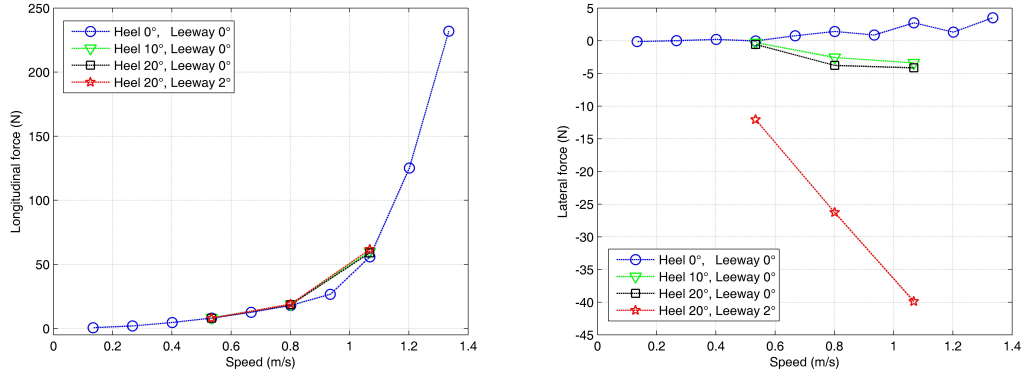


FIGURE 3.6 – Forces hydrodynamiques dans les directions longitudinale et transverse

Finalement, les efforts induits par le safran, exprimés dans un repère lié au safran, sont calculés à partir des équations 3.20 et 3.21 similaires aux équations 3.13 et 3.14 utilisées pour la détermination des efforts aérodynamiques sur la voile. Dans ce cas, $\rho^{(e)}$ est la valeur de la densité de l'eau, $V^{(e)}$ correspond à la vitesse moyenne de l'écoulement d'eau dans un repère lié au safran, $S^{(e)}$ la surface du safran, $C_D^{(e)}$ et $C_L^{(e)}$ des coefficients dépendants de la forme de l'appendice [104].

$$F_D^{(e)} = \frac{1}{2} \rho^{(e)} S^{(e)} V^{(e)2} C_D^{(e)} \quad (3.20)$$

$$F_L^{(e)} = \frac{1}{2} \rho^{(e)} S^{(e)} V^{(e)2} C_L^{(e)} \quad (3.21)$$

Les différentes formulations empiriques présentées ci-dessus sont ensuite validées par des simulations précises fondées sur une résolution numérique des équations de Navier-Stokes dans un domaine englobant la carène et permet ainsi de déterminer le champ de vague autour de la carène et le champ de pression appliqué sur celle-ci. La géométrie de la carène et celle de ses appendices (quille et safran)

3.4. EQUATIONS DU MOUVEMENT ET SIMULATEUR NUMÉRIQUE

ont été numérisées puis chargées dans un logiciel de CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Des simulations fines, dans les mêmes conditions que celles utilisées lors des essais de traction, ont ensuite été réalisées et, après une phase d'ajustement du modèle, a permis de faire coïncider les relevés expérimentaux avec les résultats des simulations. Le modèle numérique fin étant validé par les essais de traction, il est ensuite utilisé pour effectuer des simulations sur une gamme de paramètres (gîte, dérive, vitesse) plus large que celle accessible par les essais en bassin de traction. A l'issue de ces essais, une équation de transfert, fondée sur une interpolation polynomiale, est élaborée, permettant de déterminer les valeurs des efforts hydrodynamiques à partir des valeurs de vitesse, gîte et dérive. Cette équation de transfert, beaucoup plus légère en termes de temps de calcul que la résolution complète des équations de Navier-Stokes, est ensuite intégrée dans le calcul des efforts extérieurs appliqués au système de corps rigides pour la résolution des équations du mouvement (cf §3.4).

3.4 Equations du mouvement et simulateur numérique

Les équations du mouvement du voilier sont déterminées en écrivant le principe fondamental de la dynamique dans le référentiel R_B selon l'équation 3.22 :

$$\begin{cases} m \left(\frac{d\vec{V}_{B/R_0}}{dt} \right)_{/R_B} = \vec{F}_{/R_B} - m(\vec{\Omega}_{R_B/R_0} \wedge \vec{V}_{G\epsilon B/R_0}) \\ \Pi_{B/G} \cdot \vec{\Omega}_{R_B/R_0} = \vec{M}_G - \vec{\Omega}_{R_B/R_0} \wedge \Pi_{B/G} \cdot \vec{\Omega}_{R_B/R_0} \end{cases} \quad (3.22)$$

avec :

- m : masse du navire
- $\Pi_{B/G}$: matrice d'inertie dans R_0
- $\vec{V}_{G\epsilon B/R_0}$: vitesse du centre de gravité dans R_0
- \vec{F}_{R_B} : efforts extérieurs appliqués dans R_B
- $\vec{\Omega}_{R_B/R_0}$: vitesse de rotation dans R_0
- \vec{M}_G : moments extérieurs appliqués dans R_B

Dans cette expression, les forces et les moments extérieurs appliqués au voilier proviennent des modèles d'efforts aéro et hydrodynamiques présentés dans les parties §3.2 et §3.3 précédentes. L'équation 3.22 est résolue numériquement en utilisant un algorithme d'intégration de type Runge-Kutta.

CHAPITRE 3. MODÈLES ET SIMULATEUR NUMÉRIQUE

Ce simulateur numérique a été codé en *Fortran* par le laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Nantes. Il prend la forme d'une librairie dynamique (DLL : Dynamic Link Library) sous Windows. Il s'interface donc aisément avec des outils de simulation, tel que Matlab, des interfaces graphiques utilisateurs ou d'autres programmes puisqu'il suffit d'appeler une fonction dont les paramètres d'entrée/sortie sont définis ci-dessous :

DLL_simulateur (*CODE_ERR_DLL*, *n*, *t*, *dt*, *tws_nds*, *twa_deg*, *angle_bome_deg*, *angle_safran_deg*, *x*, *y*, *z*, *psi*, *teta*, *phi*, *vx*, *vy*, *vz*, *omx*, *omy*, *omz*, *course*, *cap_compas*, *leeway*, *Moment_mèche_safran*)

où :

- **CODE_ERR_DLL** : (INTEGER(2) ; [-infini ; +infini]), paramètre de contrôle.
- **n** : (INTEGER(2) ; [1 ; +infini]), nombre de sous itérations à réaliser. Le pas de temps employé pour chaque itération est *dt*.
- **t** : (s; REAL(8) ; [0 ; +infini]), instant de début de la simulation.
- **dt** : (s; REAL(8) ; >0), pas de temps pour chacune des itérations.
- **tws** : (noeuds; REAL(8) ; [0 ; +infini]), vitesse du vent.
- **twa** : (degré; REAL(8) ; [-180° ; 180°]), angle du vent.
- **angle_bome** : (degré; REAL(8) ; [-90° ; 90°]), angle de bôme.
- **angle_safran** : (degré; REAL(8) ; [-180° ; 180°]), angle de safran.
- **x,y,z** : (m ; REAL(8) ; [-infini ; +infini]), vecteur position du bateau dans le repère global.
- **psi** : (degré; REAL(8) ; [-90° ; 90°]), angle de gîte dans le repère de rotation.
- **teta** : (degré; REAL(8) ; [-90° ; 90°]), angle d'assiette dans le repère de rotation.
- **phi** : (degré; REAL(8) ; [-180° ; 180°]), angle de lacet dans le repère de rotation.
- **vx,vy,vz** : (m/s ; REAL(8) ; [-infini ; +infini]), vecteur vitesse du bateau dans le repère global.
- **omx,omy,omz** : (rad/s ; REAL(8) ; [-infini ; +infini]), vecteur vitesse instantanée de rotation du bateau dans le repère de rotation.
- **course** : (degré; REAL(8) ; [-180° ; +180°]), angle de route (angle dans le repère global entre le Nord et le vecteur vitesse V_B du bateau).
- **cap_compas** : (degré; REAL(8) ; [-180° ; +180°]), cap (angle dans le repère global entre le Nord et l'axe X_B du navire).
- **leeway** : (degré; REAL(8) ; [-180° ; +180°]), angle de dérive.
- **Moment_mèche_safran** : (N/m ; REAL(8) ; [-infini ; +infini]), couple sur la mèche du safran.

Dans la version actuelle du simulateur, utilisée en particulier pour les analyses que nous avons réalisées dans la section §3.5, le comportement sur houle n'a pas été modélisé. Le voilier est donc supposé se déplacer sur un plan (déplacement vertical selon z nul) et seules les rotations correspondant aux angles de cap et de gîte sont prises en compte (assiette θ nulle). Le simulateur que nous avons exploité est donc un simulateur à quatre degrés de liberté. Les deux entrées de commande de ce simulateur sont l'angle de voile *angle_bome* et l'angle de safran *angle_safran*. Les sorties sont les positions, vitesses et moment sur la mèche de safran. Par commodité, le simulateur fournit également en sortie le cap (compas), la route et la dérive (voir figure 3.2, page 50). Il est également possible de modifier à chaque pas de temps d'appel à cette fonction *DLL_simulateur*, les caractéristiques du vent (vitesse et angle de vent réel). Par ailleurs, les conditions initiales (vitesses par exemple) peuvent être modifiées à chaque pas de temps de simulation.

3.5 Exploitation du simulateur

Le simulateur développé par l'ECN a été largement utilisé au cours de ce travail de thèse. Afin de faciliter son exploitation pour les tests de comportement du voilier présentés dans cette section ainsi que pour évaluer les algorithmes de commande du chapitre 5, nous avons développé une interface graphique utilisateur à ce simulateur. Cette interface est présentée dans la partie §3.5.1.

Puis, nous analyserons les résultats issus de l'exploitation de ce simulateur, avec tout d'abord, les premiers essais que nous avons réalisés afin de tester le comportement global du voilier sous différentes allures. Nous présenterons ensuite les essais réalisés afin d'extraire de ce simulateur les informations relatives au réglage optimal de l'angle de voile sous différentes conditions de vent ainsi que la polaire de vitesse du voilier, qui permet d'exprimer les performances de vitesses en régime établi du voilier. Ces essais ont également permis de déterminer les polaires de gîte du voilier. Enfin, le comportement en virage et la détermination du rayon tactique seront également analysés à travers des simulations.

L'ensemble de ces résultats sera exploité dans les chapitres 5 et 6 pour le réglage d'un certain nombre de paramètres des lois de commande.

3.5.1 Interface graphique du simulateur

Afin de faciliter l'exploitation du simulateur numérique, nous avons réalisé une Interface Graphique Utilisateur à ce simulateur. Cette interface a été développée en Visual Basic sous Windows, principalement pour des raisons de réutilisabilité des composants graphiques. Une copie d'écran de cette interface est donnée figure 3.7.

On trouve sur cette interface graphique, un affichage des variables d'états du voilier (six composantes des vecteurs position et vitesse), des variables de commandes (*ec* : angle d'ouverture de la voile et angle de safran), des variables d'environnement (*TWA* et *TWS* : angle et vitesse vent réel), ainsi que le cap, la route et la dérive. Ces valeurs sont affichées aux instants k , $k - 1$ et $k - 2$ pour faciliter l'observation de l'évolution temporelle de ces grandeurs.

La librairie dynamique, constituant le simulateur numérique développé par l'ECN, est appelée depuis cette interface et il est possible, depuis l'interface, de paramétrer le pas de temps de résolution des équations de la dynamique dt ainsi

CHAPITRE 3. MODÈLES ET SIMULATEUR NUMÉRIQUE

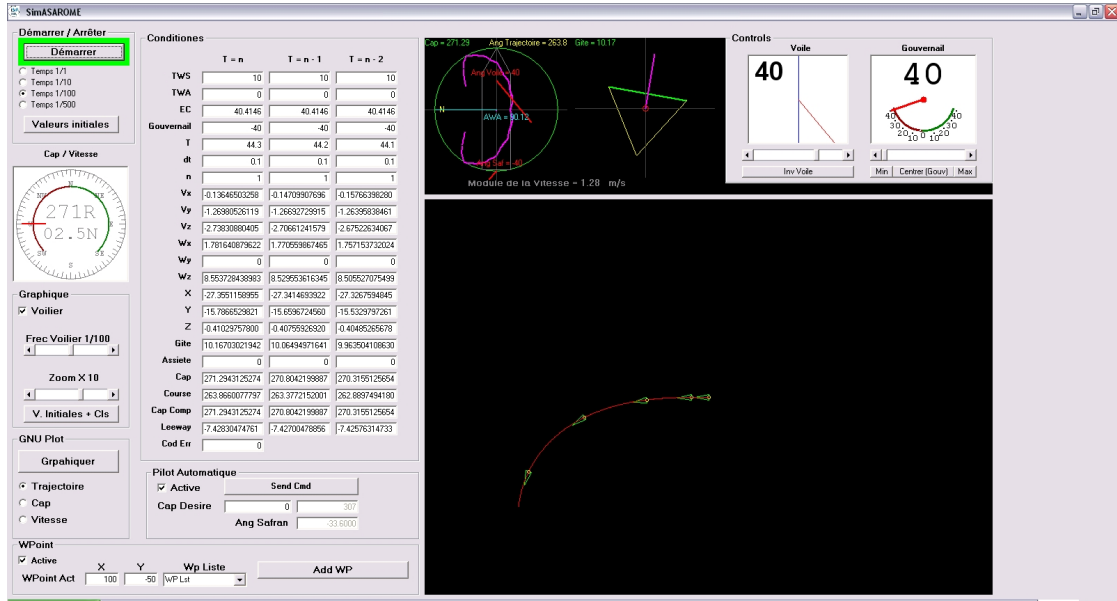


FIGURE 3.7 – Interface graphique utilisateur du simulateur numérique

que le cadencement temporel T_e de l'appel au simulateur. Ceci permet en particulier de faire fonctionner le code de calcul du simulateur sur un pas temporel dt faible (en général, 20 ms) et d'appeler le simulateur, donc de modifier ses entrées et récupérer les sorties à cadence T_e plus grande (typiquement de l'ordre de 100 ms , ou plus) ce qui reproduit la configuration classique d'une commande numérique d'un système continu par échantillonneur bloqueur. Par ailleurs, ceci limite les échanges simulateur - code de calcul et diminue le temps de simulation.

Des graphes permettent de visualiser les principaux paramètres du mouvement en cours de simulation en particulier :

- la trajectoire suivie avec matérialisation du voilier et possibilité de zoomer en cours de simulation sur une partie de cette trajectoire,
- le cap et la vitesse courante,
- la gîte du voilier,
- la direction du vent, sa vitesse ainsi que la polaire de vitesse du voilier (voir §3.5.3) positionnée par rapport au vent,
- les angles de voile et de safran.

Il est également possible avec cette interface graphique de piloter le voilier en boucle ouverte (l'utilisateur spécifie en cours de simulation les valeurs d'angles de voile et de safran) ou en boucle fermée (l'utilisateur spécifie alors un point de passage WP pour WayPoint ou une liste de Waypoints). Dans le cas du pilo-

tage en boucle fermée, l'interface graphique fait appel à une fonction de calcul des angles de voile et de safran. Cette fonction de calcul, qui détermine en fait un cap consigne et un réglage de voile optimal puis réalise l'asservissement des angles de safran et de voile (cf. Chapitre 5 §5.1) est écrite en C, afin de faciliter son implémentation sur le calculateur embarqué du voilier réel. Les simulations présentées dans le chapitre 6 ont été réalisées en utilisant cette interface graphique.

Enfin, il est possible d'enregistrer dans un fichier l'ensemble des paramètres de la simulation (temps, vecteur d'état, de commande, données d'environnement, ...).

Les temps de simulation à l'aide de cette interface graphique couplée au simulateur numérique sont tout à fait acceptables, y compris lorsque ces simulations s'exécutent sur des machines de faible puissance telles que des ordinateurs portables, et ceci malgré l'usage d'un langage non optimisé tel que le VisualBasic. Nous avons constaté des temps d'exécution proches du temps réel c'est-à-dire qu'une seconde en temps simulé correspond environ à une seconde de temps de calcul et d'affichage.

3.5.2 Tests de différentes allures

Afin de vérifier le comportement global du simulateur de l'ECN, nous avons testé celui-ci avec les quatre principales allures de navigation d'un voilier, schématisées sur la figure 3.8.

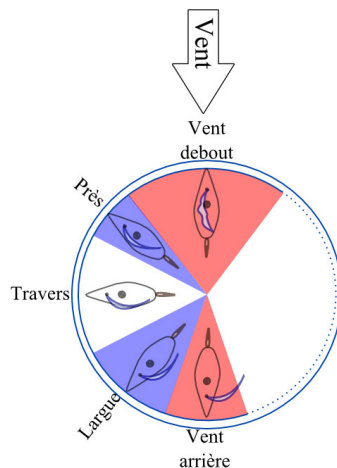


FIGURE 3.8 – Allures

Pour tester ces différentes allures, nous avons interfacé le simulateur avec le

CHAPITRE 3. MODÈLES ET SIMULATEUR NUMÉRIQUE

logiciel de simulation Matlab. La librairie dynamique (DLL) constituant le cœur du simulateur est appelée depuis Matlab comme un programme externe. Les paramètres d'entrée pour le simulateur sont le vent réel (vitesse et direction), l'angle de voile, l'angle de safran et l'état courant (six composantes de position et six composantes de vitesse). Le simulateur résout les équations du mouvement et fournit l'état (position et vitesse) dt plus tard, ainsi que les angles de cap, de route et de dérive.

Dans les résultats présentés ci-dessous, la période d'échantillonnage dt est fixée à 20 ms . Pour ces simulations, le vent souffle constamment du Nord ($TWA = 0^\circ$) avec une vitesse de 10 nd ($TWS = 10\text{ nd}$). La vitesse initiale du voilier est égale à zéro et le cap initial est égal à l'allure testée (près, travers, largue et vent arrière). En simulation, ce cap initial est aisément maintenu à une valeur constante en imposant que l'angle de safran reste égal à l'angle de dérive. Nous avons par ailleurs pu constater à travers ces simulation, que la dérive du voilier *Asarome* restait relativement faible, de l'ordre de quelques degrés, quelque soient les allures.

Pour vérifier le comportement du simulateur au près, le voilier est contraint de suivre un cap constant de $45^\circ N$. Lorsque le voilier est au plus près du vent (à 45°), il faut amener la voile proche de l'axe du bateau pour permettre un écoulement laminaire, optimal, des filets d'air sur la voile. La poussée exercée sur les voiles comprend, à cette allure, une composante perpendiculaire à l'axe du bateau importante qui le fait gîter. Cette allure est très utilisée par les navigateurs pour remonter au vent en recherchant le meilleur compromis entre cap et vitesse, c'est-à-dire la meilleure VMG (*Velocity Made Good*). La montée en vitesse du voilier est représentée figure 3.9 pour un angle de bôme maintenu à 0° (la voile est dans l'axe du bateau).

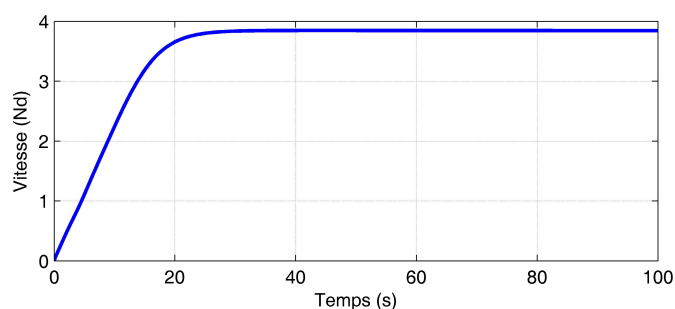


FIGURE 3.9 – Réponse en vitesse au près (Cap= 45° , Voile = 0°)

Le test du simulateur pour l'allure portante du "vent de travers" a été effectué

avec les mêmes conditions de vent mais avec un cap initial de 90° . La voile a été maintenue dans ce cas un peu plus ouverte et forme un angle constant de 30° par rapport à l'axe longitudinal du voilier. Le comportement est présenté à la figure 3.10. On peut constater que dans ce cas, la vitesse en régime établi est légèrement inférieure à la vitesse obtenue pour l'allure portante au près.

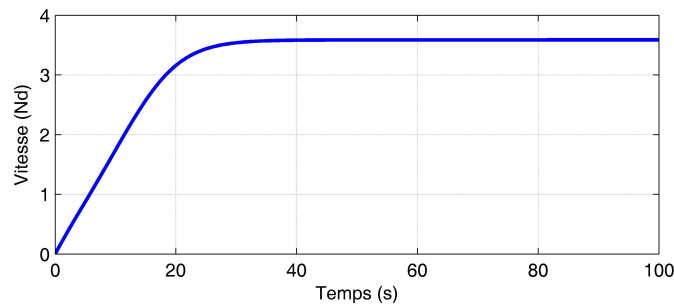


FIGURE 3.10 – Réponse en vitesse au travers (Cap= 90° , Voile = 30°)

Au *grande largue* le vent provient de $3/4$ arrière. La voile est écartée de l'axe du bateau mais l'écoulement des filets d'air sur les voiles n'est désormais plus laminaire mais perturbé, ce qui fait chuter la vitesse en régime établi du bateau (fig. 3.11). Pour ce test, le cap pendant la simulation était de $135^\circ N$ et l'angle de voile était maintenu à 60° .

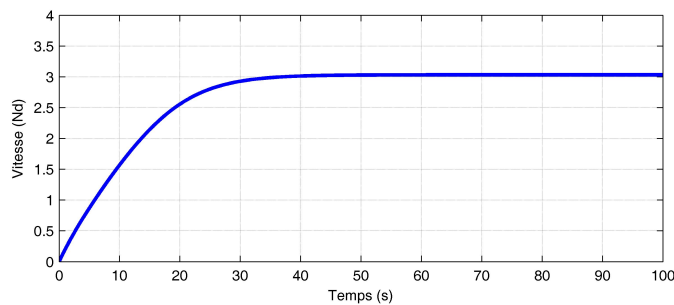


FIGURE 3.11 – Réponse en vitesse au largue (Cap= 135° , Voile = 60°)

Au vent arrière, l'écoulement de l'air sur les voiles est très perturbé et la vitesse du voilier est nettement diminuée par rapport aux allures de près et de travers. La figure 3.12 montre le résultat d'une simulation effectuée avec un angle de cap constant de $180^\circ N$ et un angle voile de 90° . Les conditions de vent sont inchangées par rapport aux simulation précédentes.

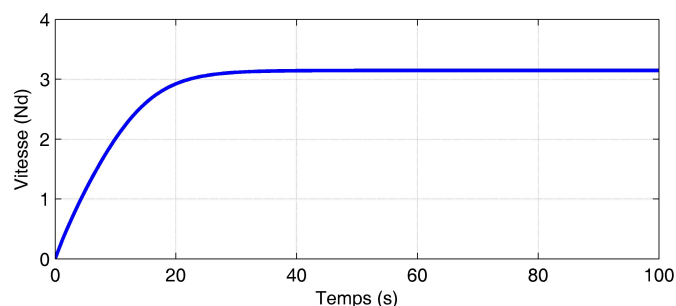


FIGURE 3.12 – Réponse en vitesse par vent arrière (Cap=180°, Voile = 90°)

3.5.3 Polaires de vitesse

Le réglage de voile, c'est-à-dire la détermination de l'angle de bôme en fonction des conditions instantanées de vent peut a priori se baser sur un ensemble de tests effectués avec le simulateur. Ces tests sont représentés sur la courbe polaire de la figure 3.13. Pour ces essais, le voilier maintient un cap constant par rapport au vent réel (lui aussi constant en direction et en vitesse) avec un angle de bôme constant. La vitesse en régime établi dans ces conditions constitue un point sur la polaire. En faisant varier le cap du voilier par rapport au vent, on obtient un ensemble de points qui sont ensuite tracés en coordonnées polaires (la distance radiale représente la vitesse en régime établi du voilier et l'angle le cap relatif par rapport au vent). En répétant cette opération pour différents angles de bôme, on obtient la polaire de la figure 3.13, avec dans ce cas une vitesse de vent réel de 10 nd. Cette courbe polaire a été tracée par rapport au vent réel.

Le réglage dit optimal de voile est celui qui, pour un cap relatif au vent donné, permet d'obtenir la vitesse la plus élevée. Cette opération de construction de courbes polaires relatives à l'angle de bôme a été répétée pour différentes vitesses de vent. Les résultats obtenus montrent que dans une large plage de vitesse (environ de 5 à 30 nœuds), hormis une dilatation ou une contraction de ces courbes polaires, la vitesse du vent n'a pas d'influence sur la valeur de l'angle de voile correspondant au réglage optimal. En d'autres termes, dans cette plage de vitesse de vent, si un angle de voile α_1 permet d'atteindre la vitesse maximale pour une vitesse de vent TWS_1 et pour un cap donné par rapport au vent, le même angle de voile, dans les mêmes conditions de cap, permet également d'atteindre la vitesse maximale pour une autre vitesse de vent TWS_2 .

En tabulant les valeurs de cette courbe polaire, le contrôleur de navigation présenté dans le chapitre 5 peut ainsi théoriquement déterminer pour chaque couple Vitesse vent-Cap par rapport au vent, la valeur de l'angle optimal de voile.

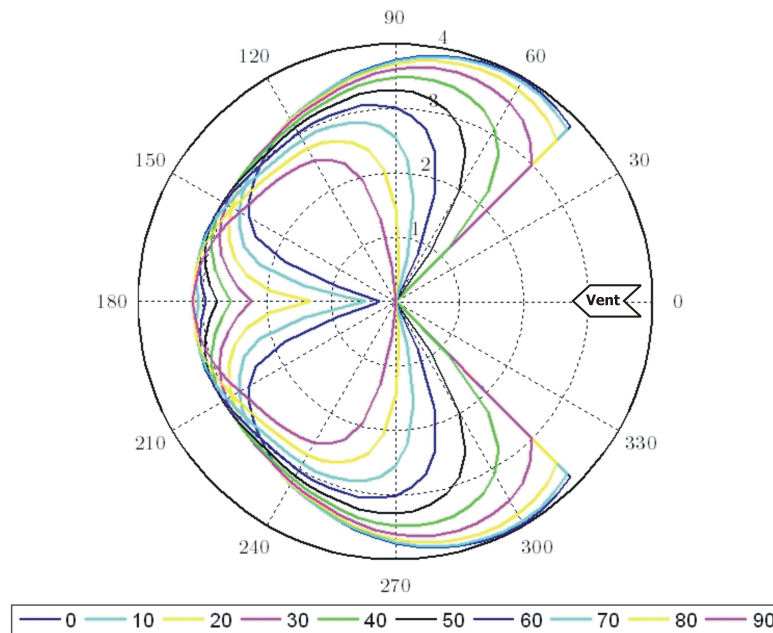


FIGURE 3.13 – Courbes polaires représentant l'influence de l'angle de voile sur la vitesse d'avance (vitesse de vent : 10 nd)

Toutefois, en analysant les courbes de la figure 3.13, il apparaît que le modèle aérodynamique sous-jacent est en défaut. En effet, d'après ces courbes, un angle de bôme de 0° (c'est-à-dire voile dans l'axe du bateau), permet d'obtenir la vitesse la plus élevée pour des angles de cap relatifs au vent de 0 à 110° , ce qui ne semble pas réaliste. Le simulateur fournit donc une image quantitativement erronée du comportement du voilier sur les aspects aérodynamiques liés à l'influence du réglage de voile. Ce défaut du simulateur n'ayant toujours pas été corrigé à l'heure actuelle, ce dernier n'a pas été utilisé pour effectuer les réglage de voile. Nous lui avons préféré une méthode, proposée par Y. Brière dans [60], pour effectuer ce réglage de voile (Cf. chapitre 5).

En prenant l'enveloppe convexe des courbes de la figure 3.13 et en répétant cette opération pour des vitesses de vent réel différentes, nous avons pu également tracer la polaire de vitesse du voilier (Fig. 3.14) qui représente la vitesse théorique maximale qu'il est possible d'obtenir pour des conditions de vent réel données (angle et vitesse). Ces polaires de vitesse sont des diagrammes classiquement utilisés en navigation à voile qui permettent d'analyser les performances d'un voilier en fonction de la direction du vent et de la vitesse du vent réel. Des programmes commerciaux appelés *VPP* (*Velocity Prediction Program*) existent et permettent

d'établir ces courbes pour chaque modèle spécifique de voilier. Rappelons également que ces courbes fournissent la vitesse maximale théorique d'un voilier, sous des conditions de vent données, en supposant un réglage optimal des voiles et que cette vitesse correspond à la vitesse en régime établi. Elles fournissent donc une information utile dans des conditions quasi-statiques.

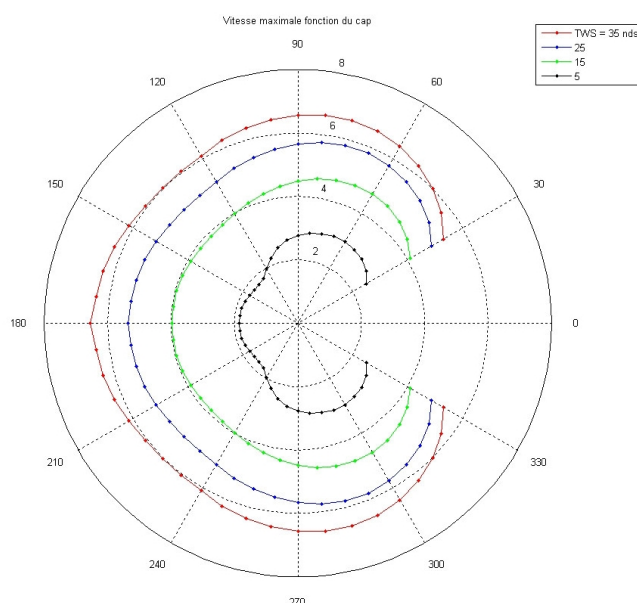


FIGURE 3.14 – Courbes polaires de vitesse du voilier *Asarome* (par rapport au vent réel)

Par ailleurs, même si l'influence de l'angle de bôme est mal restituée dans le simulateur, les courbes polaires de vitesse semblent fournir un résultat qualitativement correct. On constate sur les polaires de vitesse de la figure 3.14 un comportement quasi-homothétique, sauf pour les basses vitesses, où la polaire est assez fortement déformée. Ces courbes de performance seront donc utilisées dans le chapitre 5 pour calculer un cap en fonction des données instantanées de vent et de la localisation de l'objectif.

3.5.4 Polaire de gîte

Nous avons également utilisé le simulateur pour évaluer le comportement en gîte du voilier. Pour cela, nous avons construit la polaire de gîte du voilier par simulations successives sous des conditions d'excitations différentes (angle de voile, cap relatif au vent). Cette polaire a été construite selon une procédure analogue à

celle utilisée pour déterminer la polaire représentant l'influence de l'angle de bôme sur la vitesse d'avance : le voilier maintient un cap constant sous un vent constant (en vitesse et direction) avec un angle de voile constant. La valeur de l'angle de gîte en régime établi constitue un point de la courbe polaire. L'opération est répétée sur un ensemble de caps, ce qui fournit une courbe polaire puis sur un ensemble d'angles de voile ce qui permet d'obtenir les courbes polaires de la figure 3.15.

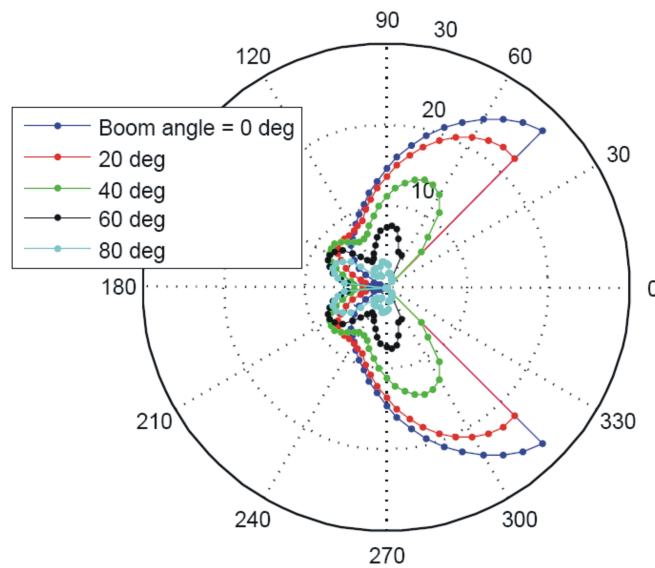


FIGURE 3.15 – Courbes polaires de gîte du voilier *Asarome*

Sur cette polaire, on constate bien la forte gîte lors des allures de près, gîte qui diminue fortement, pour un même angle de voile, lorsque l'angle relatif de vent augmente c'est-à-dire pour des allures de large (vent à 135° de l'axe du bateau) ou de travers (vent à 90°). Par ailleurs, on constate également la diminution induite sur la gîte par une réduction de l'angle entre la voile et le vent.

Ces résultats sont cohérents avec les tests réalisés avec le voilier *Asarome* en soufflerie dans le bassin d'essais de l'Ecole Centrale de Nantes [105] (voir Fig. 3.16).

3.5.5 Comportement en virage

Le comportement en virage du voilier a également été évalué à l'aide du simulateur numérique, en particulier afin d'évaluer sa manœuvrabilité. Pour cela, nous avons reproduit en simulation les conditions de tests d'un virage continu

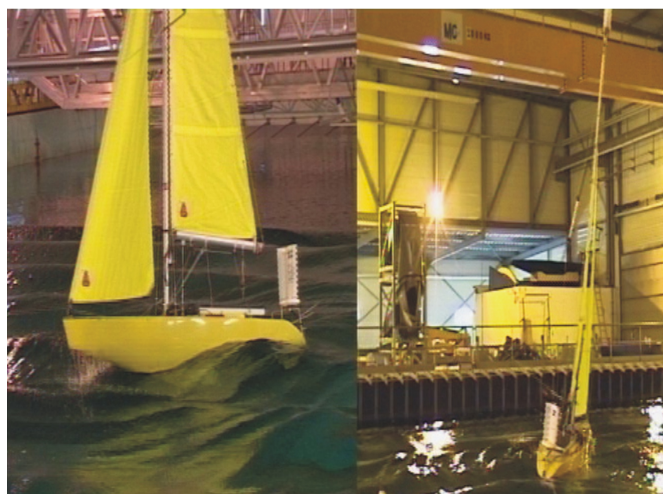


FIGURE 3.16 – Voilier *Asarome* dans le bassin d’essais de l’ECN (au près, 5 nd de vent, houle d’amplitude 10cm, période 1,2s)

préconisées par l’ITTC (*International Towing Tank Conference*) [92]. Ce test de manœuvrabilité permet d’évaluer la capacité d’un bateau à réaliser des manœuvres de changement de cap et définit des mesures de manœuvrabilité telles que le *diamètre tactique* (Dt) et l’*avance à 90°* (Av) (voir Fig. 3.17). Ce test en virage, conçu fondamentalement pour des bateaux à moteur, doit être réalisé dans les conditions suivantes : sur un navire lancé à pleine vitesse, la barre est brutalement tournée d’un angle minimum de 15° . L’angle de barre ainsi que la vitesse de propulsion sont maintenues constantes pendant toute la durée de la manœuvre. Lorsque la vitesse est stabilisée, la trajectoire est un cercle.

Sur un voilier réel, ce test de manœuvrabilité est difficile à effectuer puisqu’il nécessite de réaliser un virage à force de propulsion constante, ce qui est évidemment impossible puisque la propulsion d’un voilier provient de l’effort produit par le vent sur les voiles. À l’aide du simulateur numérique, il est toutefois possible de mettre en place ces conditions de test. Pour cela, la vitesse du vent est maintenue constante et on impose à l’angle de vent de suivre l’écart entre le cap courant et le cap initial. De cette manière, l’angle de vent tournera à la même vitesse que l’angle du voilier. Le voilier percevra donc un vent constant au cours de l’ensemble de sa manœuvre. L’angle de voile reste également constant pendant toute la simulation.

Un exemple de trajectoire résultant d’une telle manœuvre est donné figure 3.17, pour un vent de 20 nd (correspondant à une vitesse du voilier de 5,1 nd), un angle de safran de $+30^\circ$ et un angle de voile de 15° . Le test correspond à une

allure au travers, avec un vent à 90° de l'axe du voilier. L'avance à 90° Av et le diamètre tactique Dt ont été placés sur cette figure. Le voilier est tout d'abord amener à une vitesse stable, sous les conditions données, puis le safran est tourné de l'angle spécifié. La position du voilier à cet instant est marquée sur la figure et correspond à l'origine des axes. On peut constater sur cette figure que l'avance Av est supérieure au rayon tactique, ce qui traduit le régime transitoire lors de la réponse en cap du voilier à une modification de l'angle de safran.

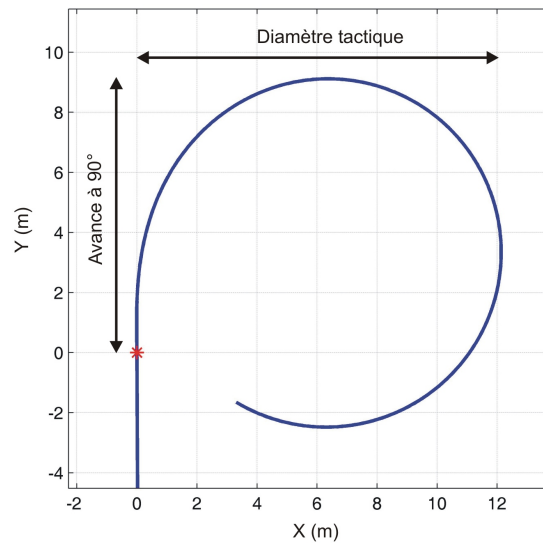


FIGURE 3.17 – Comportement en virage (vitesse voilier : $5nd$, safran : 30°)

Ces simulations ont été répétées, avec la même allure (travers) et le même réglage de voile pour des vitesses de vent différentes et pour des angles de safran différents. Les courbes des figures 3.18 et 3.19 donnent les résultats respectivement pour l'avance à 90° et pour le diamètre tactique en fonction de la vitesse du navire.

Sur ces courbes, on peut constater d'une part que l'avance reste toujours supérieure au rayon tactique (entre 20 et 50%, proportion augmentant avec la vitesse). D'autre part, on constate également que, plus la vitesse est élevée, plus l'avance à 90° et le diamètre tactique diminuent ce qui signifie que la manœuvrabilité augmente avec la vitesse du voilier. Il s'agit d'une particularité de la navigation à voile où le changement de cap est d'autant plus efficace que la vitesse d'écoulement le long du safran (et donc la vitesse du voilier) est importante. Pour les bateaux à moteur, on ne trouve généralement pas ce type de comportement puisque le changement de cap est obtenu par déviation du flux généré par les propulseurs ce qui

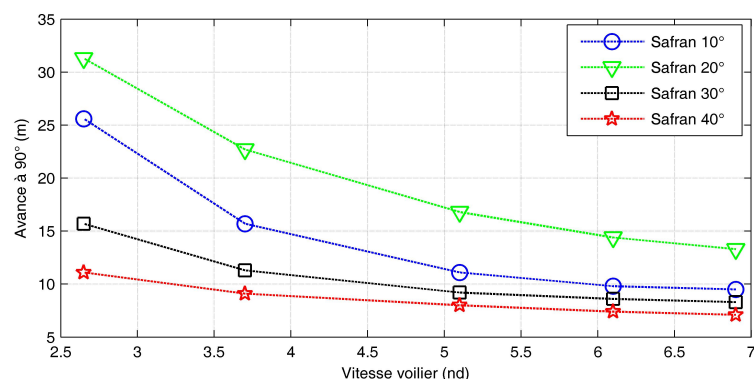


FIGURE 3.18 – Comportement en virage : avance à 90°

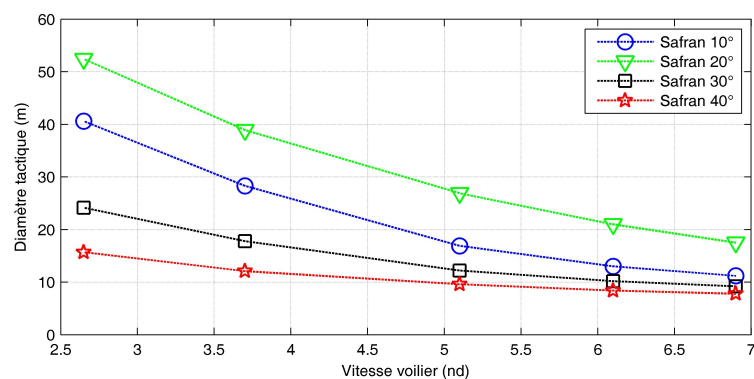


FIGURE 3.19 – Comportement en virage : diamètre tactique

conduit à une dépendance moins marquée de la manœuvrabilité en fonction de la vitesse. Ceci conduit par exemple, à pouvoir "tourner" avec un bateau à moteur même à vitesse nulle ou très faible, ce qui est impossible avec un voilier.

Par ailleurs, on notera également sur ces figures que la manœuvrabilité du voilier est meilleure pour un angle de safran de 10° que pour un angle de safran de 20°, ce qui est une illustration de l'adage circulant dans le milieu des écoles de voiles : *"cela ne sert à rien de pousser sa barre à fond pour tourner plus vite"*. Ceci est dû au fait que, pour des valeurs faibles d'angle de safran, on observe un écoulement laminaire autour du safran. Pour des valeurs plus élevées, l'écoulement devient turbulent (avec potentiellement apparition d'un phénomène de cavitation) ce qui diminue la portance du safran et donc sa capacité à modifier le cap du voilier. Ceci est illustré sur la figure 3.20. Avec le simulateur numérique, il est possible de relever l'effort sur la mèche du safran. Dans les mêmes conditions que précédemment

(vitesse de vent constante de 20 nd, vent tournant avec le voilier, angle de voile constant) et en faisant varier l'angle de safran, on relève l'effort maximal sur le safran, observé à chaque début de virage. Sur ce relevé, on trouve le régime laminaire pour un angle de safran compris entre 0 et 10° puis un régime turbulent au-delà avec une très forte baisse de la portance pour des angles de safran voisins de 15°. Au-delà, l'augmentation de l'effort de trainée permet de nouveau de retrouver une bonne manœuvrabilité.

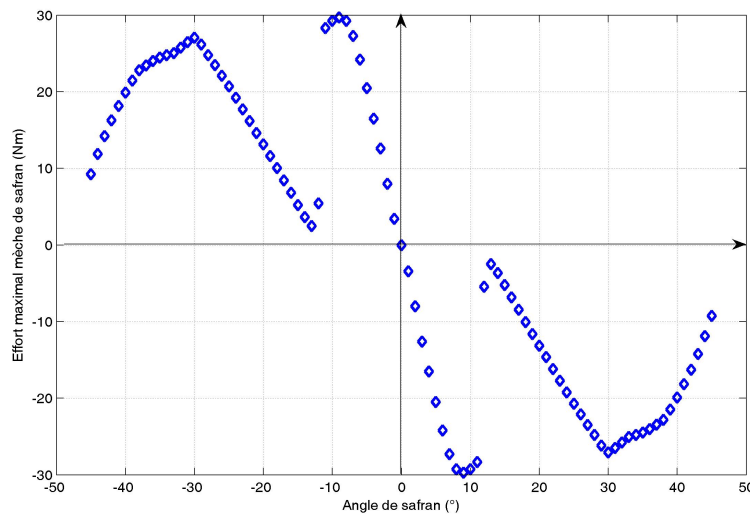


FIGURE 3.20 – Moment sur la mèche de safran en fonction de l'angle de safran

Les données présentées dans les courbes précédentes, et plus précisément l'avance à 90°, seront utilisées dans le chapitre 5 en particulier pour l'ajustement des paramètres utilisés dans les algorithmes d'évitement d'obstacle.

Ces courbes fournissent des informations sur la manœuvrabilité du voilier, manœuvrabilité qui s'exprime en termes géométriques. Il est également possible d'exploiter le simulateur pour obtenir des informations sur la dynamique du changement de cap, en particulier pour obtenir une approximation de la fonction de transfert angle de cap/angle de safran. Pour cela, nous avons réalisé des simulations dans les mêmes conditions que celles utilisées précédemment : le voilier est amené à une vitesse stable, puis le safran est tourné d'un angle fixé. Les conditions de vent, relatives au bateau, restent constantes (vent à 90° de l'axe longitudinal du voilier en faisant tourner le vent en même temps que le voilier. Le simulateur fournissant les six composantes du vecteur de position et les six composantes du vecteur vitesse, il est alors possible de tracer la réponse en vitesse de changement

de cap à un échelon d'angle de safran. Le simulateur fournit le vecteur vitesse de rotation instantanée de R_B par rapport à R_0 , exprimée dans R_B , c'est-à-dire $\vec{\omega}$ avec les notations présentées dans la partie §3.1. La composante qui nous intéresse ici est la composante selon z , c'est-à-dire r . La vitesse de changement de cap $\dot{\psi}$, s'obtient à partir de $\vec{\omega}$ avec la relation d'inversion de l'équation 3.7 :

$$\dot{\psi} = \frac{\sin(\phi)}{\cos(\theta)} q + \frac{\cos(\phi)}{\cos(\theta)} r$$

Puisque la composante de tangage (assiette) n'est pas intégrée dans le simulateur ($\theta = 0$ et $q = 0$), la vitesse de changement de cap $\dot{\psi}$ est donc égale, à un coefficient près, à r . Les simulations en virage étant réalisées à angle de vent constant par rapport au voilier, l'angle de gîte ϕ reste donc constant.

Un exemple de réponse en vitesse de changement de cap $\dot{\psi}$ à un échelon d'angle de safran α_s est donné Fig. 3.21. Cet exemple a été obtenu avec une vitesse de vent de 20 nd (vitesse du voilier 5,1 nd). L'origine des temps a été remplacée à l'instant où le safran est tourné de $\alpha_s = 20^\circ$

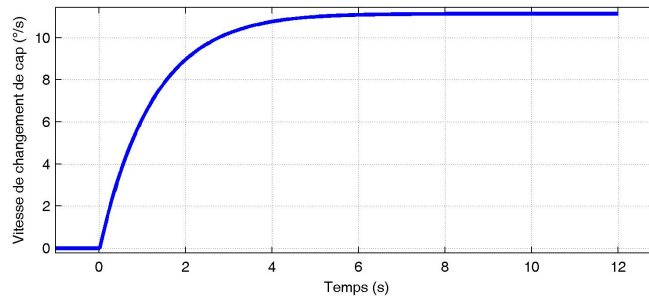


FIGURE 3.21 – Réponse en vitesse de changement de cap $\dot{\psi}$ à un échelon d'angle de safran de 20° (vitesse voilier : 5,1 nd)

Cette réponse correspond, en première approximation, à une réponse de type premier ordre, ce qui permet d'approximer la fonction de transfert en cap par :

$$\frac{\psi}{\alpha_s} = \frac{K}{s(1 + Ts)} \quad (3.23)$$

Ce modèle est similaire à celui proposé par Nomoto pour les navires motorisés [106, 92]. Dans les différentes simulations que nous avons réalisées, en modifiant la valeur de l'échelon de safran, la vitesse du vent (et donc la vitesse du voilier) ou l'allure (près, travers, large), nous avons constaté que le temps de réponse T variait assez peu et restait de l'ordre d'une seconde. Le paramètre K par contre

dépend assez fortement de la vitesse du bateau et, de manière non linéaire, de la valeur de l'échelon de safran en raison du passage d'un régime laminaire à un régime turbulent. A angle de safran constant, on observe en particulier que le terme K de la fonction de transfert, qui représente la vitesse de changement de cap en régime établi, diminue lorsque la vitesse du voilier diminue. Ceci n'est qu'une autre expression du fait, déjà constaté sur les courbes des figure 3.18 et 3.19, que la manœuvrabilité augmente avec la vitesse.

Notons enfin que le modèle de fonction de transfert en cap de l'équation 3.23 est formellement faux, en particulier du fait de la non linéarité forte de la vitesse en régime établi, introduite par les efforts hydrodynamiques du safran. Cette fonction de transfert fournit toutefois une approximation du comportement au premier ordre qui sera utilisée, en particulier pour guider le réglage des gains de l'asservissement de cap du chapitre 5.

Le simulateur numérique a également été utilisé afin d'évaluer la capacité du voilier à effectuer des manœuvres de virement de bord ainsi que pour estimer le coût en terme de perte de vitesse de ce type de manœuvre. Lors d'un virement de bord, le voilier est initialement à une allure de près avec le vent soufflant d'un côté du voilier. Le virement de bord consiste à changer de cap pour suivre une allure de près, mais avec le vent soufflant de l'autre côté du navire. Cette manœuvre nécessite donc d'amener la proue du bateau face au vent ce qui annule la force de propulsion, d'où une perte de vitesse.

Afin d'évaluer la capacité du voilier à effectuer des virements de bord ainsi que le coût d'une telle manœuvre, le scénario décrit sur la figure 3.22 a été réalisé en simulation : le voilier suit un cap consigne de $+45^\circ$ par rapport au vent. A l'instant $t = 0$ choisi comme origine des temps, la consigne de cap devient de -45° par rapport au vent. A cet instant, le voilier est à une vitesse stabilisée égale à V_{b0} . L'instant où le voilier atteint de nouveau, sur son nouveau cap, la vitesse de V_{b0} est noté t_0 . A cet instant, il a parcouru une distance d_2 en direction de son objectif, supposé se situer face au vent. La distance qu'aurait parcouru le voilier vers son objectif, sans changement de cap, pendant cette même durée t_0 , est notée d_1 . L'écart relatif, représentant la perte d'efficacité pour rejoindre l'objectif, est :

$$\eta = \frac{d_1 - d_2}{d_1}$$

Lors de ce virement de bord, l'asservissement de cap est réalisé avec un correcteur de type PID (voir §5.1).

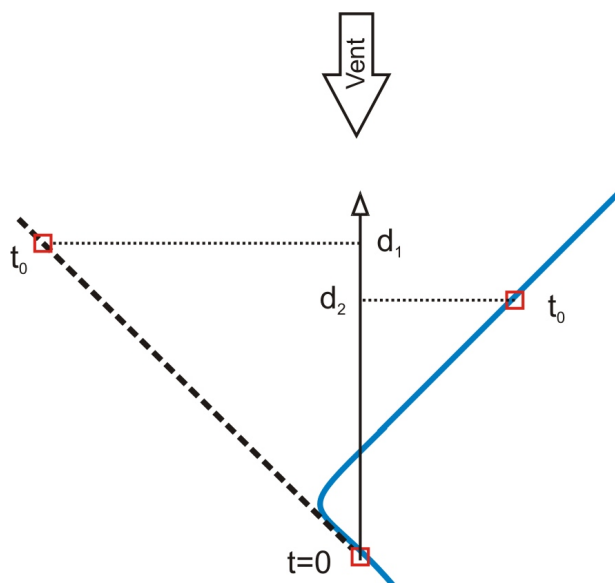


FIGURE 3.22 – Manœuvre de virement de bord

La perte de vitesse lors du virement de bord, réalisé ici à faible vitesse (5nd de vent, vitesse d'avance de 2,8 nd), est clairement visible sur la simulation présentée figure 3.23. On note également sur cette figure l'évolution de la gîte, qui devient quasi nulle lorsque le voilier se trouve face au vent (cap de 90°).

La perte d'efficacité pour différentes valeurs de vitesse de vent (et donc de vitesse du bateau), est donnée figure 3.24.

Sur la figure 3.24, on observe nettement que la perte d'efficacité augmente lorsque la vitesse du bateau, au moment du changement de bord, diminue. A vitesse du bateau plus élevée (au delà de 5nd), le coût en termes de temps pour rejoindre l'objectif devient faible et quasiment constant. Ces résultats sont liés à l'évolution de la manœuvrabilité : comme la manœuvrabilité du voilier augmente lorsque la vitesse d'avance augmente, le voilier franchit plus aisément le secteur angulaire correspondant au vent de face qui introduit une perte de vitesse.

Enfin, en réduisant en simulation la vitesse du vent, il est possible de déterminer la vitesse d'avance seuil à partir de laquelle le voilier ne sera plus en mesure de réaliser un virement de bord. En dessous de cette vitesse-seuil, le bateau se trouve face au vent, puis se met à dériver avant de reprendre un angle relatif au vent suffisant pour reprendre de la vitesse. Ce cas de figure correspond à un échec de la manœuvre de virement de bord. Avec les mêmes conditions de simulation

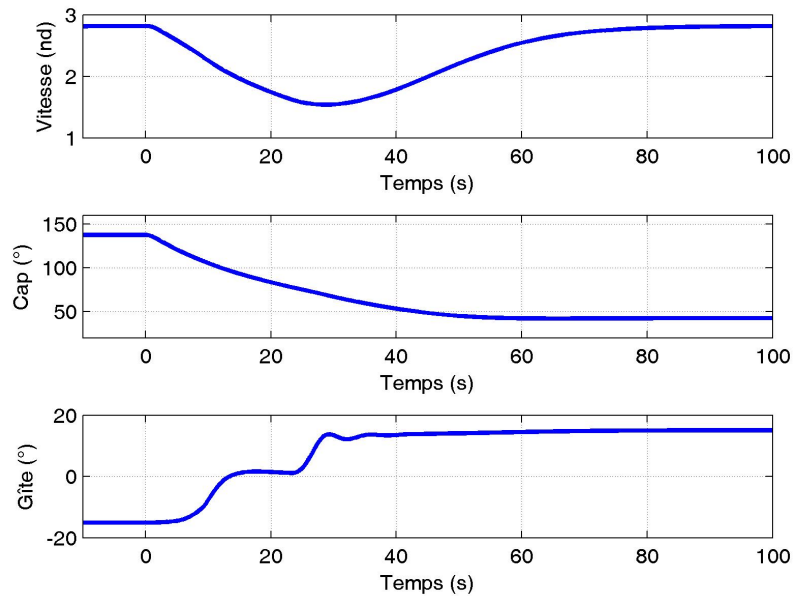


FIGURE 3.23 – Evolution de la vitesse, du cap et de la gîte lors d'un virement de bord

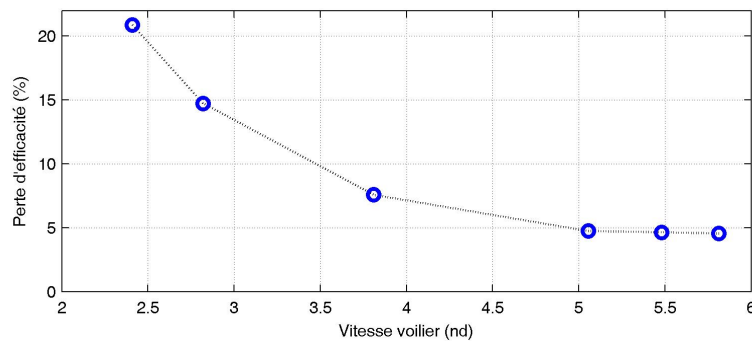


FIGURE 3.24 – Perte d'efficacité lors d'un virement de bord en fonction de la vitesse d'avance

que précédemment, nous avons déterminé que, pour pouvoir réaliser un virement de bord avec succès, il faut que la vitesse du vent soit au moins de $3nd$ ce qui correspond à une vitesse d'avance d'au moins $0,8nd$.

Soulignons enfin que la confiance qu'il est possible d'avoir dans les valeurs de la perte d'efficacité et de la vitesse limite pour réaliser un virement de bord avec succès, est en réalité assez faible. En effet, la mauvaise prise en compte des efforts aérodynamiques dans le simulateur, a une influence assez forte sur la fiabilité des valeurs quantitatives de perte d'efficacité. Lors de ces manœuvres de virement de bord, nous avons volontairement choisi des caps de $\pm 45^\circ$ pour les angles de remontée au vent qui nous semblent assez réalistes ; l'angle minimal de remontée au vent qu'il est possible de déterminer en utilisant le simulateur est lui de l'ordre de 15° , ce qui est assez largement sous-estimé. La perte d'efficacité réelle lors d'un virement de bord est donc très probablement plus importante que celle représentée figure 3.24. De même, la vitesse d'avance minimale pour réaliser un virement de bord est très vraisemblablement plus élevée que celle indiquée.

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles aérodynamiques et hydrodynamiques ainsi que les méthodes utilisés par le laboratoire de mécanique des fluides de l'Ecole Centrale de Nantes pour aboutir à un simulateur numérique de voilier capable de fonctionner en quasi temps réel sur un ordinateur de bureau. Cet outil numérique, qui simule le comportement du voilier développé dans le cadre du projet *Asarome*, a été utilisé à la fois pour valider les algorithmes de navigation présentés dans le chapitre 5 mais également pour analyser le comportement et les performances du voilier.

Afin de faciliter l'exploitation de ce simulateur, nous avons dans un premier temps développé une interface graphique utilisateur. Ensuite, nous avons exploité ce simulateur afin d'extraire un ensemble d'informations qui seront utilisées par la suite pour déterminer ou guider le choix d'un certain nombre de paramètres des algorithmes de navigation. Ces informations prennent la forme de courbes polaires (polaire de bôme, polaire de vitesse, polaire de gîte) mais également d'indices de mesure des performances en virage (Avance à 90° , rayon tactique, perte d'efficacité). L'ensemble de ces valeurs fournit des indications qui seront ré-exploitées pour le réglage de certains paramètres des algorithmes de navigation et de contrôle développés dans le chapitre 5.

Comme indiqué précédemment, même si les sorties du simulateur représentent bien le comportement global d'un voilier, ces valeurs doivent être utilisées avec une certaine prudence en particulier du fait de la mauvaise restitution par le simulateur des efforts aérodynamique sur les voiles. Les différentes valeurs et leur évolution (en particulier en fonction de la vitesse du vent), seront donc interprétées comme des tendances générales permettant de guider le choix des paramètres des algorithmes de navigation. La détermination des valeurs exactes de ces paramètres devra être réalisée à partir de tests effectués sur le prototype réel.

4

Architecture du système

La navigation autonome de voiliers dans des environnements marins, par nature non connus a priori et dynamiquement variables, requiert un ensemble de capteurs afin de percevoir cet environnement. A cet ensemble de capteurs, sont associés des actionneurs et des calculateurs embarqués sur lesquels sont implantés les algorithmes de navigation (décrits dans le chapitre 5) nécessaires pour que le voilier puisse atteindre des points de passage prédéterminés.

L'architecture logicielle est décomposée en plusieurs modules pour l'acquisition et l'interprétation des données ainsi que pour les lois de commande assurant la navigation du bateau.

Deux prototypes de voiliers robotisés ont été utilisés dans le cadre de cette thèse. Le premier, basé sur une coque commerciale de type Mini-J a été développé dans le cadre du projet *ASAROME* par la société Robosoft. Afin que le Laboratoire de Mécanique des Fluides puisse réaliser ces essais en bassin et puisse développer son simulateur numérique, ce voilier était stationné à Nantes. Pour effectuer plus aisément et plus rapidement les tests de validation des algorithmes de navigation, nous avons également intégralement réalisé un second prototype sur la base d'un modèle réduit radio-commandé. L'architecture informatique de ce second prototype est assez voisine de celle utilisée sur le voilier *Asarome* afin de rendre quasiment transparent le portage des algorithmes de navigation sur le calculateur du voilier *Asarome*.

Ce chapitre décrit les différents composants matériels et logiciels qui ont été intégrés sur ces plates-formes expérimentales afin de valider les algorithmes de navigation.

4.1 Architecture matérielle - Voilier *Asarome*

4.1.1 Voilier

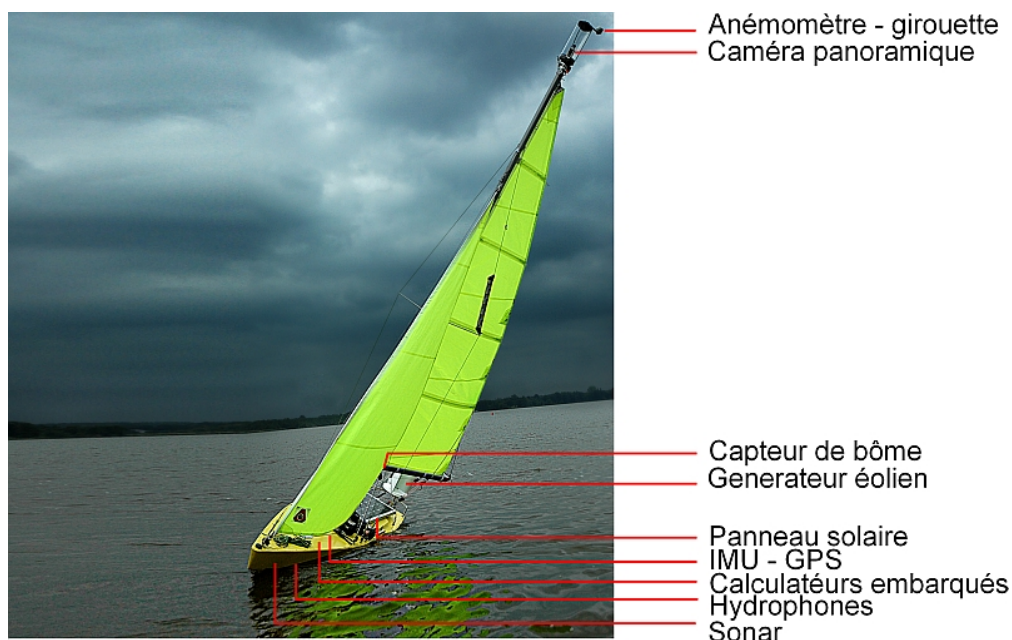


FIGURE 4.1 – Localisation des capteurs sur le voilier *Asarome*

Le voilier qui a été utilisé dans le projet *ASAROME* est un voilier commercial de type Mini-J (fig. 4.1). Ces bateaux sont des répliques au 1/7^e des voiliers de la classe J, construits par S. Leroux des Ateliers Composites de la Baie à St-Pol-de-Léon (Finistère). Il s'agit d'un quillard de sport monoplace inchavirable. Sa voilure est composée d'une grand-voile et d'un foc auto-vireur. Ses dimensions modestes (3,65 m de long, mat de 4,75 m de haut), sa manœuvrabilité élevée et la simplicité de son fonctionnement (écoute de grand-voile, palonnier de barre) en font un voilier bien adapté à une pratique de la voile, y compris par des personnes à mobilité réduite. Le Mini-J est d'ailleurs le support officiel du Championnat de France de Voile Handisport.

Les caractéristiques hydrostatiques de ce voilier sont données dans le tableau 4.1 ainsi que les caractéristiques du safran (tableau 4.2) et de la grand-voile (tableau 4.3).

Un bilan énergétique de consommation des équipements du voilier *Asarome*, fait apparaître un besoin en puissance de 80 W sous 12 V, soit un courant de 3,4 A

4.1. ARCHITECTURE MATÉRIELLE - VOILIER ASAROME

Déplacement	kg	223,3
Volume	m^3	0,2178
Longueur flottaison	m	2,7725
Largeur flottaison	m	0,7472
Tirant d'eau max	m	0,6319
Surface mouillée	m^2	2,4444
Surface flottaison	m^2	1,4980
Centre flottaison	m	1,9673
Xcc	m	2,0147
L_{WL}/B_{WL}		3,7107
X_{cb}/X_{cf}		1,3762

TABLE 4.1 – Caractéristiques hydrostatiques de la carène

Longueur	m	0,500
Largeur	m	0,250
Surface portante	m^2	0,125
Centre du safran X	m	3,285
Centre du safran Z	m	-0,140

TABLE 4.2 – Caractéristiques du safran

P (l. guidant)	m	4,75
E (l. bôme)	m	1,38
Surface Portante	m^2	3,30
Centre du voilure X	m	1,97
Centre du voilure Z	m	2,00

TABLE 4.3 – Caractéristiques de la grand voile

(voir tableau 4.4)

L'énergie est fournie par deux accumulateurs Plomb-Gel *Sonnenschein S12/60A*, spéciaux panneaux solaires, de 12 V 60 Ah (soit 2,6 MJ).

Ce pack de batterie est rechargé par un panneau solaire *Sunset AS60* de 1,0x0,45 m. Ce panneau solaire fourni une puissance crête de 60 W pour un courant nominal de 3,3 A. Sous des conditions d'ensoleillement moyennes, cette puissance est estimée à 30 W. En complément, un générateur éolien *ATMB 500* a été installé

Dispositif	% Utilisation	Puissance Moyenne
Codeur absolu angle de bôme	100%	2,4W
Moulinet	5%	10,5W
Vérin	50%	15W
MTI-G	100%	0,7W
Calculateur Robosoft	100%	3,3W
Calculateur Perception	100%	20W
Calculateur Commande	100%	12W
Switch ethernet et AP WiFi	100%	10,6W
Camera panoramique	100%	3W
Sonar	100%	4W
Girouette	100%	0,6W
Loch	100%	0,5W
TOTAL		82,6W

TABLE 4.4 – Bilan de puissance des équipements embarqués dans le voilier *Asarome*

sur une potence sur le pont arrière du voilier. Cette éolienne, pour un vent moyen de 15 nd, fournit environ 0,7 A sous 12 V, soit 8,4 W.

Au total, l'éolienne et le panneau solaire fournissent donc, et selon les conditions climatiques, environ la moitié des besoins de puissance : 40 W, soit 3,4 A. Par conséquent, la pack batterie doit compenser le différentiel de consommation en fournissant également environ 3,4 A par heure d'utilisation. Dans les conditions précédentes, cela assure donc au voilier une autonomie d'environ 35 h.

Les différents composants constituant l'architecture matérielle du voilier *Asarome* ainsi que les protocoles de communication entre ces blocs sont représentés figure 4.2.

Cette architecture peut être décomposée en trois grands sous-ensembles. Un premier, composé d'un système de vision panoramique, d'un sonar, d'hydrophones et d'un calculateur embarqué, est chargé de la perception de l'environnement et de la détection des obstacles. Un second sous-ensemble qui assure la navigation du voilier regroupe les capteurs de navigation (centrale inertielle, GPS, capteur de vent, loch) et un calculateur dédié. Un troisième sous-ensemble regroupe un calculateur en charge de la gestion bas niveau des capteurs et des actionneurs.

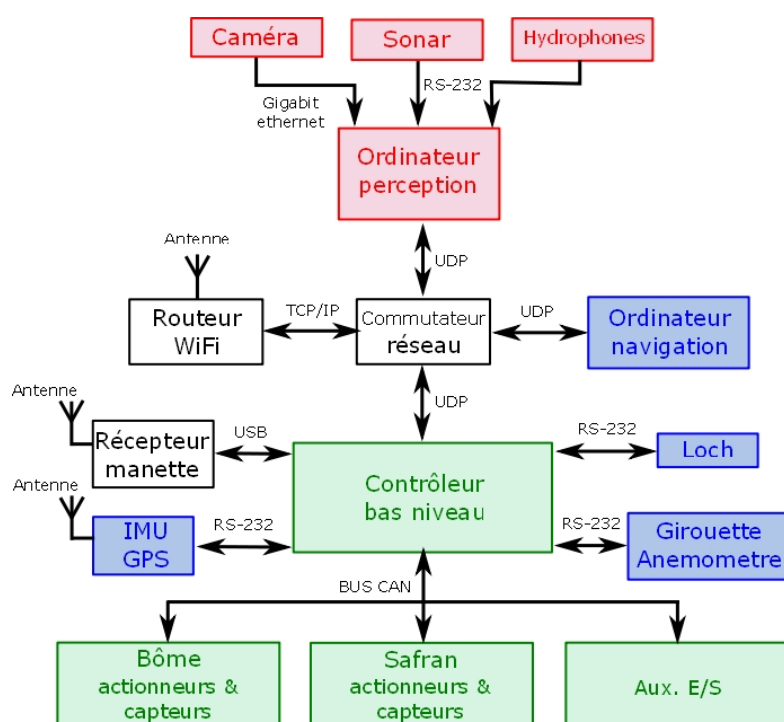


FIGURE 4.2 – Composants du système de perception, de navigation et de contrôle du voilier *Asarome*

Ces différents constituants sont décrits dans les sections suivantes.

4.1.2 Composants du système de perception

Le système de perception (en haut et en rouge sur la figure 4.2), permet de détecter les obstacles dangereux pour le bateau, qu'ils soient au-dessus ou en-dessous de la surface de l'eau. L'utilisation de ce système de perception pour la localisation d'obstacles a fait l'objet de la thèse de Yan Guo [107]. Comme nous avons contribué à la mise en œuvre pratique de ces capteurs, nous ferons ici une brève description des composants de ce système et de leur articulation avec les autres sous-ensembles de l'architecture embarquée dans le voilier *Asarome*.

Système de vision panoramique

Un des composants de ce bloc perception est un système de vision panoramique. Ce système est composé d'une caméra IP associée à un miroir. L'ensemble est monté dans un tube étanche et monté en tête de mât.

La caméra du système de vision panoramique est une caméra Prosilica IP GE1350C (fig. 4.3). Cette caméra a une résolution de 1,4 Megapixels et une connexion basée sur le protocole Gigabit Ethernet ce qui permet d'envoyer efficacement les images prises par son capteur CCD Sony à balayage progressif. Le GE1350 est capable de prendre 20 images par seconde avec une résolution de 1360x1024px [108].



FIGURE 4.3 – Caméra Prosilica GE1350C

Afin d'avoir une vue panoramique de l'environnement, la caméra est montée dans une structure contenant un miroir convexe. Ce système catadioptrique est illustré figure 4.4. Il est composé d'une fermeture étanche (1) d'un support de miroir avec points de repère (2), d'un miroir convexe (3), d'une caméra Prosilica (4), d'un support de caméra (5) et d'un tube de plexiglas.

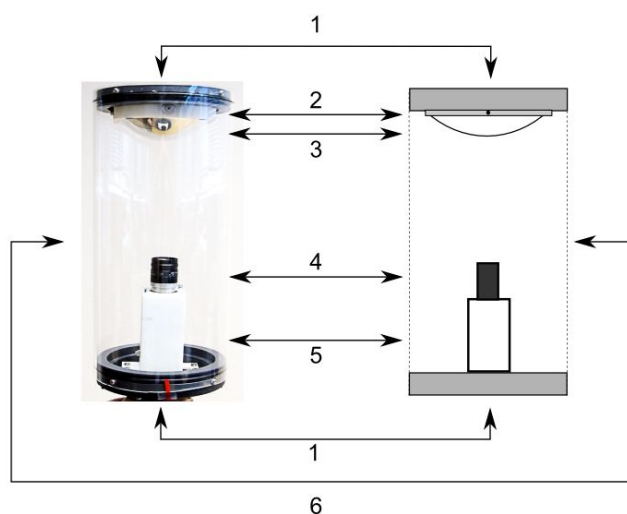


FIGURE 4.4 – Système de vision panoramique

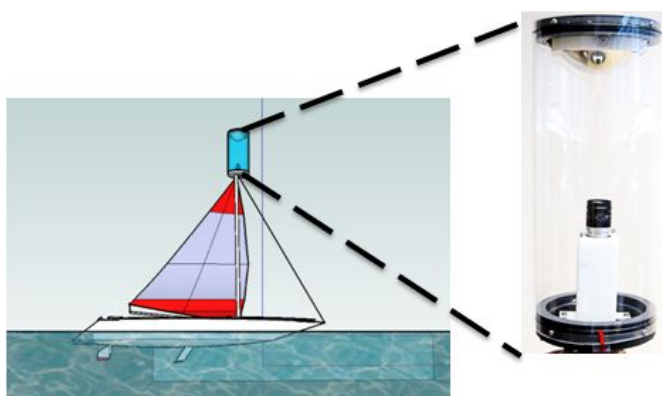


FIGURE 4.5 – Capteur catadioptrique en haut du mât

L'ensemble du système catadioptrique est placé au sommet du mât du voilier (fig. 4.5). A cette hauteur (plus de 5 m au dessus de la surface de l'eau), le système permet la détection d'obstacles statiques et dynamiques situés dans un rayon de 290 m. Un exemple d'image capturée par la caméra panoramique est donnée figure 4.6.

Sonar

En complément au système de vision panoramique, un sonar *Micron DST* de Tritech [109] a également été utilisé pour la détection d'obstacles. Ce sonar com-

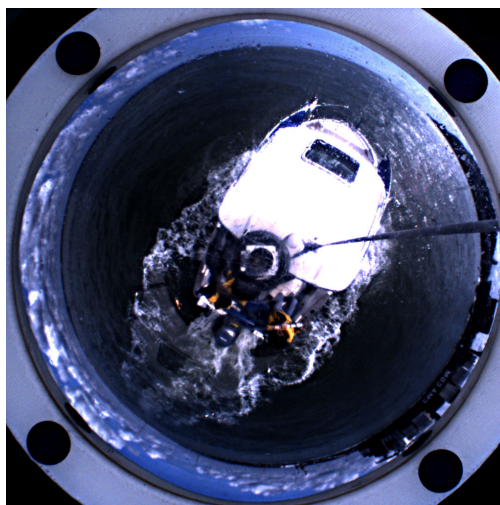


FIGURE 4.6 – Exemple d'image panoramique

pact (cylindre d'environ 80 mm de haut pour un diamètre de 69 mm, voir figure 4.7) est fixé dans la partie inférieure de la quille. Le Micron DST peut être contrôlé et configuré par un ordinateur via les protocoles RS232 et RS485. Dans notre cas, le protocole RS232 a été choisi pour deux raisons : la distance capteur-calculateur dans le prototype qui ne représente pas une contrainte, pour ce protocole ainsi que sa compatibilité avec les interfaces existant sur le calculateur embarqué de perception.



FIGURE 4.7 – Sonar Micron DST de Tritech

La distance de détection du sonar peut être réglée entre 2 m et 100 m et son angle de balayage entre 1° et 360°.

Hydrophones

Un hydrophone a été placé de chaque côté de la coque. Ces hydrophones, de type *H2a*, de *Aquarian Audio Products* [110], possèdent une bande passante

de $[10\text{ Hz} - 100\text{ kHz}]$ et une sensibilité de -180 dB ($1\text{ V}/\mu\text{Pa}$). Ils sont omnidirectionnels dans le plan horizontal et peuvent être utilisés jusqu'à 80 m de profondeur.

Ces hydrophones sont reliés à l'ordinateur de perception via l'entrée analogique standard (prise *mic*). Le programme d'acquisition, écrit en C, utilise la bibliothèque *ALSA* qui permet d'acquérir les données avec une fréquence d'échantillonnage de $44,1\text{ kHz}$.

Les hydrophones H2a, placés à une profondeur comprise entre 50 cm et quelques mètres, sont utilisés pour des applications traditionnelles d'écoute du milieu marin. Après analyse du signal acoustique stéréo, ils peuvent fournir une estimation de l'état de la surface de la mer ainsi que la localisation et l'identification de certaines sources sonores telles que des moteurs de bateaux à proximité.

Y. Guo et B. Gas ont présenté dans [111] des algorithmes pour la classification de signaux audio sous-marins. Ils ont comparé deux classificateurs et quatre méthodes de codage de signaux faisant suite au travail commencé par Lim [112], [113]. Ces hydrophones n'ont pas pu être exploités dans le cadre de la thèse de Y. Guo pour la localisation de sources sonores.

Ordinateur de perception

Le bloc dédié à la perception est le plus exigeant en termes de puissance de calcul. Les capteurs extéroceptifs (caméra panoramique, sonar et hydrophones), sont directement reliés au PC embarqué de type ARPEX-2610 mini ITX PC Box de Arbor [114]. Ce PC au format industriel 2U sous Linux embarque un processeur Atom N270. Cet ordinateur rassemble en continu les données brutes issues des capteurs pour les transformer en variables utiles à la localisation des obstacles. Dans ce bloc, les données sont homogénéisées et filtrées pour être utilisées dans un processus de fusion de données afin d'aboutir à une localisation précise des obstacles. Les algorithmes pour réaliser cette fusion de données et la détection d'obstacles sont décrits dans [107].

Cet ordinateur échange par ailleurs des informations avec le PC embarqué chargé de la navigation en lui fournissant périodiquement, dans des trames UDP, une grille d'occupation de l'espace.

4.1.3 Composants du système de navigation

Le système de navigation (en bleu sur le schéma de la figure 4.2) est composé de plusieurs capteurs permettant d'estimer la position et l'état du voilier ainsi que l'état de l'environnement, en particulier la direction et la vitesse du vent. Cet ensemble de capteurs est lié à un calculateur dédié à la navigation du voilier.

Centrale inertielle et GPS

Afin de connaître la position et l'orientation du voilier, une centrale inertielle et un récepteur GPS ont été embarqués dans le système. Le capteur utilisé est une *MTI-G* de *Xsens* (fig. 4.8). Ce capteur compact (58x58x33 mm, pour un poids de 70 g) intègre un gyromètre 3 axes, un accéléromètres 3 axes, un magnétomètre 3 axes, un baromètre ainsi qu'un récepteur GPS [115]. Un filtre de Kalman est également directement implémenté dans la MTI-G et permet de filtrer les données brutes selon plusieurs scénarios, adaptés au champ d'application (automobile, aérien, naval...).

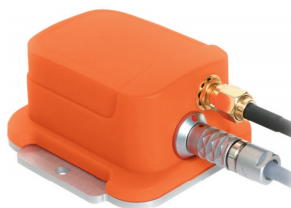


FIGURE 4.8 – Centrale inertielle avec GPS intégré MTI-G de Xsens

Les récepteurs GPS communiquent usuellement selon le standard *NMEA 0183* sur une interface série RS232 ou USB. Les informations transmises dans les trames *RMC* sont : l'heure(UTC), la latitude, la longitude, la date, et la vitesse. Ici, le récepteur GPS est directement intégré dans la MTI-G. Les informations GPS sont donc transmises dans la trame de communication spécifique à la centrale inertielle utilisée (voir figure 4.9). Cette trame est paramétrable : l'utilisateur peut définir, par une trame d'initialisation spécifique, le contenu (type de donnée et format) de la trame envoyée par la centrale inertielle ainsi que sa cadence d'envoi.

Dans l'exemple de la figure 4.9, le mode quaternion (q_0 à q_4) pour la représentation des rotations a été sélectionné. La trame contient également les informations GPS de position (Latitude, Longitude, Altitude) et de vitesse.

4.1. ARCHITECTURE MATÉRIELLE - VOILIER *ASAROME*

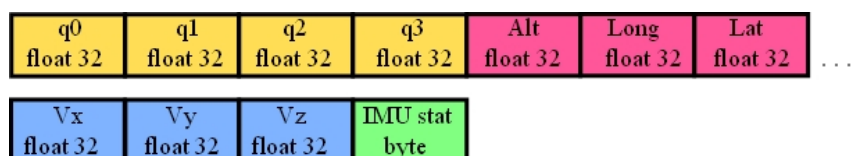


FIGURE 4.9 – Exemple de trame de données Xsens

La centrale inertielle - GPS est directement liée à l'ordinateur de navigation par son port USB (fig. 4.21).

Afin de valider la qualité des données reçues de la centrale inertielle, en particulier pour le nord magnétique, nous avons réalisé deux essais.

Pendant le premier essai, d'une durée de deux heures, la centrale inertielle était fixe, parallèle au sol, à ciel ouvert et sans aucune source de perturbation électromagnétique connue. Ces données, représentées figure 4.10, ont un écart type de $0,57^\circ$ et ne présentent pas de dérive significative sur la durée de l'enregistrement.

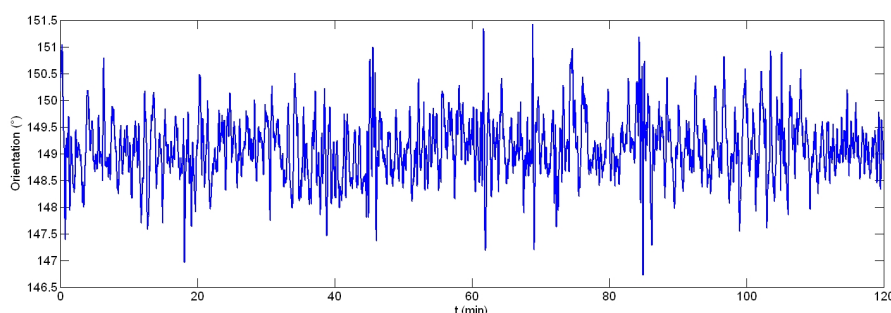


FIGURE 4.10 – Test de dérive du nord magnétique de la centrale inertielle à ciel ouvert

Pour le deuxième essai, la centrale inertielle a été placée à l'intérieur de la coque du bateau afin de vérifier si les équipements embarqués ne produisaient pas de perturbations électromagnétiques significatives. Ce deuxième essai, d'une durée de deux heures également, a été réalisé sur la terre ferme avec la centrale à sa place normale dans la coque du voilier. Pour des raisons de disponibilité du voilier, ce test n'a pas pu être réalisé pour le voilier *Asarome*, mais uniquement sur la maquette de voilier. Lors de ce test et afin de reproduire les conditions réelles de navigation, le voilier était alimenté par batteries, les ordinateurs embarqués allumés et les actionneurs de safran et de bôme actionnés pendant 6 s, 2 fois par minute. Les données obtenues (fig. 4.11) montrent un écart type similaire ($0,34^\circ$),

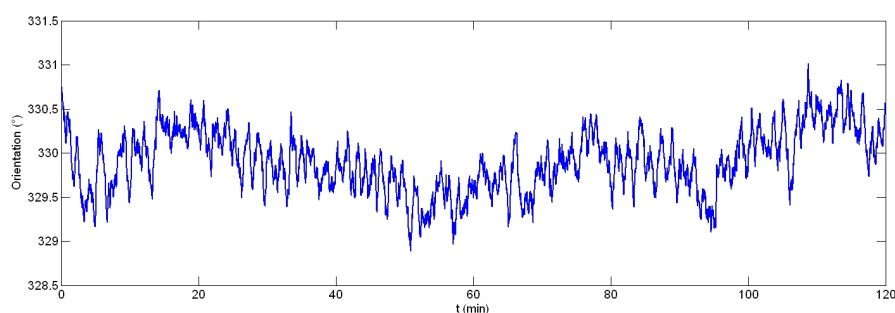


FIGURE 4.11 – Test de dérive du nord magnétique de la centrale inertielle à l'intérieur du bateau

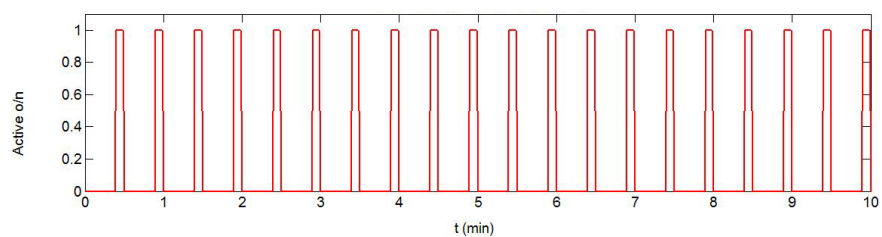
sans dérive significative du cap. Sur les figures 4.12(a) et 4.12(b), qui représentent sur une échelle temporelle plus fine la commande des moteurs et le nord magnétique, on ne note pas de corrélation entre l'actionnement des moteurs et la valeur du nord magnétique, ce qui confirme que les dispositifs électroniques et électromécaniques embarqués ne perturbent pas de façon significative la valeur mesurée du nord magnétique.

Pour le test du GPS, nous avons enregistré pendant 2 h les données de latitude et longitude, avec son antenne fixée dans un endroit totalement dégagé. Nous n'avons pas constaté d'erreur considérable pour les valeurs de position (fig. 4.13). Les valeurs de latitude et longitude ont respectivement un écart type de 2,95m et 1,95m.

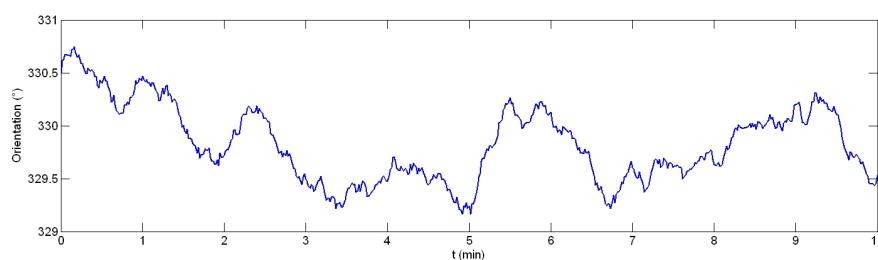
Anémomètre et girouette

La navigation à voile est fondamentalement soumise à l'influence du vent. Pour connaître la vitesse et la direction de ce dernier, le robot est équipé d'une girouette-anémomètre *Rowind CV3F* (fig. 4.14). Le capteur ROWind est un anémomètre à ultrasons fournissant la vitesse et l'angle de vent, ainsi que la température de l'air. Ce capteur peut être exploité par tous les appareils utilisant le standard *NMEA 0183* ou un ordinateur via une interface RS232. Les caractéristiques principales de ce capteur sont [116] :

- Plage de fonctionnement (vitesse) : 0,5 à 99,5 nœuds
- Résolution (vitesse) : 0,1 nœud
- Plage de fonctionnement (angle) : 0 à 360°
- Résolution (angle) : 1°



(a)



(b)

FIGURE 4.12 – Test de dérive du nord magnétique de la centrale inertielle à l'intérieur du bateau avec sources de bruit électromagnétique. (a) État des servomoteurs et (b) Nord magnétique mesuré

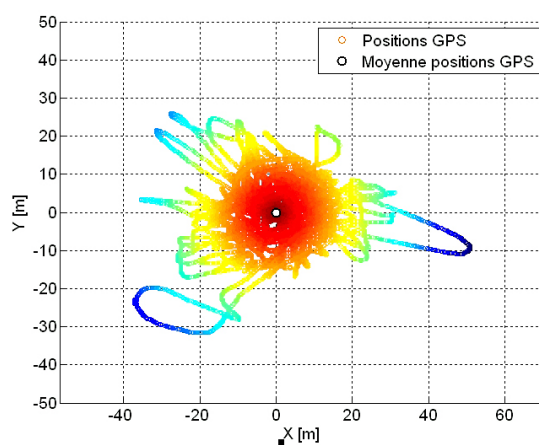


FIGURE 4.13 – Dispersion des données de position GPS

- Compensation de la gîte jusqu'à 45°



FIGURE 4.14 – Girouette-anémomètre ROWind CV3F

La girouette-anémomètre fournit les données de vent apparent. Afin d'obtenir les caractéristiques du vent réel, nécessaires l'exploitation des polaires de vitesses dans les algorithmes de navigation, il est nécessaire de recalculer la vitesse et l'angle de vent réel à partir de la vitesse et de l'angle de vent apparent mesurée par le capteur. Ce calcul s'effectue aisément en inversant les équations 3.10 et 3.11 (cf. §3.2.1, page 51).

Loch

Le capteur Furuno CPTEVI-1 est un loch à ailettes. Il fournit à l'ordinateur bas niveau la vitesse du voilier par rapport à l'eau ainsi que la température de l'eau. Cette information est importante car elle permet d'estimer le courant par comparaison des vitesses mesurées par un GPS (vitesse du bateau par rapport à la terre) avec la vitesse mesurée par le loch (vitesse du bateau par rapport à l'eau) [117].

Ordinateur pour la navigation

Le calculateur embarqué dédié aux tâches de navigation telles que la sélection du cap, de l'angle d'incidence des voiles et de l'angle du safran est fourni par Lipert. Ce PC embarqué sous Linux est au format PC-104-Plus avec un processeur Intel Atom N270 [118].

Les capteurs de navigation décrits précédemment sont fonctionnellement rattachés au PC de navigation. Pour des raisons d'efficacité et de facilité d'intégration, ils sont en réalité physiquement reliés au PC embarqué chargé de la commande et de la gestion bas-niveau. Le calculateur de navigation dialogue ensuite via un lien

Ethernet avec les deux autres calculateurs embarqués dans le voilier pour récupérer, entre autres, les informations issues des capteurs de navigation.

4.1.4 Composants du système de gestion bas niveau

Capteurs et actionneurs pour la grand-voile et le safran

La position angulaire de la voile et du safran sont contrôlés par des actionneurs très différents.

Le safran est actionné grâce à un vérin électrique linéaire Linak LA12-300N (intégrant un capteur de position) (voir figure 4.15) via un mécanisme de transformation de mouvement. La relation liant l'angle de safran à l'élongation du vérin est donnée en Annexe A.3.

L'angle de grand-voile est piloté par un moulinet de pêche électrique, étanche, Kristal XL630 (fig. 4.16) monté sur le pont du voilier. L'angle de bôme (et donc l'angle de grand-voile) est mesuré par un codeur optique absolu IP 67 de *Baumer Ivo*. Ce codeur est fixé au mat du voilier. Une tige, solidaire de l'axe, reprend l'angle de bôme via une fourchette fixée sur la bôme. Le moulinet est piloté soit de manière à enrouler l'écoute¹ de grand-voile de sorte à ramener celle-ci dans l'axe du bateau soit en le débrayant ce qui ouvre la voile (augmente l'angle de voile) sous l'effet du vent.



FIGURE 4.15 – Vérin Linak LA12-300N



FIGURE 4.16 – Moulinet électrique Kristal XL630

1. Ecoute : sur un voilier, une écoute est un cordage servant à régler l'angle de la voile par rapport à l'axe longitudinal du voilier et en conséquence l'angle d'incidence du vent sur la voile. (Source : Wikipédia)

Entrées/Sorties auxiliaires

Un jeu d'entrées/sorties est réservé aux signaux lumineux de signalisation (deux de chaque côté du pont et un troisième en haut du mât) ainsi qu'à la gestion de l'arrêt d'urgence. Ces entrées sorties auxiliaires permettent également de piloter manuellement le voilier soit via une manette sans fil de Xbox, soit par une télécommande HF F730 de Jay Electronique, d'une portée de 500 m fonctionnant dans la bande des 433 MHz. Cette dernière intègre également un arrêt d'urgence.(fig. 4.17).



FIGURE 4.17 – Manette Microsoft Xbox sans fil et télécommande Jay

Ordinateur pour la gestion bas-niveau

Le contrôleur de plus bas niveau, le troisième ordinateur embarqué, est un *HiCO.SH7780-SBC* d'*Emtrion* avec un processeur Renesas Super H SH7780@400 MHz et contrôleur de bus CAN intégré [119]. Ce dernier, mis en place par Robosoft, est destiné à l'asservissement de l'angle de voile et de l'angle de safran. Il permet également de gérer les différents capteurs de navigation (centrale inertielle, GPS, anémomètre à ultrasons, loch), les capteurs d'angle de bôme et de safran ainsi que la commutation entre les modes de pilotage manuel et automatique.

4.2 Architecture logicielle - Voilier *Asarome*

L'architecture logicielle complète est donnée figure 4.18.

Le module de navigation détermine, à partir des données de l'environnement et de l'état du système, le cap à suivre ainsi qu'un réglage adéquat des voiles. Ces consignes sont transmises au bloc de commande qui détermine l'angle de bôme et l'angle de safran permettant d'atteindre ces valeurs consignes. Ces deux blocs logiciels sont physiquement implémentés sur le calculateur de navigation (cf §4.1.3,

4.2. ARCHITECTURE LOGICIELLE - VOILIER ASAROME

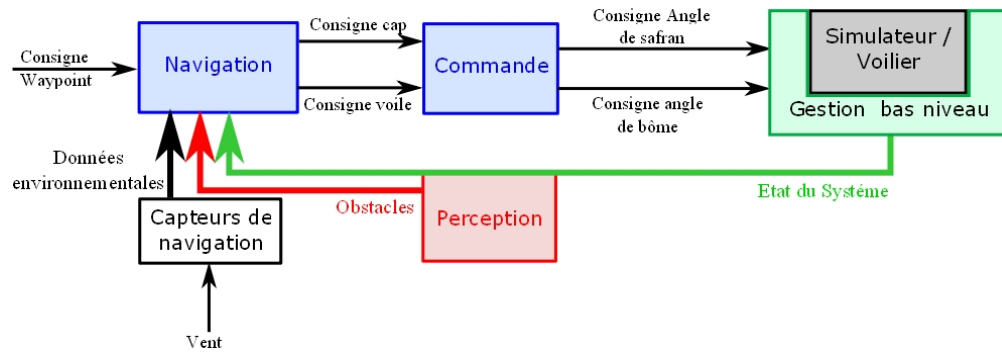


FIGURE 4.18 – Modules logiciels du voilier *Asarome*

page 92).

Le module de perception traite les données brutes des capteurs afin de construire une carte des obstacles. Il est physiquement implémenté sur le calculateur de perception (cf §4.1.2, page 87).

Le dernier module correspond à la gestion bas niveau des capteurs et des actionneurs, physiquement implémenté sur le calculateur correspondant.

Enfin on trouve, sur le schéma de la figure 4.18 un bloc correspondant au voilier. Ce bloc donne l'évolution du bateau en fonction des différentes entrées. Il peut être soit le voilier lui même, soit le simulateur numérique décrit dans le chapitre 3, §3.4.

Le contenu de ces différents modules logiciels sont décrits brièvement ci-dessous.

4.2.1 Module de gestion bas-niveau

Ce module de gestion bas-niveau réalise l'interface avec les différents capteurs et les mises à l'échelle des données. Dans ce module de gestion bas niveau sont également réalisés l'asservissement de l'angle de la grand-voile, déjà décrit ci-dessus, ainsi que l'asservissement de l'angle de safran par un correcteur proportionnel.

Un serveur UDP est également implémenté dans ce module afin de transmettre les données capteurs vers les module de navigation/commande ou vers le module de perception et afin de recevoir les consignes en provenance du module de navigation/commande. Sur ce serveur UDP, quatre "*services*" sont implémentés correspondant chacun à un bloc de capteurs. On a ainsi :

- un service lié aux capteurs du voilier (angle de bôme, de safran, état des différentes entrées/sorties auxiliaires pour les signaux lumineux et les boutons des télécommandes,...),
- un service lié à la centrale inertielle,
- un service lié au loch
- un service lié à l'anémomètre.

Les informations de chaque service sont transmises dans des trames UDP avec un identifiant différent. Chaque trame envoyée est datée par le serveur afin d'assurer la cohérence temporelle des données.

Un client UDP (ici : un module de navigation ou de perception) peut s'abonner à chaque service en envoyant une trame spécifique au serveur et en spécifiant la cadence d'envoi par le serveur de chaque trame de service.

4.2.2 Module de perception

Les entrées de ce module de perception sont la position et l'orientation du voilier (obtenues en s'inscrivant au service correspondant sur le serveur UDP) ainsi que les données visuelles et acoustiques. Les différents capteurs utilisés pour l'acquisition de ces données ont des fréquences d'acquisition, des distributions spatiales et des résolutions différentes. Dans ce module de perception, il est donc nécessaire, au préalable, de rassembler et d'homogénéiser toutes les données provenant de ces capteurs. Cette tâche est effectuée par le sous-système d'acquisition de données du module de perception. Chaque donnée est horodatée à partir de l'horloge du système pour avoir une datation cohérente de toutes les mesures.

L'exploitation de ces différents signaux capteurs pour la localisation d'obstacles a fait l'objet de la thèse de Y. Guo [107]. Nous en donnons ici brièvement le contenu.

La détection d'obstacle se base en partie sur le système de vision panoramique. Pour cela, une calibration initiale du système catadioptrique permet d'obtenir une table de correspondance entre les coordonnées polaires d'un point quelconque dans un plan moyen autour du voilier et les coordonnées du pixel image correspondant. Un exemple de cette correspondance est donné figure 4.2.2, pour une hauteur entre la caméra et le plan moyen de 1,6 m). Dans ce cas, le plan moyen est perpendiculaire à l'axe principal du système de vision panoramique.

Les données issues de la centrale inertielle sont ensuite utilisées pour corriger cette estimation de distance afin de tenir compte de la non- perpendicularité entre

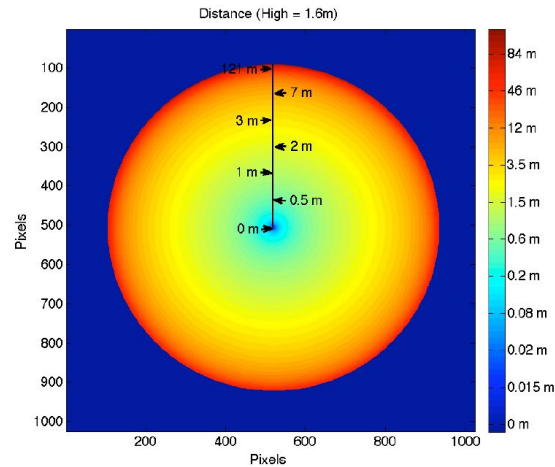


FIGURE 4.19 – Estimation des distances pour chaque pixel dans l'image

le plan moyen de la surface de l'eau et l'axe principal du capteur de vision due à la gîte et au tangage du voilier.

La détection des obstacles est ensuite réalisée à partir de la méthode colorimétrique décrite dans [120], permettant d'isoler un objet du fond de l'image à partir de l'identification de la signature du fond. Des informations plus complètes sur la calibration de ce système de vision et sur son exploitation pour la localisation d'obstacles peuvent être trouvées dans [107].

La détection d'obstacle se base également sur les données sonar. Pour la détection des obstacles, une technique de filtrage simplifiée est utilisée : toutes les données (échos) ayant une puissance et une taille inférieure à un seuil prédéterminée sont négligées et, en conséquence, les groupes de pixels qui n'ont pas été rejetés représentent des obstacles détectés. Sur ces groupes de pixels, le barycentre et la taille de chaque obstacle détecté sont calculés.

Un exemple de relevés expérimentaux obtenus avec ce sonar est présenté figure 4.20. Pour l'obtention de ces données, le sonar a été placé 60 cm en-dessous de la surface de l'eau, la distance de détection est réglée à 20 m. Le secteur angulaire balayé est de -90° à $+90^\circ$ avec une résolution angulaire de 2° . Dans ce cas, un seul obstacle est détecté, un panneau réfléchissant de 80 cm. L'empreinte de l'amer est illustré au niveau de la partie inférieure de l'image.

Une dernière étape pour la localisation des obstacles est réalisée en fusionnant les résultats de la détection issue du système de vision panoramique et du sonar

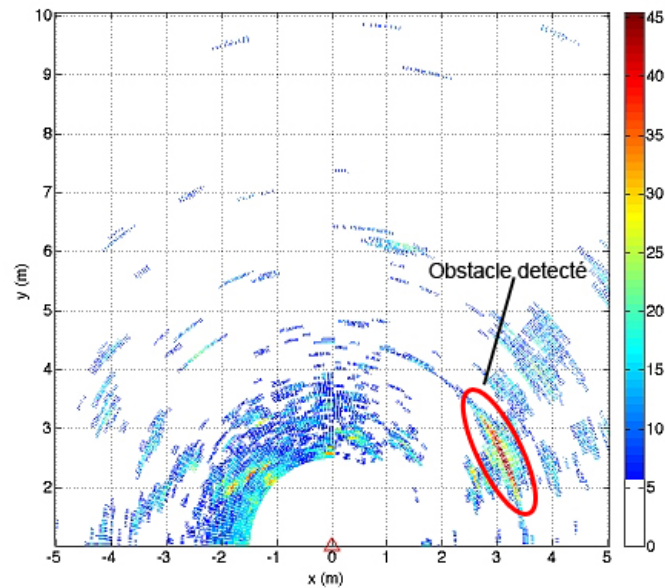


FIGURE 4.20 – Exemple d'image sonar

par une technique de pondération.

Enfin, une carte des obstacles est transmise périodiquement du module de perception vers le module de navigation dans une trame UDP.

4.2.3 Module de navigation et de commande

Le rôle du bloc de navigation est de fournir au module de commande un cap de référence et un réglage de voile qui a son tour se charge de déterminer les consignes d'angle de safran et d'angle de bôme qui seront transmises au module de gestion bas-niveau. La détermination de ces grandeurs se base d'une part sur l'état du voilier et les données des capteurs de navigation (obtenues dans les trames de service correspondantes, après inscription préalable au service sur le serveur UDP du module de gestion bas-niveau) et d'autre part sur la grille d'occupation transmise par le module de perception. Les consignes de safran et d'angle de bôme sont transmises au module de gestion bas-niveau, toujours dans des trames UDP.

Les algorithmes utilisés dans ce module de navigation et de commande sont détaillés dans le chapitre 5 suivant.

4.3 Architecture matérielle - Voilier à échelle réduite

L'architecture matérielle du modèle réduit est une simplification de celle du voilier *Asarome*, avec des caractéristiques équivalentes de calcul et de commande mais sans la partie perception (fig. 4.21).

Cette section présente d'abord les caractéristiques du bateau utilisé puis décrit la disposition, l'interconnexion et les interactions entre les composants électroniques ainsi que la description des blocs fonctionnels des programmes de contrôle.

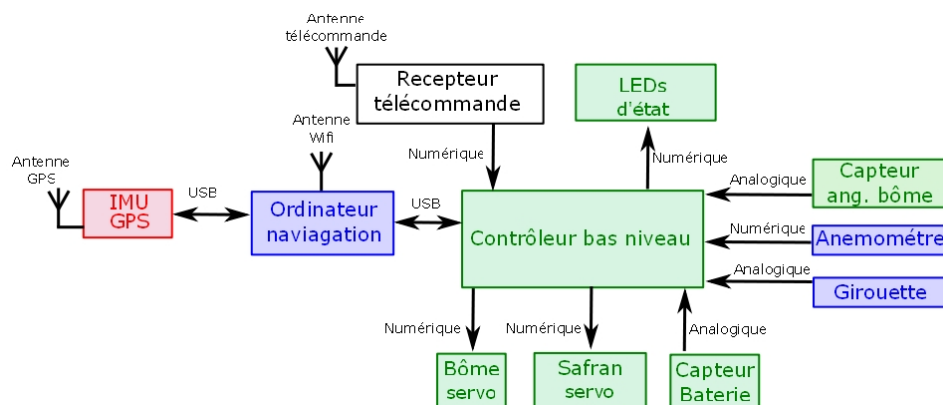


FIGURE 4.21 – Composants du système de navigation et de contrôle du voilier à échelle réduite

4.3.1 Voilier

Le modèle radio-commandé qui a été choisi est un modèle *Smaragd* de chez *Robbe* (fig. 4.22). Le choix s'est porté sur ce modèle principalement en raison de sa taille qui facilite l'intégration des composants matériels.

Les caractéristiques générales de ce bateau sont présentées dans le tableau 4.5. Il est équipé d'une grand-voile et d'un foc commandé par le même actionneur.

La structure d'origine du bateau a été modifiée afin, d'une part, de faciliter son transport et, d'autre part, de rendre possible l'intégration des éléments matériels



FIGURE 4.22 – Voilier à échelle réduite

Largeur	m	1,38
Longueur	m	0,36
Tirant d'eau	m	0,30
Hauteur du mât	m	1,80
Hauteur total	mm	2,20
Surface de voile	m^2	0,8
Déplacement	kg	12
Poids du ballast	kg	8

TABLE 4.5 – Caractéristiques du voilier à échelle réduite

nécessaires à son automatisation.

Afin de faciliter le transport du voilier, nous avons réalisé une pièce d'adaptation pour rendre démontable la quille-ballast, sans bien sûr perdre l'étanchéité de l'habitacle. La figure 4.23(a) montre la pièce d'adaptation qui a été conçue. Cette pièce a été usinée dans un bloc d'aluminium tout en respectant le profil hydrodynamique de la quille. La figure 4.23(b) montre la pièce d'adaptation fixée sur la coque et la quille-ballast prête à être fixée.

La seconde modification apportée à la structure de bateau a consisté à reprendre le pont arrière. En effet, à l'origine, la taille des écoutilles a été conçue pour permettre le passage des deux servomoteurs et du récepteur de la télécommande. Le

4.3. ARCHITECTURE MATÉRIELLE - VOILIER À ÉCHELLE RÉDUITE

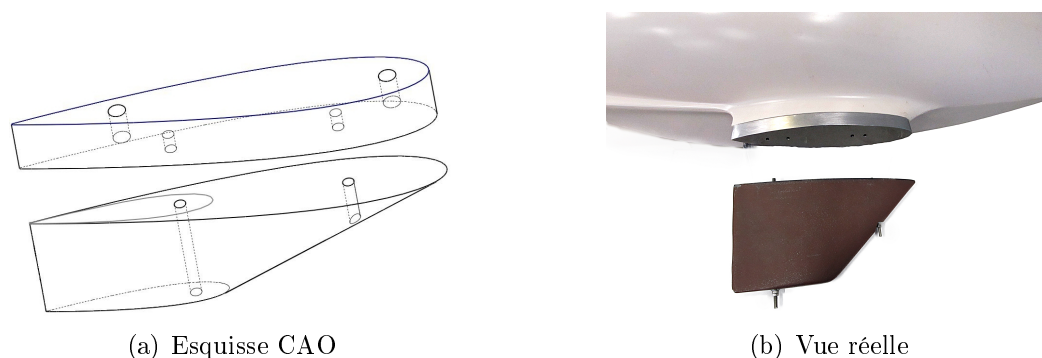


FIGURE 4.23 – Adaptation de la quille/ballast pour le transport

Le pont arrière a été repris pour agrandir ces écoutilles et y loger des boîtiers étanches IP-67. Ces deux écoutilles sont situées afin de permettre l'accès aux actionneurs et au système mécanique du safran pour la première et pour permettre l'accès aux actionneurs et aux systèmes d'écoute pour la seconde. Cette deuxième écoutille permet également de passer les ordinateurs embarqués, les capteurs et les batteries. Une vue générale du pont arrière avec ses écoutilles est donnée figure 4.24.

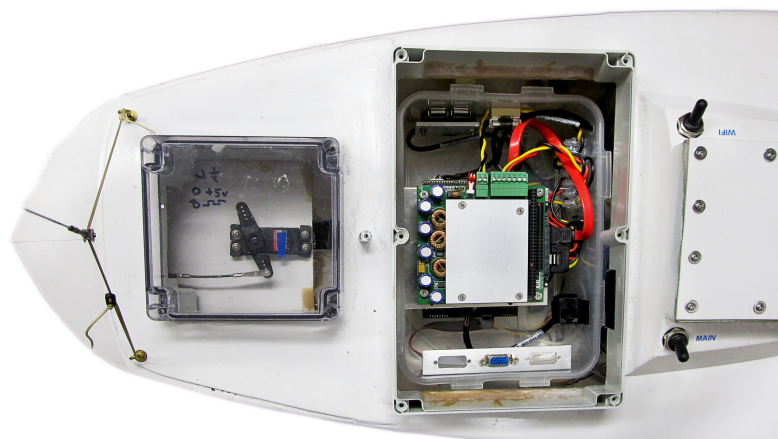


FIGURE 4.24 – Pont arrière du bateau et accès étanches

Dans ce prototype la source de puissance électrique est une batterie de type plomb-acide de 12V, 2,9 Ah qui donne au voilier une autonomie d'environ 2 h.

4.3.2 Composants du système de navigation

Les composants du système de navigation sont similaires à ceux embarqués sur le voilier *Asarome* à l'exception du loch qui n'a pas été intégré sur le modèle réduit. Nous utilisons la même centrale inertielle *MTi-G* avec GPS intégré et le même calculateur embarqué au format PC-104-Plus sous Linux. Il est par ailleurs relié par un lien Ethernet à un point d'accès WiFi pour permettre une liaison sans fil vers des ordinateurs déportés. Il communique avec le contrôleur bas niveau par un lien USB.

La différence majeure avec les composants du voilier *Asarome* réside dans le capteur de vent. Au vu des difficultés pour trouver des capteurs de vent adaptés à la taille et aux capacités de charge du mât du modèle réduit, nous avons spécifiquement conçu une girouette.

La mesure de l'angle de vent est obtenue en fixant une girouette à un potentiomètre. Le potentiomètre rotatif utilisé est réalisé à base de plastique conducteur. Son axe est monté sur un roulement à billes ce qui permet d'obtenir un couple de frottement de seulement $0,2\text{ N.cm}$ ce qui permet d'obtenir une bonne sensibilité de la girouette aux variations de vent. Sa résistance est de $1k\Omega$ et son angle électrique de 320° [121].

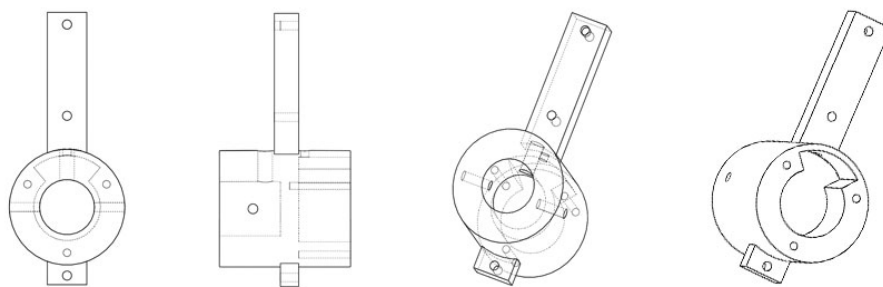
Pour étanchéifier et fixer le potentiomètre, une pièce d'adaptation a été conçue en prototypage rapide comme cela est montré dans les figures 4.25(a) et 4.25(c).

L'aile de la girouette a un allongement ("*aspect ratio*", rapport de la hauteur sur la largeur) de 1,5 et elle est montée sur une tige d'aluminium ayant un diamètre de 4 mm et une longueur de 140 mm. Cet ensemble (aile - tige) est équilibré par un contrepoids. Il minimise les effets de l'inclinaison et permet à la girouette de tourner librement.

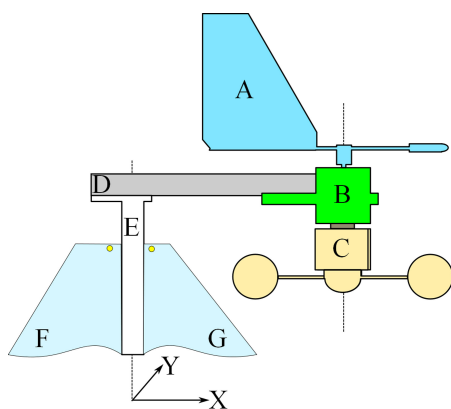
Pour mesurer la vitesse du vent, le bateau a été équipé d'un anémomètre à coupelles (dit Robinson) (voir figures 4.25(b) et 4.25(c)). Cet anémomètre à coupelles est une pièce de rechange pour une station météorologique commercialisée par *Selectronic*. La sortie de cet anémomètre délivre un signal TTL pour lequel la période correspond à un demi-tour.

Pour ce type d'anémomètre, la vitesse du vent est déterminée simplement par la relation 4.1 où AWS représente la vitesse du vent [m/s], R le rayon moyen des bras (de l'axe de rotation jusqu'au centre des coupelles) [m] et N le nombre de

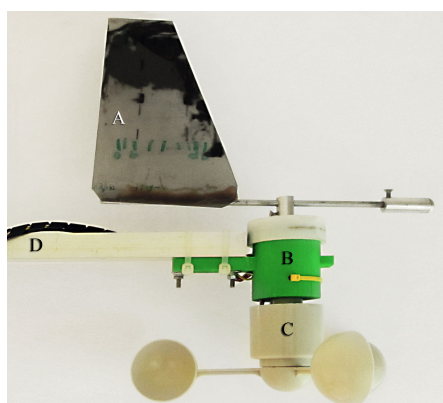
4.3. ARCHITECTURE MATÉRIELLE - VOILIER À ÉCHELLE RÉDUITE



(a) Esquisse CAO de la pièce de fixation du potentiomètre



(b) Schéma général



(c) Vue réelle

FIGURE 4.25 – Conception et construction de la girouette et de l'anémomètre où : A. aile et tige de contrepoids, B. capteur de position angulaire, C. anémomètre à coupelles D. bras de support E. mât, F. grand-voile et G. foc

tours par seconde [1/s].

$$AWS = 2\pi \cdot R \cdot N \quad (4.1)$$

La girouette et l'anémomètre ont été testés simultanément en conditions de vent réel. Nous avons constaté que la vitesse minimale du vent qui peut être captée fidèlement par l'anémomètre est approximativement de $0,3\text{ m/s}$ soit environ $0,6\text{ nd}$ (fig.4.26).

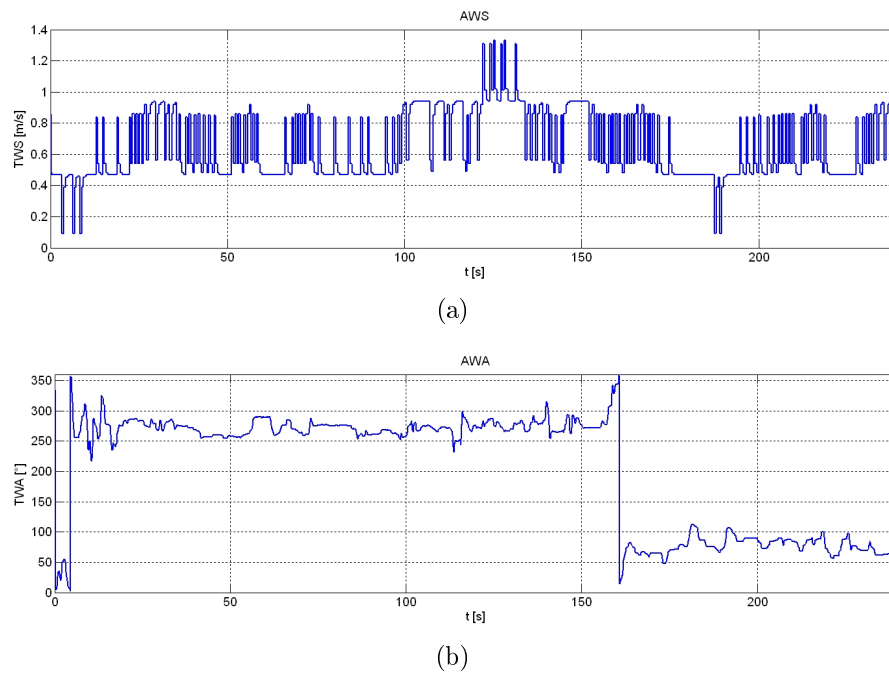


FIGURE 4.26 – Test des capteurs du vent : (a) vitesse du vent apparent ; (b) angle de vent apparent

4.3.3 Composants du système de gestion bas-niveau

Le système de gestion bas-niveau est constitué, comme sur le voilier *Asarome* d'un certain nombre de composants : actionneurs et capteurs pour la grand-voile et le safran, calculateur pour la gestion bas-niveau ainsi qu'un certain nombre d'entrées/sorties auxiliaires.

Les actionneurs utilisés dans le modèle réduit sont les servomoteurs recommandés par le fabricant du modèle. Pour la voile, un servomoteur multi-tour Robbe

4.3. ARCHITECTURE MATÉRIELLE - VOILIER À ÉCHELLE RÉDUITE

SW-1 N° 8336 produisant un couple de 100 N.cm a été utilisé (fig. 4.27(a)). Une écoute est fixée à la bôme et vient s'enrouler sur une poulie fixée à l'axe du servomoteur.

Pour le gouvernail, un servomoteur Hi-tech HS645 a été sélectionné (fig. 4.27(b)). Il peut commander le safran entre $-90^\circ \leq \text{angle safran} \leq 90^\circ$ ce qui suffit amplement car la plage d'angles de safran permettant de naviguer correctement, avec ce type de voilier, se situe entre -60° et 60° .



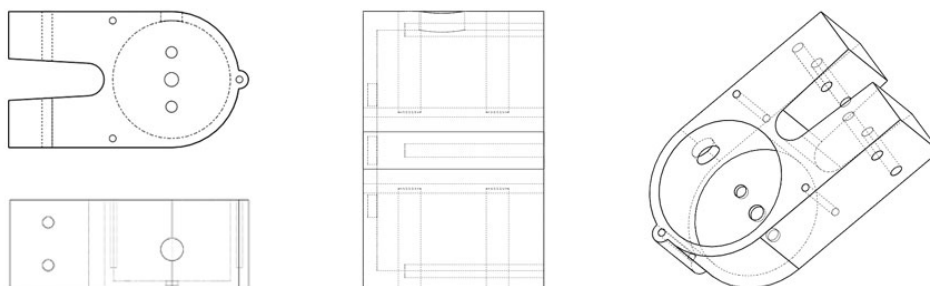
FIGURE 4.27 – Servomoteurs de commande pour la voile et le safran

Le servomoteur utilisé pour le safran ne nécessite pas l'ajout de capteur pour l'asservissement de l'angle de safran.

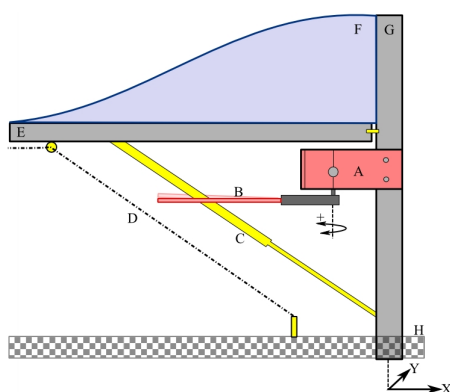
En revanche, l'asservissement de l'angle de grand-voile (et de foc) nécessite l'ajout d'un capteur supplémentaire. En effet, la relation liant l'angle de rotation du servomoteur à l'angle de voile dépend trop fortement de l'épaisseur de l'enroulement de l'écoute sur la poulie du servomoteur. Un potentiomètre rotatif a donc été fixé au mât et son axe a été lié au *hale-bas*² par une fourche métallique afin d'éviter la transmission, sur le capteur, d'efforts autres que ceux provoqués par la rotation du hale-bas (fig.4.28).

Un certain nombre d'entrées/sorties auxiliaires sont également utilisées en particulier pour allumer des indicateurs lumineux d'états ou pour gérer la communication avec le récepteur HF de la télécommande Futaba utilisée (voir figure 4.29).

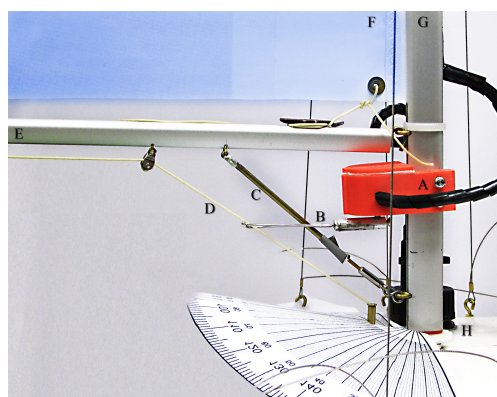
2. Système de retenue inférieur de la bôme qui relie un point situé sur la moitié avant de la bôme à une fixation située au pied de mât.



(a) Esquisse CAO



(b) Schéma général



(c) Vue réelle

FIGURE 4.28 – Conception et construction du capteur d'angle de voile : A. pièce de fixation du potentiomètre, B. fourche, C. hale-bas, D. écoute, E. bôme, F. grand-voile, G. mât et H. pont



(a) Émetteur



(b) Récepteur

FIGURE 4.29 – Télécommande manuelle

4.4. ARCHITECTURE LOGICIELLE - VOILIER À ÉCHELLE RÉDUITE

Le calculateur chargé de la gestion bas-niveau est un *Arduino Duemilanove* [122]. Il s'agit d'une carte de commande basée sur le micro-contrôleur *AVR AT-MEGA168*. Il dispose de 14 entrées/sorties numériques (dont 6 peuvent être utilisées comme sorties PWM), 6 entrées analogiques, un oscillateur à quartz à 16 MHz, une connexion USB, un circuit d'alimentation embarqué et un système d'auto-réinitialisation. L'AVR contrôle directement les actionneurs de la voile et du safran, effectue la conversion analogique-numérique du capteur d'angle de voile et convertit ces mesures en valeurs angulaire.

Comme sur le voilier *Asarome*, même si fonctionnellement le capteur de vent est rattaché au module de navigation, sa gestion est faite par le micro-contrôleur. La lecture des données fournies par la girouette-anémomètre est ainsi réalisée par le micro-contrôleur à travers un port analogique pour la girouette et un port numérique pour l'anémomètre.

Cette carte gère également le lien de communication avec le récepteur de la télécommande.

4.4 Architecture logicielle - Voilier à échelle réduite

Comme dans le voilier *Asarome*, la commande du modèle réduit a été divisée en blocs fonctionnels.

Sur la figure 4.30, on peut observer les liens existants entre ces différents modules. Le module de navigation et de commande est physiquement implémenté sur le calculateur PC-104-Plus de Lippert et le gestionnaire bas-niveau sur le micro-contrôleur Arduino.

Une grande partie de la structure logicielle est similaire à celle du voilier *Asarome*. Les différences principales sont listées ci-dessous :

- Module de navigation et de commande

Comme dans le voilier *Asarome*, ce module est chargé de déterminer l'angle de cap et l'ouverture de voile à partir des informations des capteurs de navigation et d'envoyer les consignes de safran et d'angle de bôme au contrôleur bas niveau. Les principales différences se situent au niveau de la couche d'interface chargée de l'échange de données. En particulier, la récupération des

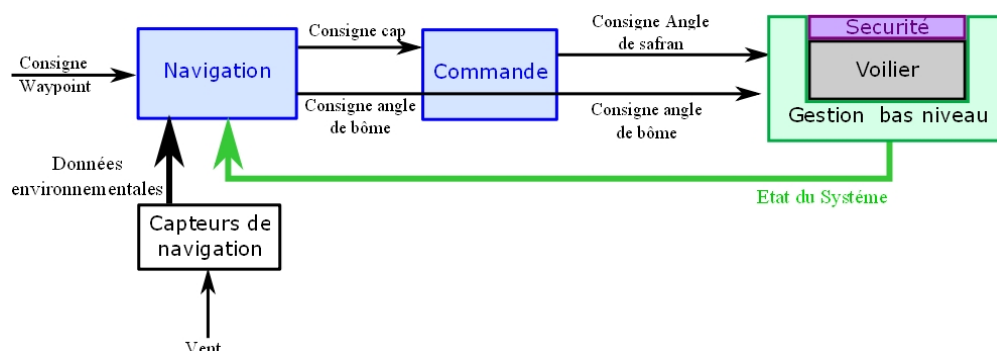


FIGURE 4.30 – Modules logiciels du voilier à échelle réduite

données de vent et l'envoi des consignes s'effectue par un dialogue direct via un lien USB avec le contrôleur bas-niveau et non plus par un mécanisme client/serveur par trame UDP. Par ailleurs, la centrale étant physiquement reliée à un port USB du calculateur de navigation, les trames de données émises par la centrale sont directement gérées par ce calculateur.

- Module de gestion bas-niveau
Dans ce module, exécuté par le micro-contrôleur Atmel-AVR, il est possible de distinguer trois éléments principaux.

Le premier élément correspond aux asservissements bas niveau. Ils consistent à convertir les consignes d'angles de bôme et de safran en valeurs numériques qui sont transmises, sous forme d'une trame PWM (modulation de largeur d'impulsion), aux servomoteurs. Dans le cas du safran, comme la transmission du mouvement est faite à travers des éléments rigides de taille constante, nous pouvons raisonnablement supposer que l'asservissement du servomoteur est assez fiable pour avoir la certitude que le gouvernail a été bien positionné. Pour l'asservissement de l'angle de bôme, la position réelle de la bôme est mesurée au moyen du capteur angulaire. Le capteur délivre une tension proportionnelle à la position de l'angle de bôme qui est transformée en une valeur angulaire par la carte Arduino. Toujours dans le microcontrôleur, cette valeur angulaire est comparée avec la valeur de la consigne livrée par le module de navigation pour ensuite modifier la trame PWM proportionnellement à l'erreur calculée.

Ce sous-bloc est également chargé de l'acquisition des données vent. Pour la girouette, le résultat de la conversion analogique/numérique est convertie en valeur angulaire et transmise au module de navigation. L'anémomètre four-

4.4. ARCHITECTURE LOGICIELLE - VOILIER À ÉCHELLE RÉDUITE

nit un signal dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du vent. Ce signal est transformée par la carte Arduino en une valeur de vitesse de vent qui est ensuite transmise au module de navigation.

Le deuxième élément est un sélecteur entre la commande autonome et la commande manuelle. En mode autonome, les consignes pour les asservissements d'angles de safran et de bôme du contrôleur bas-niveau sont issus du module de navigation et de commande. En mode manuel, ces consignes sont directement transmises par la télécommande. Pour des raisons de sécurité, la commande manuelle est prioritaire et la commande autonome peut être lancée ou arrêtée depuis la télécommande.

La dernière partie du module de gestion bas-niveau concerne la sécurité et les comportements d'urgence. Pour cela, nous avons d'abord défini une position de sécurité pour le voilier, correspondant à un safran tourné au maximum et une écoute relâchée. Cette position de la voile limite la prise de vitesse du voilier et le safran agit comme un frein. Cette position de sécurité est choisie comme position par défaut. Ce choix permet d'exploiter le système de réinitialisation automatique intégré à la carte Arduino qui lui permet de reprendre ses fonctions même après un défaut d'alimentation. Si un tel défaut d'alimentation apparaît, le redémarrage de la carte Arduino place le voilier dans une configuration qui préserve l'intégrité du bateau, minimise sa dérive et facilite les tâches de récupération.

En second lieu, le module de gestion bas-niveau teste périodiquement l'état des batteries, le lien de communication entre le PC-104 et le micro-contrôleur ainsi que le lien de communication avec la télécommande et déclenche des actions afin de préserver l'intégrité du voilier.

Si l'indicateur de charge des batteries tombe en-dessous d'un seuil prédéfini, le calculateur embarqué supportant le module de navigation autonome (PC-104) est mis en veille et le micro-contrôleur place la voile et le gouvernail dans leurs positions de sécurité. Le seuil de tension a été fixé à 9,8V afin d'assurer le fonctionnement des servomoteurs et du récepteur de la télécommande pendant 15 minutes afin de récupérer le bateau en utilisant le mode manuel.

De la même manière, si le lien de communication avec la télécommande est perdu, le voilier est placé dans sa position de sécurité.

Enfin, si le lien de communication entre le PC-104 et le micro-contrôleur est perdu, celui bascule automatiquement le pilotage en mode manuel.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit l'architecture matérielle du voilier utilisé comme support expérimental du projet *ASAROME*. Cette description distingue les composants matériels liés aux grandes fonctions que sont la navigation, la perception et la gestion bas-niveau. Ces grandes fonctions sont les modules logiciels composant l'architecture informatique embarquée du voilier *Asarome*. Cette décomposition modulaire permet de mettre en évidence les liens de communication entre ces trois grand blocs et souligne le rôle central du module de navigation/commande sur lequel seront portés les algorithmes développés dans le chapitre 5.

En parallèle, nous avons également réalisé entièrement un petit voilier autonome sur la base d'un modèle réduit radio-commandé. Ce voilier a été développé afin de tester rapidement et plus aisément les algorithmes de commande. A l'exception du bloc de perception, ce voilier présente des fonctionnalités équivalentes à celles du voilier *Asarome*. En particulier, nous avons conçu l'architecture matérielle et logicielle afin qu'elle soit la plus proche possible de cette dernière, à l'exception toutefois du bloc de perception (matériel et logiciel) qui n'a pas été intégré. Certains composant matériels sont rigoureusement identiques à ceux du prototype taille réelle et d'autres ont du être adaptés. L'ensemble conserve toutefois une architecture similaire, afin de faciliter le portage des algorithmes de pilotage. Ce voilier est maintenant complètement fonctionnel et a réalisé ses premiers tests de navigation autonome.

5

Navigation et commande

L'objectif central de cette thèse est de contrôler un voilier pour le faire naviguer entre deux points de passage de façon autonome. Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de calculer le cap le plus approprié à partir des conditions de vent, du cap courant du voilier et de la position des obstacles.

Les points de passage sont, dans le cadre de cette thèse, supposés être fixés à l'avance par un opérateur humain sur la base de cartes marines et/ou de cartes météorologiques. La méthode de sélection de ces points de passage ne sera pas abordée dans le cadre de ce travail de thèse.

Le pilotage d'un voilier afin de rejoindre un point de passage (ou plusieurs points de passage successifs) tout en évitant les obstacles a été divisé en deux parties (cf figure 5.1).

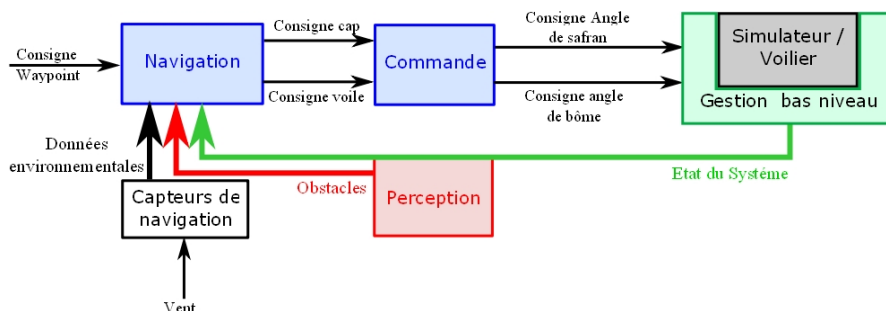


FIGURE 5.1 – Architecture générale du système de contrôle

Un premier module, dit de navigation, permet de déterminer un cap consigne et un angle de voile désiré afin d'atteindre l'objectif tout en évitant les obstacles. La détermination de ces deux paramètres dépend évidemment des conditions instantanées de vent ainsi que de la carte des obstacles qui sont mises à jour en temps réel par les capteurs embarqués et le système de perception. Ces deux consignes

sont ensuite passées au module dit de commande qui réalise principalement un asservissement sur l'erreur de cap de manière à déterminer un angle de safran désiré qui est transmis au module de gestion et d'asservissement bas-niveau.

Dans la section 5.1, nous décrivons tout d'abord le bloc de commande où sont réalisés le suivi de la consigne de cap et l'asservissement de l'angle de voile.

Nous présentons ensuite les trois méthodes que nous proposons dans les sections 5.2.2, 5.2.3 et 5.2.4 afin de faire naviguer un voilier tout en évitant les obstacles. La détermination de ce cap consigne est effectuée en prenant en compte l'état courant du voilier, les conditions instantanées de vent, la position des obstacles et la position du *waypoint* courant. Ces consignes (angles de cap et de voile) sont ensuite transmises au bloc de commande. Les trois méthodes développées s'apparentent à des méthodes de planification (*path planning*). Pour mettre en évidence le fait que cette planification se base sur des données perçues en temps réel (vent et obstacle), nous utiliserons par la suite le terme de *navigation réactive*.

5.1 Commande

Selon le schéma de la figure 5.1, les deux entrées de ce bloc de commande sont l'angle de cap désiré et l'angle de voile désiré. Les deux entrées de commande du système sont l'angle de safran et l'angle de bôme. Ce bloc de commande réalise l'asservissement de cap et l'asservissement de la voile en supposant que ces deux entrées sont découplées c'est-à-dire que l'angle de safran influe principalement sur l'angle de cap et l'angle de voile sur la vitesse. Cette hypothèse a été vérifiée par des simulations numériques dans la section suivante.

Concernant l'asservissement de l'angle de voile, celui-ci est directement réalisé par le calculateur de gestion bas niveau. Pour l'angle de voile, cet étage de commande est donc complètement transparent : la consigne d'angle de voile est directement transmise à l'étage d'exécution.

5.1.1 Hypothèse de découplage des deux entrées de commande

Les deux variables de commande possibles sur le voilier sont l'angle de bôme et l'angle de safran. L'hypothèse qui a été faite est que ces deux entrées de pilotage sont très largement découplées, le safran contrôlant le cap du voilier et l'angle de

voile jouant majoritairement sur la vitesse d'évolution du voilier. Pour vérifier cette hypothèse, classiquement utilisée dans la littérature, nous avons réalisé quelques essais préalables à l'aide du simulateur numérique.

Lors de ces essais, le voilier se trouve à la position $(0,0)$ avec une vitesse initiale de $3,5\text{ nd}$ et suit un cap initial de 50° par rapport au vent. L'angle de vent est constant (0°) ainsi que sa vitesse (15 nd).

Dans le premier essai réalisé, l'angle de safran est maintenu à zéro pendant toute la durée de la simulation et l'angle d'attaque de la voile γ (ou angle d'incidence du vent : angle entre le plan moyen de la voile et le vent, voir figure 3.3, page 51) conserve une valeur constante de 35° . Le chemin suivi dans le plan X-Y par le bateau est donné figure 5.2 (courbe bleue en trait plein).

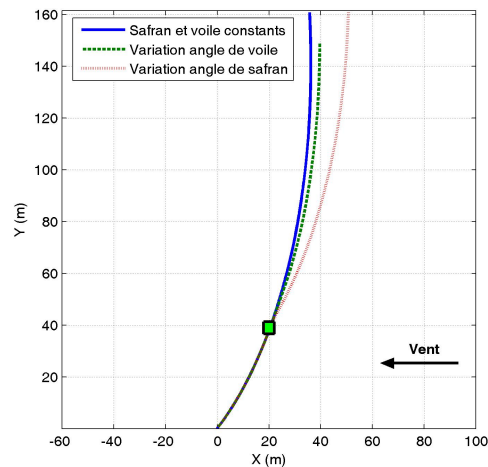


FIGURE 5.2 – Effet de la modification de l'angle de voile et de l'angle de safran sur la trajectoire

Sous l'effet de l'effort produit par le vent sur la voile, le cap se modifie lentement (voir figure 5.3, courbe bleue en trait plein) et atteint une valeur proche de 90° en fin de simulation (80 s). Cette modification du cap est due à la dérive du voilier c'est-à-dire au fait que le vecteur vitesse du voilier n'est pas colinéaire à l'axe longitudinal du bateau (voir définition en fin de section §3.1 et figure 3.2 page 50). Cet angle de dérive, de l'ordre de quelques degrés, amène le cap à se modifier lentement au cours du temps. La vitesse décroît également régulièrement (voir figure 5.3, courbe bleue en trait plein) conformément aux courbes polaires du voilier données figure 3.14 page 66 : la vitesse pour une allure au près (ici 50° initialement) étant supérieure à la vitesse pour une allure de travers (90° en fin de

simulation).

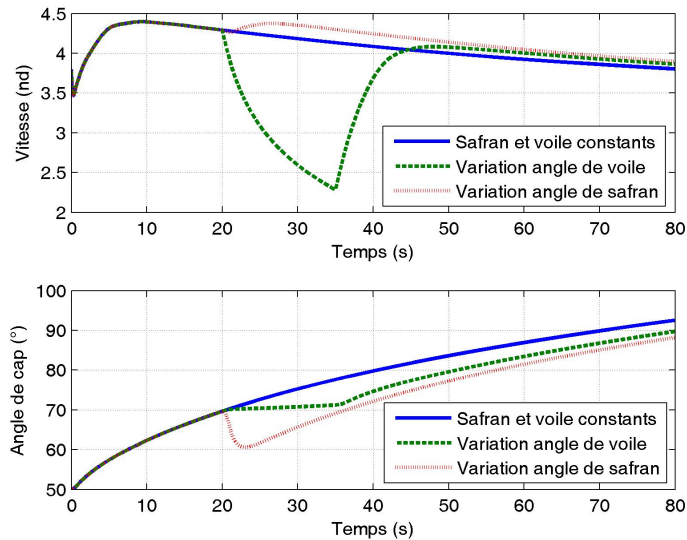


FIGURE 5.3 – Effet de la modification de l’angle de voile et de l’angle de safran sur la vitesse et sur le cap

Dans un second temps, avec les mêmes conditions initiales que précédemment, l’angle d’attaque de la voile passe brutalement à une valeur de 5° à $t = 20\text{ s}$. Cette valeur est maintenue pendant 15 s avant d’être ramenée à sa valeur initiale de 35° . L’angle de safran est maintenu à zéro pendant toute la durée de la simulation, comme dans l’essai précédent. On constate sur les figures 5.2 et 5.3 (courbe en vert tiretée) que le cap se modifie légèrement : l’angle d’attaque étant presque nul, l’effort sur la voile se réduit très fortement ce qui permet au voilier de maintenir un cap presque constant avec un angle de safran maintenu à zéro, dans l’axe du bateau. La vitesse chute fortement du fait de ce changement d’angle de voile.

Pour le dernier essai réalisé, les conditions initiales sont toujours identiques. A $t = 20\text{ s}$, l’angle de safran passe à une valeur de 10° pendant une seconde puis revient dans l’axe du voilier. L’angle d’attaque de la voile reste égal à 35° pendant toute la durée de la simulation. On constate sur les courbes de résultats (figures 5.2 et 5.3, courbe en rouge pointillée) un comportement quasiment inverse au précédent avec une forte variation du cap et une incidence faible sur la vitesse du voilier.

Ces résultats montrent que, même si les deux variables de commande ne sont pas formellement découplées, l’angle de safran modifie principalement le cap du voilier tandis que l’angle de voile modifie principalement sa vitesse d’avance.

5.1.2 Asservissement de cap

L'asservissement de safran pour le suivi de cap est réalisé par un correcteur PID sur l'erreur entre l'angle de cap désiré et l'angle de cap mesuré par la centrale inertielle.

La détermination des gains a été guidée par l'analyse du comportement en virage du voilier *Asarome* effectuée à l'aide du simulateur numérique (cf section §3.5.5) et en particulier de la réponse en cap ψ à un échelon d'angle de safran α_s donnée par la relation (équation 3.23 page 72) :

$$\frac{\psi}{\alpha_s} = \frac{K}{s(1 + Ts)} \quad (5.1)$$

Rappelons également que ce modèle de fonction de transfert est formellement faux puisque le gain K dépend de la vitesse du voilier et de la valeur de l'échelon d'angle de safran. Ce modèle donne toutefois une idée du comportement en virage et peut être utilisé pour appuyer une analyse qualitative sur le choix des gains du régulateur PID.

Si le correcteur choisi est un simple correcteur proportionnel de gain K_p , on obtient une fonction de transfert en boucle fermée de la forme :

$$\frac{\psi}{\psi_d} = \frac{KK_p}{Ts^2 + s + KK_p} \quad (5.2)$$

où ψ_d est le cap désiré.

Par identification avec la forme canonique d'un système du second ordre :

$$H_2 = \frac{\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}$$

on obtient alors les relations :

$$\omega_0^2 = \frac{KK_p}{T} \quad (5.3)$$

$$2\zeta\omega_0 = \frac{1}{T} \Rightarrow \zeta = \frac{1}{2T\omega_0} \quad (5.4)$$

A partir des simulations réalisées, nous avons déterminé que la constante de temps T du voilier *Asarome* était de l'ordre de 1 seconde pour une large plage de vitesse (cf section §3.5.5, page 72). Pour obtenir une réponse indicielle à une consigne

de cap sans oscillation, il est donc nécessaire de choisir une valeur du facteur d'amortissement $\zeta \approx 1$ d'où une valeur de $\omega_0 \approx 0,5 \text{ rad/s}$. Dans ces conditions, la fonction de transfert présente un pôle double et le temps de réponse à 95% pour la réponse indicielle est donnée par :

$$T_{95\%} = 0,75T_0 \approx 9 \text{ s}$$

On voit donc qu'un régulateur proportionnel simple pour l'asservissement de cap permet d'obtenir une réponse sans oscillation mais avec un temps de réponse qui ne peut devenir inférieur à une dizaine de secondes dans le cas du voilier *Asarome*.

En ajoutant un terme dérivé (de gain K_d) au régulateur, la fonction de transfert en boucle fermée devient :

$$\begin{aligned} \frac{\psi}{\psi_d} &= \frac{KK_p + KK_d s}{Ts^2 + (KK_d + 1)s + KK_p} \\ &= \frac{(1 + T's)\omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \end{aligned}$$

avec :

$$\omega_0^2 = \frac{KK_p}{T} \Rightarrow K_p = \frac{\omega_0^2 T}{K} \quad (5.5)$$

$$2\zeta\omega_0 = \frac{KK_d + 1}{T} \Rightarrow K_d = \frac{2\zeta\omega_0 T - 1}{K} \quad (5.6)$$

$$T' = \frac{K_d}{K_p} = \frac{2\zeta\omega_0 T - 1}{\omega_0^2 T} \quad (5.7)$$

On voit ainsi que le gain proportionnel permet de régler le temps de réponse de l'asservissement et le gain dérivé permet de supprimer les oscillations de la réponse indicielle.

La limite de cette analyse tient bien sûr au fait que le modèle de fonction de transfert utilisé Cap/Angle de safran ne reflète que partiellement la dynamique du voilier. En particulier, selon cette fonction de transfert rappelée dans l'équation 5.1, un angle de safran nul donne, en statique, un cap constant ce qui est contraire à la réalité, réalité restituée par le simulateur en particulier sur les essais représentés figure 5.2. Par ailleurs, ce modèle n'intègre pas les effets dynamiques produits par les oscillations en gîte du voilier lors d'un changement de cap brutal.

Afin de guider le choix des gains du correcteur PID, nous avons réalisé des simulations de réponse en cap du voilier pour différentes valeurs des gains proportionnel et dérivé. Dans ces simulations, le voilier part de l'origine avec un cap

initial de 90° et une consigne de cap de 90° . A $t = 50\text{ s}$, l'angle de cap consigne passe à 50° . Pendant toute la durée de la simulation, le vent reste constant en vitesse et direction (angle de vent = 0° et vitesse = 15 nd).

La trajectoire est donnée figure 5.4 et la réponse indicielle en cap figure 5.5 pour différentes valeurs de gains. Les gains pour les courbes en bleu (trait plein) et en vert (tireté) sont obtenues par un réglage empirique de sorte à ne pas avoir d'oscillations sur la réponse en cap et à maintenir des oscillations en gîte qui restent inférieures à 1° . On constate sur ces relevés que l'utilisation d'un terme dérivé permet de réduire le temps de réponse par rapport à un correcteur proportionnel simple. D'autre part, le fait de pouvoir augmenter la valeur du gain proportionnel sans oscillations de la réponse en cap permet de diminuer fortement l'erreur statique.

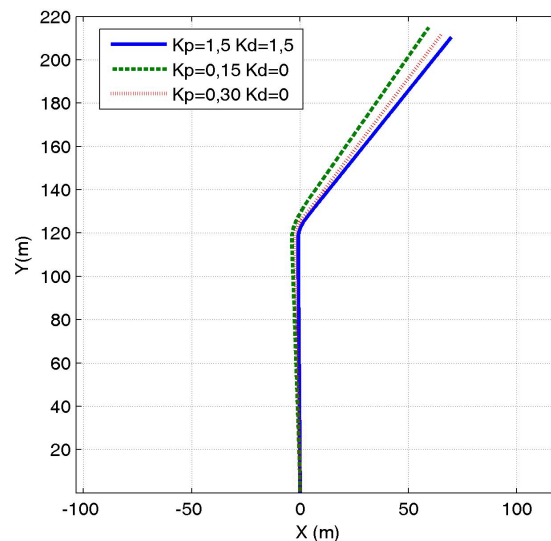


FIGURE 5.4 – Asservissement de cap : influence des gains du régulateur PID

Un terme intégral, déclenché uniquement lorsque l'erreur de cap devient inférieure à un seuil, peut également être introduit de manière à annuler l'erreur statique.

Les équations 5.4 ou 5.6 suggèrent également que, pour maintenir un temps de réponse constant de l'asservissement de cap pour des vitesses du voilier différentes, il est nécessaire de faire varier la valeur des gains avec la vitesse d'avance. En effet, comme nous l'avons vu dans la section §3.5.5, page 72, le gain K diminue lorsque la vitesse du bateau diminue ce qui conduit à devoir augmenter la valeur des gains

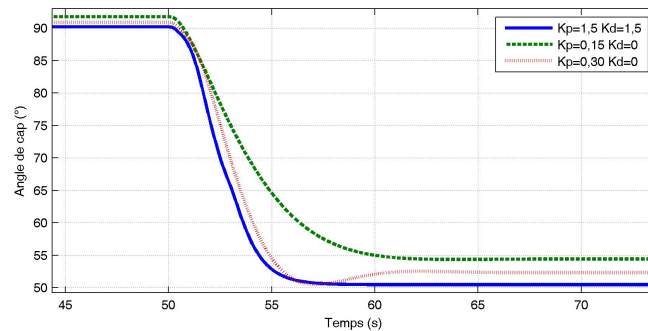


FIGURE 5.5 – Réponse indicielle en cap : influence des gains du régulateur PID

pour conserver une réponse équivalente. La figure 5.6 illustre cette variation pour le gain proportionnel. Pour cette figure, les gains du correcteur PD ont été réglés empiriquement afin d'obtenir une réponse plate en cap sans oscillation importante de la gîte pour une plage de vitesse de vent allant de 10 à 60 km/h , par pas de 10 km/h .

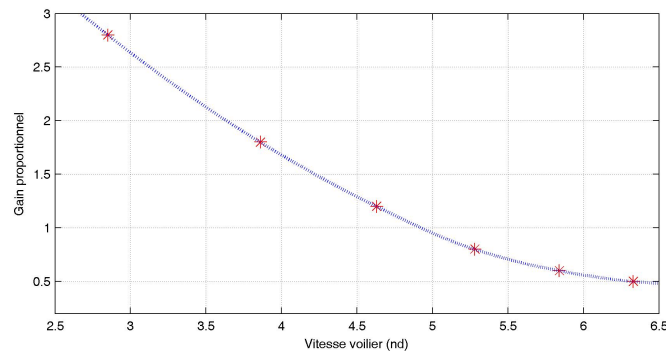


FIGURE 5.6 – Variation du gain proportionnel en fonction de la vitesse du vent

Pour finir, nous avons repris les mêmes simulations que celles décrites dans les figures 5.2 et 5.3 pour vérifier que l'asservissement de cap était bien capable de rejeter une perturbation liée à une variation de l'angle de voile. Sur la figure 5.7,

- les courbes en bleu (traits pleins) représentent l'évolution temporelle de la vitesse et du cap lorsque l'angle de safran et l'angle d'attaque de la voile sont maintenus constants,
- les courbes en vert (tireté) représentent l'évolution temporelle de la vitesse et du cap lorsque l'angle de safran reste constant et l'angle d'attaque de la

- voile varie entre $t = 20\text{ s}$ et $t = 35\text{ s}$ (l'angle d'attaque passe d'une valeur de 35° à une valeur de 5° puis revient à sa valeur initiale),
- les courbes en rouge (pointillées) représentent l'évolution temporelle de la vitesse et du cap lorsque le cap est asservi par un correcteur PD et l'angle d'attaque de la voile varie entre $t = 20\text{ s}$ et $t = 35\text{ s}$.

On constate sur ces figures que le voilier suit son cap initial de 50° (avec une légère erreur statique) malgré la perturbation induite par l'ouverture de la voile entre $t = 20\text{ s}$ et $t = 35\text{ s}$. La faible variation de cap (de l'ordre de 1°) à partir de $t = 35\text{ s}$ est due à la gîte qui passe rapidement d'un angle proche de zéro à un angle proche de 30° .

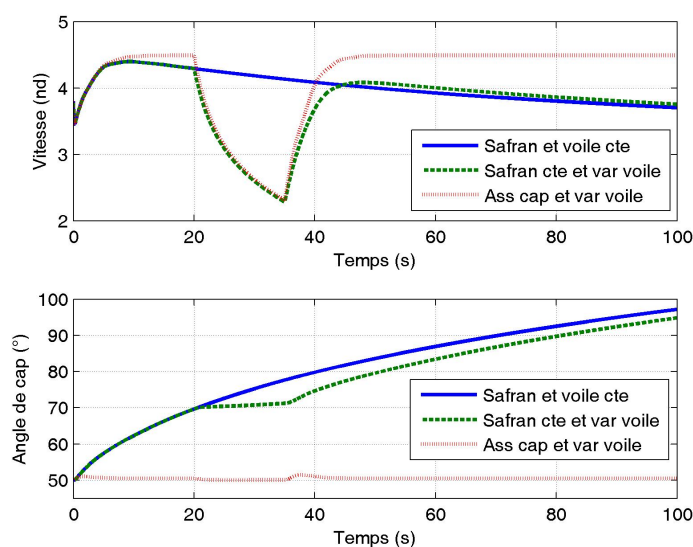


FIGURE 5.7 – Effet d'une modification de l'angle de voile sur la vitesse et sur le cap (asservissement de cap)

5.2 Navigation avec évitement d'obstacles

Le second module du système de pilotage d'un voilier concerne la navigation avec évitement d'obstacles (cf figure 5.1, page 111). Ce bloc doit déterminer en temps réel les consignes de cap et d'angle de voile à transmettre au module de commande.

Dans le cas de la navigation à voile, la sélection d'un cap doit être compatible avec les capacités de déplacement du voilier. La capacité de déplacement d'un voilier peut être représentée par sa courbe polaire de vitesse (cf chapitre 3, §3.5.3). Cette polaire met en évidence que les voiliers ne peuvent pas avancer face au vent. Pour progresser par vent de face, ils doivent *louvoyer*¹ et tenir un cap tel que l'avance du bateau soit possible. De même, la navigation par vent arrière est en général à éviter. Quand le bateau navigue dans ces conditions, les efforts de portance sont minimisés et le bateau se déplace uniquement par effet de l'effort de traînée, ce qui entraîne des effets d'instabilité qui peuvent provoquer des empannages² inopinés. Par vent arrière, l'efficacité des manœuvres est également limitée par comparaison avec les autres allures. C'est pourquoi l'allure par vent arrière doit être évitée. Afin de ne pas utiliser d'angles de cap par rapport au vent qui ne conviennent pas à la navigation, nous avons ajouté deux zones appelées *no-go zones*, où nous avons considéré la vitesse du bateau comme nulle. Ces zones d'interdiction pour la navigation sont indiquées figures 5.8(a) et 5.8(b).

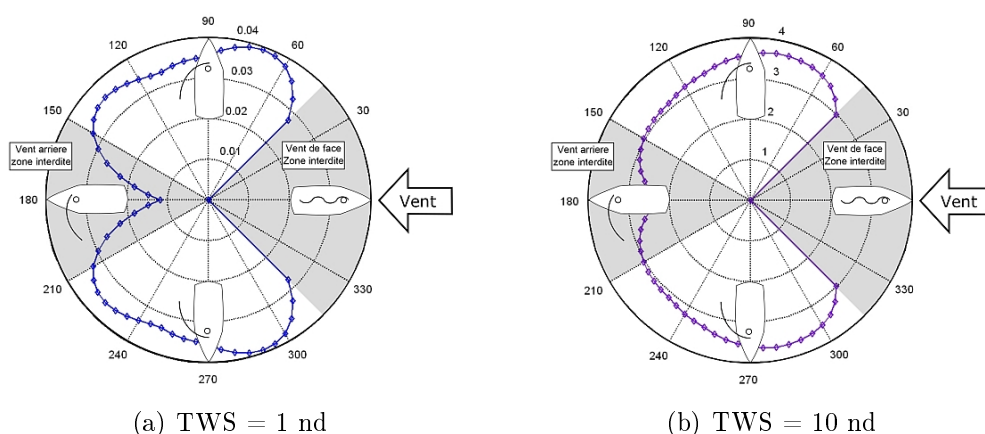


FIGURE 5.8 – Polaires de vitesse pour différentes vitesses de vent réel (TWS) et zones d'interdiction à la navigation (*no-go zones*)

Cette courbe polaire de vitesse permet d'établir un premier critère pour la sélection de cap : celui-ci doit être tel que la propulsion ne soit pas nulle, c'est-à-dire que le bateau doit prendre un angle de cap par rapport au vent se trouvant en dehors des *no-go zones*. Néanmoins si seul ce premier critère est pris en compte, il n'y a aucune certitude que le bateau puisse arriver à sa destination. Un deuxième

1. Louvoyer : terme de marine signifiant prendre une route en zigzag afin de remonter au vent.

2. En navigation à voile, empanner consiste pour un voilier à changer d'amure (côté duquel le voilier reçoit le vent) en passant par le vent arrière.

critère doit assurer que la composante de la vitesse correspondant à l'angle de cap sélectionné en direction de la destination ne soit pas nulle. Enfin, un troisième élément doit être pris en compte : la présence d'obstacles potentiels transmis en temps réel sous forme de carte locale par le système de perception. La détermination d'un cap consigne doit également tenir compte de ces obstacles afin de sélectionner un cap évitant les collisions. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous proposons trois méthodes permettant de réaliser cette sélection de cap qui respectent les trois critères évoqués. Ces méthodes, qui exploitent toutes d'une manière ou d'une autre la polaire de vitesse du voilier, sont détaillées dans les sections §5.2.2 à 5.2.4.

Un autre critère qu'il est possible de considérer porte sur le maintien de l'intégrité du voilier. En effet, lorsque les voiles sont hissées, elles génèrent des efforts qui propulsent le navire mais qui modifient également la gîte du voilier (voir figures 5.9(a) et 5.9(b)). Plus le bateau gîte, plus le risque de prendre l'eau est présent et éventuellement peut aller jusqu'à chavirer. De plus, la gîte du navire change la forme de la surface immergée en ajoutant des couples additionnels qui font dériver le cap du bateau. Cette dérive doit être compensée par des actions sur le gouvernail, manœuvres qui freinent le voilier. Nous proposons dans la section §5.2.5 une méthode permettant de limiter la gîte du voilier lors de la sélection d'un cap consigne. Cette méthode est compatible avec les algorithmes précédents puisqu'elle consiste à déformer la polaire de vitesse pour tenir compte des effets induits par la gîte.

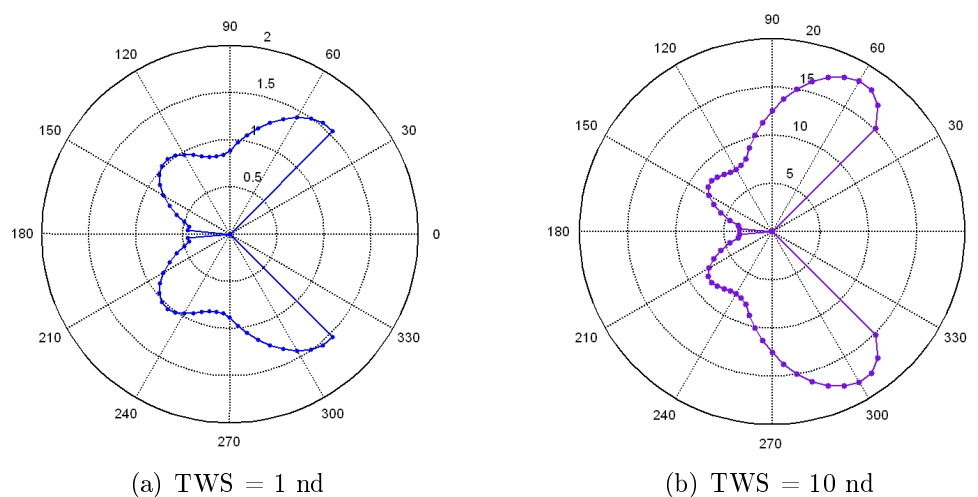


FIGURE 5.9 – Polaire de gîte pour différentes vitesses de vent réel (TWS)

Enfin, sélectionner un cap consigne permettant de faire naviguer le voilier vers

son objectif tout en évitant les dangers potentiels, apporte peu si le voilier n'est pas en mesure de prendre de la vitesse. La sélection d'un angle de voile permettant au voilier de maintenir une vitesse non nulle pour un cap donné et sous des conditions de vent données est présentée dans la section 5.2.1 suivante. Cette méthode ne constitue pas une contribution de ce travail de thèse car elle reprend un algorithme proposé par Y. Brière dans [60]. Elle est présentée ici dans un souci de cohérence par rapport à l'architecture globale de pilotage présentée figure 5.1.

5.2.1 Détermination de l'angle de voile

La détermination de l'angle de voile en fonction des conditions instantanées de vent est réalisée dans le bloc de navigation. Pour le voilier *Asarome*, ce réglage peut a priori se baser sur un ensemble de tests effectués avec le simulateur qui aboutit aux courbes polaires décrites dans le chapitre 3 §3.5.3 et en particulier aux courbes polaires de la figure 3.13 (page 65) qui représentent l'influence de l'angle de voile sur la vitesse d'avance du voilier pour une vitesse de vent donnée. Toutefois, comme nous l'avons mentionné auparavant, la validité de ces courbes polaires étant assez douteuse, nous lui avons préféré une méthode plus fondée sur l'expérience des navigateurs à voile que sur le simulateur. Cette méthode peut par ailleurs être implémentée sur la maquette de voilier développée, pour laquelle ces polaires de vitesse représentant l'effet du réglage de voile ne sont pas connues.

Cette méthode, décrite par Y. Brière dans [60], consiste fondamentalement à régler la voile de sorte à maintenir quasi constant l'angle de la voile par rapport au vent. L'angle de voile α_v (voir figure 3.1, page 47) est réglé selon la courbe de la figure 5.10 : pour des angles de vent apparent *AWA* inférieur à 50° , l'angle de voile α_v est maintenu constamment égal à 15° . Pour des angles de vent apparent compris entre 45° et 150° , l'angle de voile varie entre 15° et 90° (correspondant respectivement à un angle α voile/vent de 30° et de 60°) puis conserve cette valeur au-delà d'un angle de 150° . Ces différents seuils devront être ajustés à partir d'une analyse des essais réalisés avec les voiliers. Par ailleurs, un facteur d'atténuation peut aisément être appliqué sur l'ensemble de la courbe afin de limiter la prise de vitesse, en particulier par grand vent.

5.2.2 Méthode de projection de la vitesse

Cette méthode exploite la projection, pour un cap donné et un vent donné, de la vitesse extraite de la polaire de vitesse du voilier sur la route directe menant au point visé afin de calculer la composante de la vitesse du navire dans cette

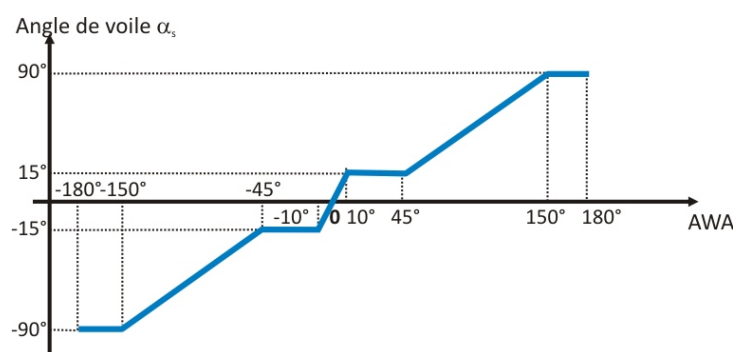


FIGURE 5.10 – Réglage de voile en fonction de l'angle de vent apparent

direction. Le sigle anglo-saxon pour désigner cette projection est la VMG pour *Velocity Made Good*. Le but de cette méthode est de trouver le meilleur compromis cap/vitesse qui fait gagner le plus de distance sur l'axe bateau/point de passage et qui, par conséquence, minimise le temps pour atteindre l'objectif. Cette méthode fait référence à la stratégie de navigation à voile utilisée habituellement par les skippers pendant les régates, où les navigateurs cherchent à déterminer un cap optimal c'est-à-dire un cap tel que la projection de la vitesse sur la route directe vers l'objectif soit maximale.

L'application de cette technique classique de navigation pour des voiliers autonomes a été présentée initialement par R. Stelzer en 2008 dans [70], sans considérer les obstacles potentiels. Dans cette section, nous proposons une extension de cette méthode afin d'inclure également l'évitement d'obstacles. L'algorithme proposé recherche un cap optimal qui minimise un critère basé sur deux fonctions coûts : la première est liée à la vitesse d'avance vers l'objectif et la seconde est liée à la distance avec les obstacles.

Fonction de coût pour rejoindre l'objectif

La navigation à partir de la projection de la vitesse est une stratégie de navigation locale. Pour déplacer le voilier de sa position courante G vers une position finale F , le vecteur \vec{D} qui joint ces points, ainsi que la direction du vent doivent être pris en compte (voir figure 5.11). L'objectif de cet algorithme de navigation est, dans un premier temps, de diminuer la distance entre le bateau et le point F aussi rapidement que possible.

La vitesse effective du bateau vers le point F est déterminée en projetant le

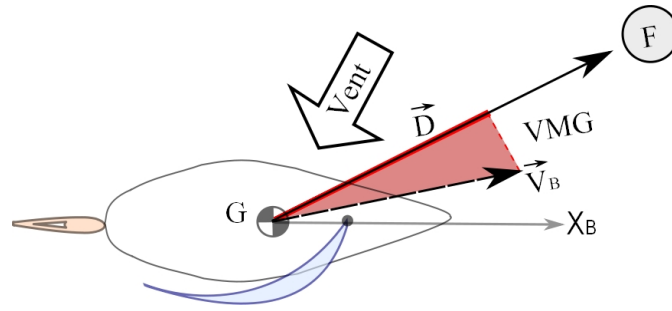


FIGURE 5.11 – Illustration de la *VMG* : projection de vitesse du voilier sur la route directe menant au point visé

vecteur vitesse du bateau \vec{V}_B sur la route directe vers la position finale :

$$VMG = \vec{V}_B \cdot \frac{\vec{D}}{|\vec{D}|} \quad (5.8)$$

Cette expression peut également être utilisée pour prédire la vitesse effective vers l'objectif. Dans ce cas, le vecteur \vec{V}_b dans l'équation 5.8 ne représente plus la vitesse réelle du voilier mais la vitesse potentielle que peut atteindre le voilier en suivant un cap donné (et, bien sûr, pour des conditions de vent données). La polaire de vitesse du voilier représente précisément cet ensemble (Cap, Vitesse potentielle). A chaque cap (relatif au vent) de la polaire de vitesse correspond une vitesse potentielle du voilier et, par suite, une valeur de la projection de la vitesse sur la route directe vers l'objectif. En balayant l'ensemble des caps de la polaire, il est donc possible de déterminer le cap optimal à suivre pour rejoindre au plus vite l'objectif. Ce principe est illustré figure 5.12. Sur cette illustration, une vitesse nulle est associée à la *no-go* zone de la polaire de vitesse pour un vent de face.

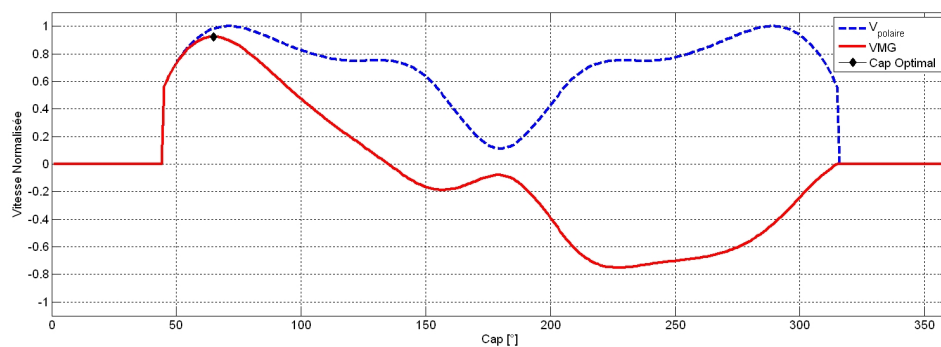


FIGURE 5.12 – Exemple de polaire de vitesse normalisée et de *VMG* pour un objectif situé à 45° par rapport à l'axe du vent (0°)

En associant une vitesse nulle aux *no-go* zones de la polaire de vitesse (voir figures figures 5.8), il est donc possible de piloter un voilier en fixant comme cap consigne le cap optimal déterminé de la sorte. La figure 5.13 illustre les différents cas de figure possibles en prenant, par souci de simplicité, une polaire idéale. Cette polaire dite '*idéale*' suppose que la vitesse du voilier, en dehors des *no-go* zones, est identique quelque soit le cap du voilier. Dans le cas des figures 5.13(a) et 5.13(b), la route directe vers l'objectif est navigable (c'est-à-dire qu'il est possible de rejoindre ce point tout en maintenant une vitesse non nulle) ce qui conduit à sélectionner le cap menant directement au point de passage comme cap consigne puisque, dans ce cas, on maximise la vitesse de progression vers l'objectif (polaire idéale). Dans le cas des figures 5.13(c) et 5.13(d), le cap consigne est toujours celui qui permet de se rapprocher le plus vite de l'objectif mais cette fois, le cap consigne correspond au cap (relatif au vent) qui définit la frontière de la *no-go* zone avec la polaire de vitesse. La progression vers l'objectif se fait alors par une succession de manœuvres de virement de bord (lorsque le point de passage se situe face au vent, figure 5.13(c)) ou d'empannage (figure 5.13(d)).

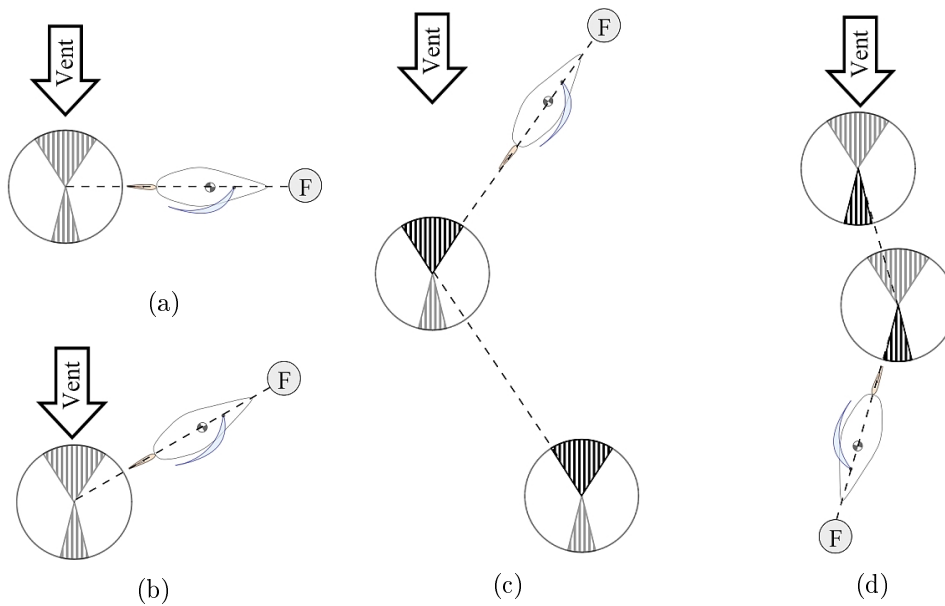


FIGURE 5.13 – Planification de mouvement à partir de la VMG (courbe polaire idéale)

Comme il est mentionné précédemment, la sélection d'un cap consigne se base sur la minimisation de fonctions de coût. La fonction de coût C_w permettant de guider le navire vers son objectif est définie de la manière suivante :

$$C_w = (1 - \eta_w VMG) \quad \text{avec } \eta_w \leq 1 \quad (5.9)$$

Dans cette expression, le terme VMG est normalisé : pour la polaire de vitesse de voilier utilisée, correspondant à la vitesse de vent courante, le maximum de la vitesse est ramené à l'unité.

Le terme η_w dans l'équation 5.9 correspond à un facteur d'hystérésis et peut être vu comme une déformation de la polaire de vitesse utilisée (cf illustration figure 5.14). Ce facteur est introduit pour deux raisons. Il permet d'une part d'obtenir une courbe donnant la VMG en fonction du cap ne présentant qu'un seul maximum. En effet, lorsque le vecteur \vec{B} (route directe vers l'objectif) et le vecteur vent réel sont colinéaires, cette courbe admet deux maxima, correspondant à deux caps symétriques par rapport à l'axe du vent. D'autre part, ce facteur d'hystérésis permet d'introduire une notion de coût associé à une manœuvre (de virement de bord ou d'empannage). Ce facteur d'hystérésis η_w est calculé de la façon suivante :

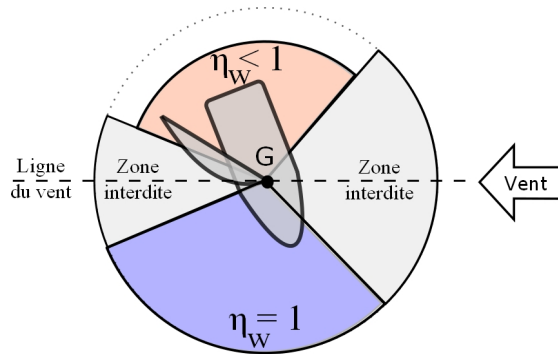


FIGURE 5.14 – Influence du facteur d'hystérésis sur les valeurs d'une polaire idéale normalisée

pour tout cap se situant sur le même côté de la polaire (par rapport à la ligne du vent) que le cap courant, η_w est égal à 1. Pour les caps se situant de l'autre côté de la polaire (par rapport à la ligne du vent) que le cap courant, η_w est inférieur à 1.

Pour illustrer l'influence de ce facteur d'hystérésis, nous avons évalué à l'aide du simulateur numérique du voilier *Asarome* plusieurs valeurs de η_w . Dans ces simulations le vent est constant en vitesse et direction (direction du vent : selon l'axe Y) et le point de passage se situe face au vent. Le cap consigne qui minimise la fonction de coût C_w , pour chaque instant de simulation, est transmis au module de commande qui réalise l'asservissement de cap. Les trajectoires résultantes pour différentes valeurs de η_w sont représentées figure 5.15.

Sur cette figure, on voit clairement que, plus le facteur η_w est proche de zéro, plus le coût associé à une manœuvre de virement de bord ou d'empannage est

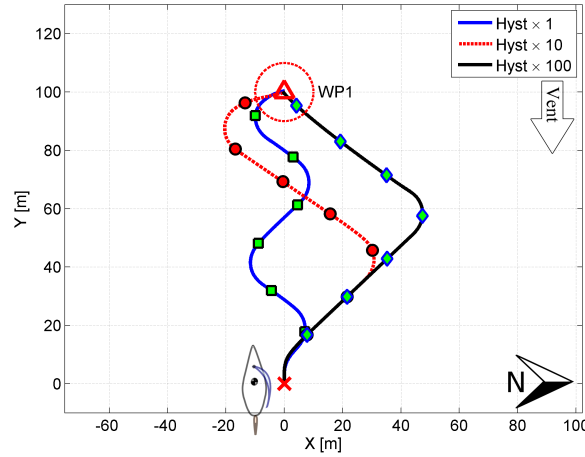


FIGURE 5.15 – Influence du facteur d'hystérésis sur la navigation

élevé ce qui conduit le voilier à rejoindre son objectif avec un nombre réduit de manœuvres.

Par voie de conséquence, la zone d'évolution autour de la route directe du voilier se trouve élargie lorsque η_w est proche de zéro (voir figure 5.15).

Au contraire, pour η_w proche de 1, le voilier réalise de nombreuses manœuvres pour rejoindre le point de passage, avec une zone d'évolution plus réduite autour de la route directe vers l'objectif.

Fonction de coût pour l'évitement d'obstacles

Pour permettre l'évitement d'obstacles, nous avons ajouté une seconde fonction de coût. Cette fonction de coût C_0 est définie par :

$$C_0 = \begin{cases} \left(\frac{1}{d_{obs}} - \frac{1}{d_0} \right) & \text{if } d_{obs} \leq d_0 \\ 0 & \text{if } d_{obs} > d_0 \end{cases} \quad (5.10)$$

où d_{obs} est la distance euclidienne mesurée entre le bateau et le barycentre de l'obstacle. Cette fonction de coût augmente lorsque la distance à l'obstacle d_{obs} diminue. Elle est nulle au delà de la distance d'influence de l'obstacle d_0 . Cette distance d'influence est choisie en fonction de la manœuvrabilité du voilier (cf section 3.5.5).

Notons également que R. Stelzer a étendu récemment sa méthode de sélection de cap pour tenir compte des obstacles [72]. Dans cette méthode, publiée en 2010, les obstacles détectés viennent déformer la polaire de vitesse du voilier en diminuant la vitesse sur les secteurs angulaires où les obstacles sont perçus, polaire déformée qui est ensuite utilisée pour réaliser la sélection de cap. Bien qu'utilisant une formalisation différente, ces travaux, effectués en parallèle des nôtres, aboutissent en fait à une prise en compte quasiment identique des obstacles.

Détermination d'un cap consigne

La fonction de coût complète C résulte de la combinaison des deux fonctions précédentes. Elle est définie par :

$$C = G_w C_w + G_0 C_0 = G_w (1 - \eta_w VMG) + G_0 C_0 \quad (5.11)$$

Les facteurs de pondération G_w et G_0 permettent, en fonction de leur poids respectifs, de privilégier la progression vers l'objectif, en passant éventuellement à proximité des obstacles ou au contraire de s'écarter fortement des obstacles (dans la limite de la valeur de distance d'influence) afin de rejoindre le point de passage.

A chaque période d'échantillonnage sur l'implémentation réelle sur le voilier (ou à chaque pas de simulation), la fonction de coût est évaluée sur une couronne autour du voilier. La valeur du cap qui minimise la fonction de coût C devient le cap consigne qui est transmis au module de commande.

Les résultats permettant de valider cette méthode de navigation par des simulations numériques sont présentées dans le chapitre 6, section §6.2.1 et §6.3.1. Cette validation se base sur des scénarios de test impliquant plusieurs points de passage et obstacles, sous différentes conditions de vent.

5.2.3 Méthode floue

Le caractère incertain de l'environnement, l'imprécision des modèles de comportement n'ont pas empêché les hommes de naviguer à bord de voilier depuis des millénaires. Cette navigation, basée sur l'expérience et des heuristiques, se prête bien à une approche de type logique floue comme le mentionne L. Zadeh, dès 1965 dans [123]. En robotique, on trouve une très vaste littérature sur les systèmes d'inférence flous, y compris pour l'évitement d'obstacles (voir par exemple [124] et [125]).

À partir de la description de la courbe polaire et des zones d'interdiction à la navigation (voir figure 5.8), la méthode proposée ici se base sur la recherche

du cap qui maximise la sortie net d'un système d'inférence floue (Fuzzy Inference System) de type Mamdani [126]. Les entrées de ce système d'inférence flou sont la vitesse effective vers l'objectif F et le coefficient de dangerosité des obstacles. Son objectif est de trouver le cap pour lequel le temps nécessaire pour atteindre la destination soit minimisé et, en même temps, que la distance entre le bateau et les obstacles soit maximisée. Cette méthode réagit aux changements de l'état de l'environnement (vitesse du vent, angle de vent, effets du courant d'eau sur le cap, ...) en re-calculant périodiquement le cap optimal.

Nous utilisons, comme dans la méthode précédente, la projection sur la route directe vers l'objectif de la vitesse potentielle (issue de la polaire) comme mesure de la vitesse effective vers l'objectif :

$$C_w = \eta_w(VMG) \quad (5.12)$$

avec η_w un facteur d'hystérésis, définit de la même manière que dans la section §5.2.2, permettant de privilégier les caps qui gardent la direction du bateau du même côté du vent, plutôt que ceux qui l'amènent à croiser la ligne du vent.

Le coefficient de dangerosité des obstacles perçus par le système de perception est déterminé, comme précédemment, par :

$$C_O = \begin{cases} \eta_o \left(\frac{1}{d_{obs}} - \frac{1}{d_0} \right) & \text{if } d_{obs} \leq d_0 \\ 0 & \text{if } d_{obs} > d_0 \end{cases} \quad (5.13)$$

Les entrées du système d'inférence flou sont donc la mesure de la vitesse effective vers l'objectif C_w et la mesure de la dangerosité des obstacles C_O . Les ensembles flous représentés figures 5.16(a) et 5.16(b) sont les représentations des variables linguistiques d'entrée pour le moteur d'inférence flou. Sur la figure 5.16(a), les valeurs négatives de C_w représentent l'ensemble des caps qui éloignent le voilier de son objectif.

La sortie du système d'inférence flou est la valeur de pertinence pour l'angle de cap évalué. La variable floue contient trois ensembles flous qui définissent cette pertinence, en termes linguistiques, comme mauvaise, moyenne et bonne (fig. 5.17(a)).

La base de règles du système d'inférence flou pour la sélection du cap est composé par 9 règles de la forme :

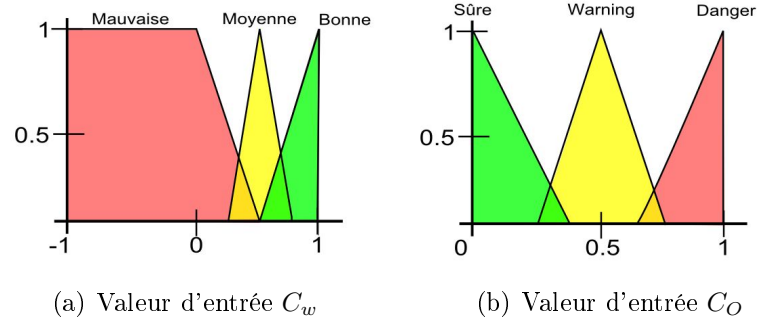


FIGURE 5.16 – Variables linguistiques d'entrée du moteur d'inférence flou

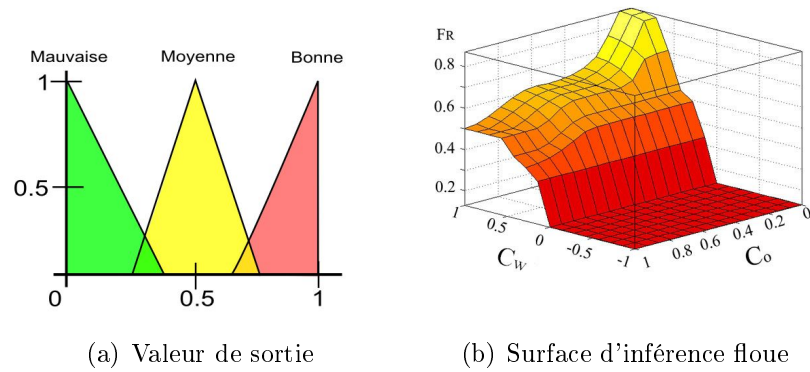


FIGURE 5.17 – Variable linguistique de sortie et surface d'inférence

IF la direction désirée est x **AND** obstacle est y **THEN** pertinence est Z

Ces règles sont les suivantes :

1. If (VMG est Bonne) then (Sortie est Bonne) ;
2. If (VMG est Moyenne) then (Sortie est Moyenne) ;
3. If (VMG est Mauvaise) then (Sortie est Mauvaise) ;
4. If (VMG est Bonne) and (Co est Sûre) then (Sortie est Bonne) ;
5. If (VMG est Bonne) and (Co est Warning) then (Sortie est Moyenne) ;
6. If (VMG est Bonne) and (Co est Danger) then (Sortie est Mauvaise) ;
7. If (VMG est Moyenne) and (Co est Sûre) then (Sortie est Moyenne) ;
8. If (VMG est Moyenne) and (Co est Warning) then (Sortie est Moyenne) ;
9. If (VMG est Moyenne) and (Co est Danger) then (Sortie est Mauvaise).

Ce moteur d'inférence flou est évalué périodiquement et l'angle de cap optimal maximisant ce système d'inférence devient le nouveau cap consigne, transmis au module de commande qui réalise l'asservissement de cap. En choisissant l'angle de cap qui maximise la valeur de sortie du système d'inférence flou le voilier peut naviguer en gardant son cap à l'extérieur des zones interdites à la navigation (fig. 5.8) tout en évitant les obstacles.

La validation de cette méthode sur différents scénarios de test par des simulations numérique est présentée dans le chapitre 6, section §6.2.2 et §6.3.2.

5.2.4 Méthode des champs de potentiels

La méthode des champs de potentiels, proposée initialement par Kathib [127] et Krogh [128], a été depuis largement utilisée pour la planification de trajectoire et la commande de robots manipulateurs ou de robots mobiles (voir quelques exemples dans [129], [130], [131], [132]).

Cependant, ces méthodes des champs de potentiel n'ont jamais été appliquées pour la navigation réactive de voiliers autonomes. L'adaptation de cette méthode au cas des voiliers robotisés consiste à construire des obstacles virtuels autour du bateau pour tenir compte des contraintes de navigation par rapport au vent (zones interdites de la polaire de vitesse) et de traduire également le coût des manœuvres de virement de bord par un potentiel répulsif virtuel. Les potentiels, associés à ces obstacles virtuels sont qualifiés par la suite de potentiels locaux dans le sens où ils se déplacent avec le voilier.

La méthode présentée ici considère deux champs de potentiel : un champ de potentiel global lié au point de destination finale, F (potentiel attractif) et aux obstacles (potentiel répulsif), et un champ de potentiel local (répulsif) lié à la direction du vent et au cap courant.

Potentiel global

Le champ de potentiel global est calculé classiquement afin d'attirer le voilier vers l'objectif et, en même temps, de l'éloigner des obstacles. Le potentiel attractif vers l'objectif, P_g , est construit pour chaque point P du plan comme indiqué dans l'équation 5.14, où G_g est le gradient d'attraction et $dist(P, P_F)$ la distance euclidienne entre la position courante du bateau, P , et le point de destination finale F . En effet, puisque la valeur de G_g est constante le potentiel P_g décrit un cône

centré sur F (voir exemple de représentation figure 5.21).

$$P_g = G_g \times \text{dist}(P, P_F) \quad (5.14)$$

Un potentiel répulsif lié aux obstacles, P_0 , localisé en P_{obst} est calculé également de manière classique pour chaque point P du plan par l'équation 5.15 où k_{obst} est une valeur scalaire réglable.

$$P_0 = \frac{k_{\text{obst}}}{\text{dist}(P, P_{\text{obst}})} \quad (5.15)$$

Ce potentiel répulsif tend vers l'infini lorsque le bateau se rapproche des obstacles. La position des obstacles peut être connue a priori (par utilisation d'une carte marine par exemple), ou bien les obstacles peuvent être localisés en temps réel par le système de perception embarqué.

Potentiel local

Ce champ de potentiel local est construit autour du voilier et il est re-calculé périodiquement à partir des données de vent (vitesse et direction) et du cap courant (fig. 5.18).

Ce potentiel local résulte de la somme de quatre potentiels répulsifs : un potentiel représentant la vitesse potentielle du voilier, un potentiel représentant la *no-go* zone de la polaire de vitesse correspondant au secteur angulaire face au vent, un potentiel représentant la *no-go* zone correspondant au secteur angulaire de vent arrière et un potentiel d'hystérésis lié au coût des manœuvres. La figure 5.18 illustre ce potentiel local.

Sur cette figure, la polaire de vitesse est considérée comme idéale. Pour tenir compte de la véritable polaire de vitesse du voilier, un potentiel associé aux caps navigables est calculé à partir de la polaire de vitesse selon l'équation 5.16.

$$P_s = G_s \cdot \frac{V_{\text{max}} - V}{V_{\text{max}}} \quad (5.16)$$

où, pour une vitesse de vent donnée, V représente la vitesse potentielle du voilier pour un cap donné et V_{max} , sa vitesse maximale.

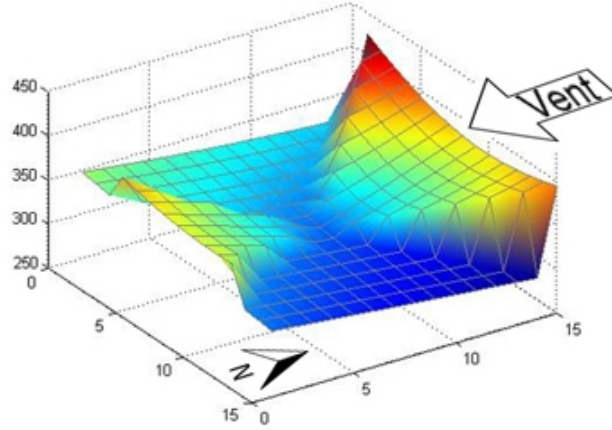


FIGURE 5.18 – Potentiel local autour du voilier

Pour prendre en compte la zone d'interdiction sous le vent (figure 5.8) un potentiel répulsif, P_{up} , est calculé dynamiquement pour chaque point P_w à l'intérieur d'une fenêtre centrée sur le barycentre du voilier (G). L'amplitude de P_{up} est fonction de l'angle ϕ entre la direction $\overrightarrow{GP_w}$ et la direction du vent. Cette amplitude, définie par l'équation 5.17, est linéaire à l'intérieur de la zone d'interdiction sous le vent, définie par l'angle ϕ_{up} . Pour les points en dehors de cette zone d'interdiction, sa valeur est nulle (fig. 5.19). G_{up} est la valeur du gradient désiré de la zone face au vent.

$$P_{up} = \begin{cases} G_{up} \times dist(P_w, G) & \text{si } 0 < |\phi| < \phi_{up} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (5.17)$$

De manière similaire, la *no-go* zone correspondant au secteur angulaire de vent arrière est représentée par un potentiel répulsif P_{down} , calculé de la même façon que le potentiel P_{up} , à l'exception de ϕ_{down} qui définit le secteur angulaire de vent arrière et de G_{down} qui définit la valeur du gradient désiré dans cette zone (voir figure 5.19).

$$P_{down} = \begin{cases} G_{down} \times dist(P_w, G) & \text{si } 0 < |\phi| < \phi_{down} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (5.18)$$

Comme dans les autres méthodes proposées (sections §5.2.2 et 5.2.3), il est nécessaire d'introduire un terme pour limiter ou contrôler le nombre de virements de

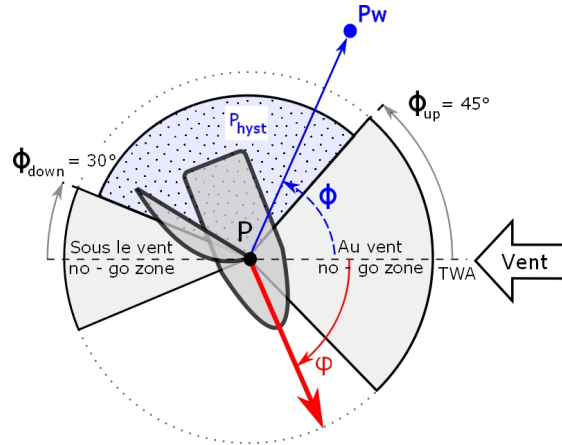


FIGURE 5.19 – Zones interdites (face au vent et par vent arrière), potentiel d’hystérésis (zone grisée) et définition des angles ϕ , ϕ_{up} et ϕ_{down}

bords ou d’empannage. Nous avons donc introduit un potentiel, P_h , dont l’amplitude est une fonction de l’angle ϕ et du dernier changement de bord. Par exemple, si le bateau navigue avec le vent venant de son côté gauche, P_h sera défini du côté droit afin de réguler le nombre de virements de bord et d’empannages (voir illustration figure 5.19). L’amplitude de ce champ est définie par le formule 5.19). Dans cette équation, la valeur du gradient désiré G_h , est un paramètre permettant de régler le coût des manœuvres des changement de bord.

$$P_h = \begin{cases} G_h \times dist(P_w, G) & \text{si } 0 < |\phi_{up}| < \pi - \phi_{down} \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad (5.19)$$

Comme pour la méthode basée sur la projection de la vitesse, nous présentons figure 5.20 des résultats de simulations pour illustrer l’influence de ce potentiel d’hystérésis. Les conditions de simulations sont identiques à celles de la figure 5.15 : vent constant en vitesse et direction (direction du vent : selon l’axe Y) et point de passage situé face au vent.

Sur cette figure, on voit que, plus le potentiel P_h est élevé, plus le coût associé à une manœuvre de virement de bord ou d’empannage est élevé ce qui conduit le voilier à rejoindre son objectif avec un nombre réduit de manœuvres et en s’écartant de la route directe vers l’objectif. Au contraire, pour P_h faible, le voilier réalise de nombreuses manœuvres pour rejoindre le point de passage, avec une zone d’évolution plus réduite autour de la route directe vers l’objectif.

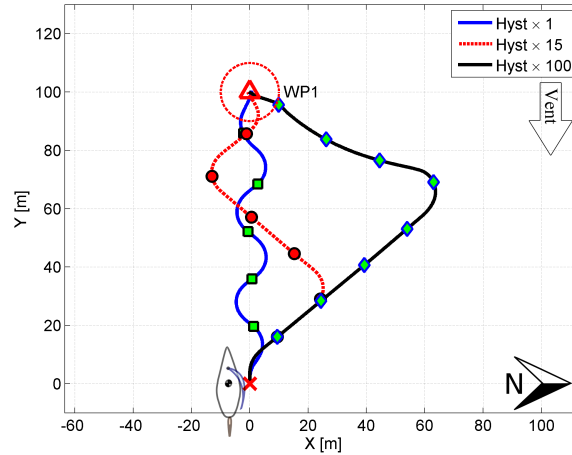


FIGURE 5.20 – Influence du potentiel d'hystérésis sur la navigation

Détermination d'un cap consigne

Le potentiel total P_t est calculé par addition de chacun des potentiels local et global.

$$P_t = P_g + P_0 + P_s + P_{up} + P_{down} + P_h \quad (5.20)$$

La figure 5.21 illustre ce potentiel total : l'objectif se situe dans le coin nord-est de la figure et trois obstacles ont été positionnés dans un voisinage du voilier. Sur cette figure, on observe également le potentiel local, centré sur la position courante du voilier, avec en particulier les deux potentiels répulsifs liés aux deux *no-go* zones de la polaire de vitesse de part et d'autre de cette position.

La détermination du cap consigne s'effectue par une descente de gradient sur le potentiel total P_t . La descente de gradient est calculée localement : on ne prend en compte qu'une zone du potentiel P_t autour de la position du bateau G . Cette partie du potentiel global a un rayon R qui est défini en fonction de la taille de la fenêtre d'exploration. Le cap consigne est l'angle qui correspond au minimum global de la zone extraite.

La validation de cette méthode sur différentes simulations numérique est présentée dans le chapitre 6, section §6.2.3 et §6.3.3 ainsi que dans la section §6.4 pour des test de validation sur la maquette de voilier autonome que nous avons réalisée.

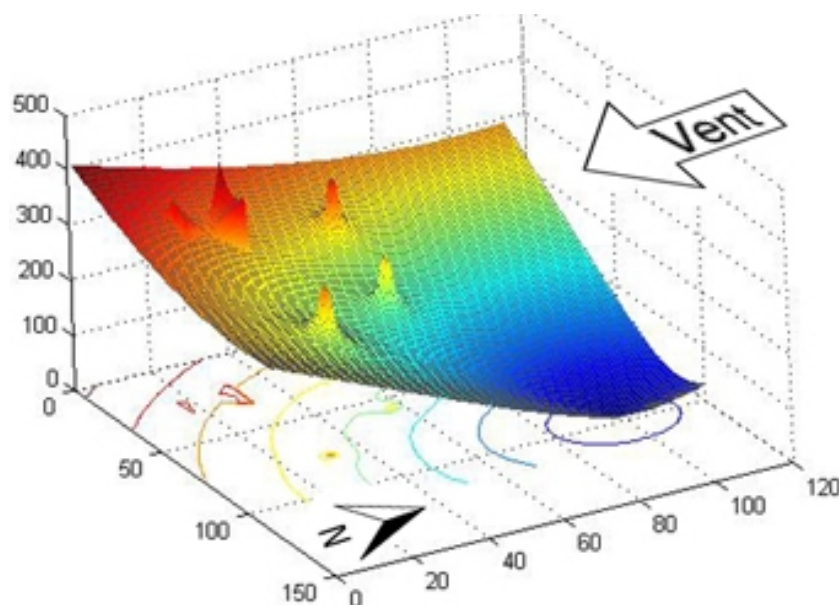


FIGURE 5.21 – Représentation du potentiel total du à l'objectif, aux obstacles et au potentiel local autour du point P

5.2.5 Limitation de la gîte

Dans la section §5.2, le dernier critère que nous avons évoqué concernant la sélection d'un cap portait sur le maintien de l'intégrité du voilier. Pour limiter le risque de chavirement (ou tout au moins, le risque de prise d'eau par des portions incomplètement étanches du pont), la gîte doit être limitée.

Dans la section 3.5.4, nous avons présenté la polaire de gîte du voilier *Asarome*, que nous avons construite par des essais successifs à l'aide du simulateur. Afin de faciliter la lecture, cette polaire de gîte est redonnée figure 5.22 ci-dessous. Sur cette courbe polaire de gîte, on voit que la gîte est maximale pour des allures de près à 45° et atteint un minimum local autour de 120° , quelque soit l'angle de voile. Ces caractéristiques, classiques sur les voiliers, sont exploitées dans l'algorithme de planification pour favoriser des caps correspondant à des valeurs de gîte réduite.

Afin d'introduire un terme visant à minimiser la gîte dans les différentes méthodes de sélection de cap présentées dans les sections §5.2.2 à 5.2.4, qui se basent toutes sur l'exploitation de la polaire de vitesse, nous avons décidé de déformer la polaire de vitesse en construisant une polaire de vitesse pondérée par la polaire de gîte.

5.2. NAVIGATION AVEC ÉVITEMENT D'OBSTACLES

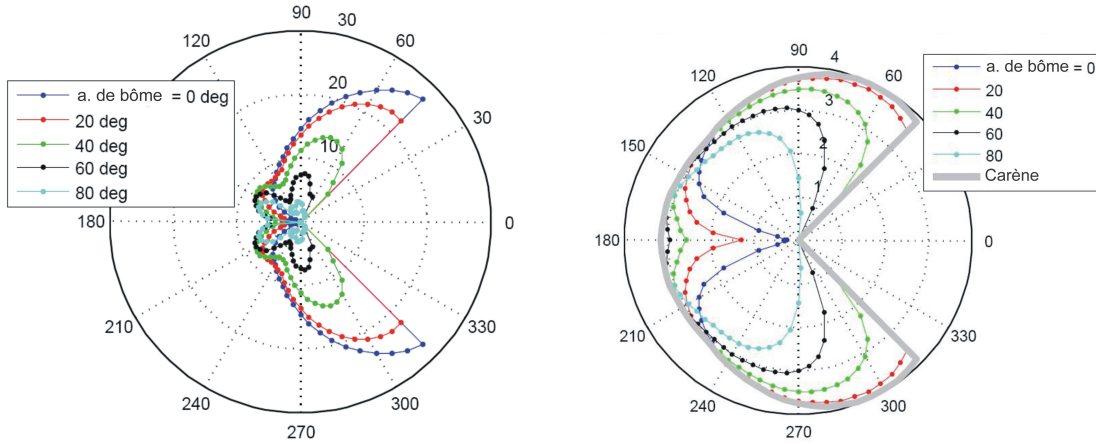


FIGURE 5.22 – Polaires de gîte et polaire de vitesse du voilier *Asarome* (vitesse de vent $TWS = 10nd$)

Les valeurs de cette nouvelle courbe ws pondérée sont déterminées par la relation 5.21, où V_B est la vitesse du voilier, h la gîte du bateau et h_{lim} est la valeur maximale admissible de la gîte.

$$ws(v, h) = V_B \left(\frac{h_{lim} - \min(h, h_{lim})}{h_{lim}} \right)^{1/2} \quad (5.21)$$

Un exemple de courbe polaire de vitesse pondérée, pour une gîte limite de 20° et une vitesse de vent de $10nd$ est donnée figure 5.23.

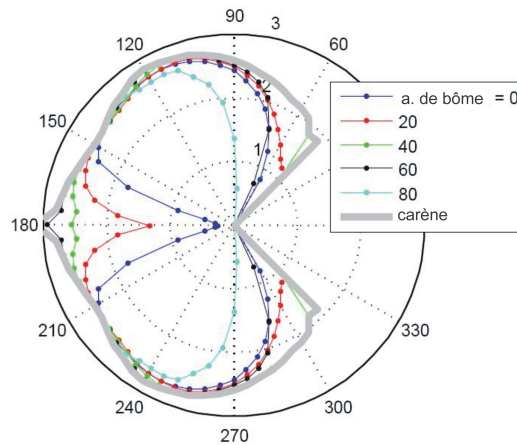


FIGURE 5.23 – Courbe polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte

Pour illustrer l'effet de cette déformation de la polaire de vitesse sur la sélection de cap, nous montrons sur les figures 5.24 et 5.25 les résultats de simulation obtenus en utilisant une polaire normale ou une polaire pondérée par la gîte dans la méthode de navigation basée sur les champs de potentiel. Dans le cas de l'utilisation de la polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte, le potentiel associé à la vitesse P_s est évalué en utilisant la vitesse pondérée ws et sa valeur maximale ws_{max} au lieu de la vitesse V et la vitesse maximale V_{max} dans l'équation 5.16 (page 132).

Pour cette simulation la vitesse du vent est constante (10 nd) et l'objectif se situe sur l'axe Y en (0,1000) m. Le cap initial du voilier est de 90° (par rapport à l'axe des x) et sa vitesse de 7 nd. L'angle de vent est initialement de 290° (par rapport à l'axe des X), correspondant donc à une allure qui fait faiblement giter le voilier. A $t = 50$ s, la direction du vent passe à 45° puis revient à sa valeur initiale après 50 s.

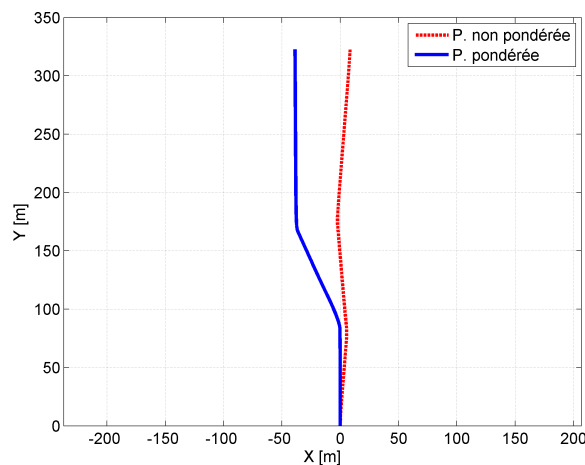


FIGURE 5.24 – Trajectoire du voilier obtenue en utilisant la polaire de vitesse normale et la polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte

Sur la figure 5.24, on voit que, pour la méthode des champs de potentiel utilisant la polaire pondérée, le cap consigne est modifiée de manière à retrouver une allure faisant moins gîter le voilier. Lorsque le vent repasse à sa valeur initiale, la consigne de cap revient également à sa valeur initiale, tendant à ramener le bateau vers son objectif. En utilisant la polaire de vitesse non pondérée, le voilier ne modifie pas son cap lorsque le vent change de direction. La figure 5.25 représente l'évolution temporelle de l'angle de gîte : sur ce relevé, on voit clairement que la modification de cap introduite en utilisant la polaire pondérée permet de

maintenir l'angle de gîte en dessous de sa valeur limite $h_{lim} = 20^\circ$. Les oscillations de l'angle de gîte au voisinage des temps $t = 50\text{ s}$ et $t = 100\text{ s}$ sont dues aux variations brutales de l'angle de vent et à la réponse transitoire en gîte qui en résulte.

NB : La valeur de 20° pour l'angle limite de gîte a été choisie arbitrairement afin d'illustrer le principe de cette méthode. Une valeur plus réaliste de cet angle limite se situerait plutôt aux environs de 40° pour le voilier *Asarome*.

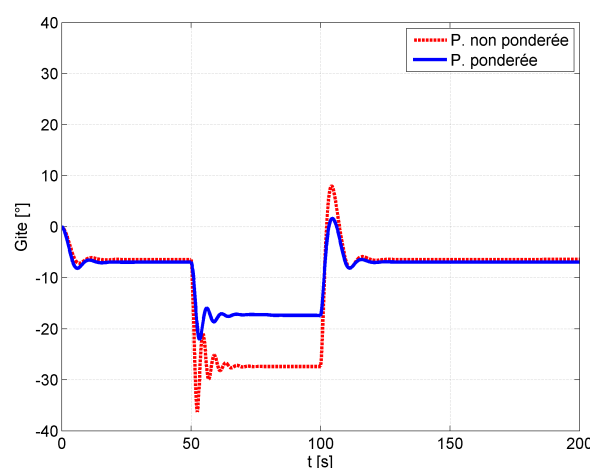


FIGURE 5.25 – Evolution temporelle de la gîte avec la polaire de vitesse normale et la polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte

Pour les autres méthodes de navigation, l'utilisation d'une polaire pondérée par les valeurs de gîte est également directe puisque ces méthodes utilisent aussi la polaire caractéristique du bateau pour calculer un cap consigne.

Cette méthode présente toutefois des limitations : elle s'avère en pratique assez peu commode à utiliser. En effet, l'utilisation d'une polaire de vitesse pondérée par l'angle de gîte a tendance par nature à faire en sorte que l'algorithme de navigation évite de sélectionner un cap correspondant à une allure de près. Lorsque'on s'approche d'un point de passage situé face au vent (et a priori accessible par une de près), le comportement du voilier dépend très fortement du réglage des deux coefficients définissant les pondérations entre l'attractivité de l'objectif et la répulsivité exercée par la limitation de l'angle de gîte. Selon les valeurs relatives de ces gains, on observe deux comportements limites : dans un premier cas, le voilier atteint son objectif de manière assez directe, tout au moins lorsqu'il arrive au voisinage du point de passage mais en violant la contrainte sur la valeur limite de

l'angle de gîte. Dans un second cas, le voilier s'écarte fortement de la route directe et éventuellement ne converge pas vers son objectif. Dans cette description, nous avons utilisé le vocabulaire lié à la méthode des champs de potentiel mais ces observations restent valables pour les deux autres méthodes que nous avons développées.

Dans le scénario de tests en simulation présenté dans le chapitre 6, où la distance entre les points de passage et entre les obstacles et les points de passage sont proches, cette méthode ne sera donc pas testée.

Elle garde toutefois son intérêt lorsque le point à rallier se situe à grande distance par rapport au bateau, sur une route dégagée.

5.3 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à décrire les contenus des deux modules logiciels principaux permettant de piloter un voilier robotisé : le module de navigation (qui détermine les consignes de cap et d'angle de voile) et le module de commande (qui réalise l'asservissement de cap).

Nous avons présenté en particulier les trois méthodes que nous avons développées pour faire naviguer un voilier à travers un ensemble quelconque de points de passages tout en évitant les obstacles. La première méthode, basée sur la projection de la vitesse sur la route directe, reprend la méthode de R. Stelzer et l'étend de manière à pouvoir tenir compte des obstacles dans la sélection de cap. La seconde méthode est basée sur cette première méthode mais repose sur une implémentation basée sur un moteur d'inférence flou. La troisième méthode, fondée sur la méthode des champs de potentiels, présente la particularité de représenter les capacités de déplacement (i.e. la courbe polaire de vitesse du voilier) du voilier par des obstacles virtuels se déplaçant avec le voilier et se déformant en fonction des conditions instantanées de vent.

Enfin, nous avons présenté dans la section §5.2.5 une méthode permettant de limiter les risques de chavirement ou d'avaries sous l'effet d'une trop forte gîte du voilier en privilégiant des angles de cap limitant l'angle de gîte.

Ces algorithmes de navigation réactive ont été testés et ont donné lieu à des publications : [133] pour la méthode basée sur la projection de la vitesse, [134] pour la méthode utilisant un moteur d'inférence flou, [135, 136] pour la méthode basée sur les champs potentiels et [137] pour la limitation de la gîte.

Dans le chapitre (6), nous présentons le protocole d'essai utilisé pour valider les algorithmes proposés. Ce protocole a été conçu pour soumettre le simulateur et le prototype à plusieurs scénarios qui impliquent différents angles et vitesses de vent ainsi que la présence d'obstacles. Pour les raisons évoquées en fin de section §5.2.5, la méthode permettant de limiter l'angle de gîte ne sera pas testée dans ces simulations. Toujours dans le chapitre 6 nous montrons les résultats obtenus lors de tests de navigation autonome réalisées sur un lac avec le voilier que nous avons développé. L'algorithme de navigation testé utilise la méthode des champs de potentiels.

6

Résultats

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de navigation réactive obtenus avec les trois méthodes développées dans le chapitre précédent. La première est fondée sur la projection de la vitesse potentielle du voilier, la seconde utilise le formalisme de la logique floue et la troisième est basée sur la méthode des champs de potentiels.

Ces trois algorithmes ont dans un premier temps été validés par des simulations numériques. Ces tests de validation sont menés de façon progressive en faisant varier les conditions d'essai. Des essais ont tout d'abord été réalisés sans obstacle, avec un vent constant (en vitesse et en direction) et en utilisant la courbe polaire de vitesse réelle du voilier. Ensuite, différentes combinaisons de conditions de simulation ont été testées, correspondant à des cas d'implémentation plus réalistes : vent constant/polaire idéale, vent réel/polaire réelle et vent réel/polaire idéale. Une comparaison des performances de chacune de ces méthodes est ensuite menée sur la base de ces essais numériques.

Ensuite, nous présentons les résultats de simulations menées afin d'évaluer l'efficacité de chacun des algorithmes de navigation avec évitement d'obstacle. Un obstacle est introduit en différents points le long du parcours du voilier et des simulations sont menées, avec les mêmes combinaison de conditions que précédemment. Nous avons également évalué l'effet des obstacles sur la trajectoire quand ils sont proches du point visé en diminuant la distance entre l'obstacle et le *waypoint* courant.

Finalement, nous présentons les résultats obtenus avec le voilier à échelle réduite lors de tests de navigation sur un lac. Ces expérimentations portent sur l'asservissement de cap et la sélection d'un cap consigne par la méthode des champs potentiels.

6.1 Conditions de simulation

Afin de tester d'une manière systématique les algorithmes de navigation nous avons construit un parcours similaire à ceux utilisés dans les régates. Ce parcours de test est défini à partir de cinq points (x,y) dans le plan : $WP_1 = (0,0)$: point de départ et d'arrivée ensuite, $WP_2 = (50,0)$, $WP_3 = (50,50)$, $WP_4 = (15,85)$ et $WP_5 = (-13,50)$.

Ce parcours, illustré figure 6.1(a), permet de soumettre le bateau à toutes les allures possibles (fig. 6.1(b)) ainsi qu'aux manœuvres de virement de bord et d'empannage. La distance moyenne entre ces points est assez faible et correspond à une situation de régate assez peu réaliste. Toutefois, ces distances sont compatibles avec la manœuvrabilité du voilier et permettent de bien mettre en évidence les différences de comportement entre les algorithmes testés. Avec une distance plus grande entre chaque point de passage, les différences de trajectoire auraient été masquées par ce changement d'échelle.

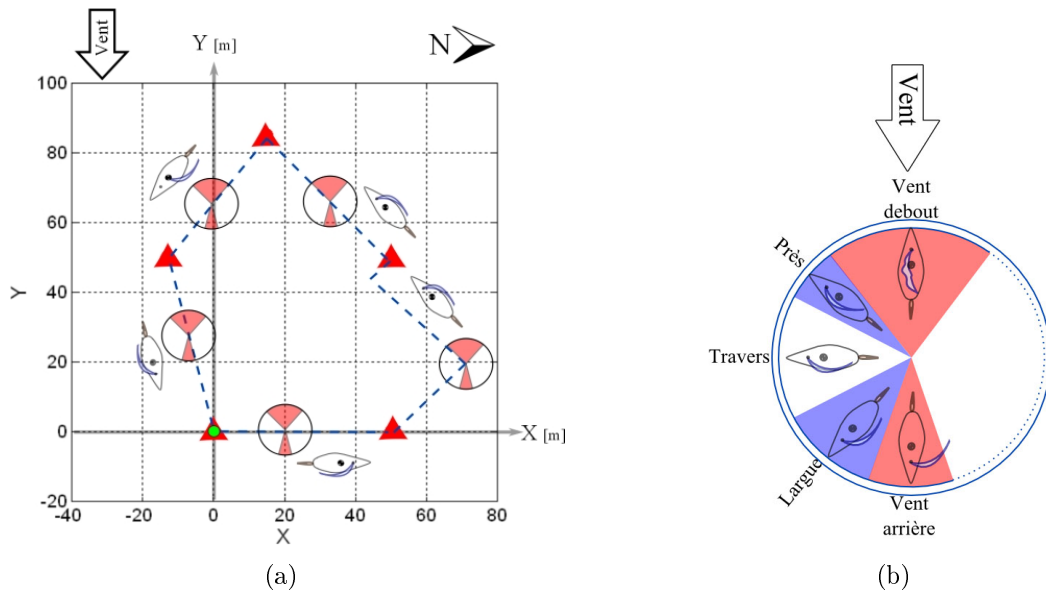


FIGURE 6.1 – (a) Plan des manœuvres pour la validation des algorithmes de navigation et (b) : allures d'un voilier

Les essais ont été divisés en deux parties, selon les conditions de vent. La première partie de ces essais est réalisée avec un vent constant ($TWA=90^\circ$ et $TWS=10\text{ nd}$). Ces premiers tests permettent d'une part de valider les algorithmes de navigation dans un cas simple et d'autre part de comparer aisément entre eux

6.1. CONDITIONS DE SIMULATION

les trois algorithmes. Pour la deuxième partie, le vent a été simulé à partir d'un profil de vent réel acquis sur le terrain avec un anémomètre CV3F 2D (fig. 6.2). Pour cet enregistrement, l'angle de vent moyen est de 90° par rapport au Nord (axe X) et la vitesse moyenne du vent de 6 nd .

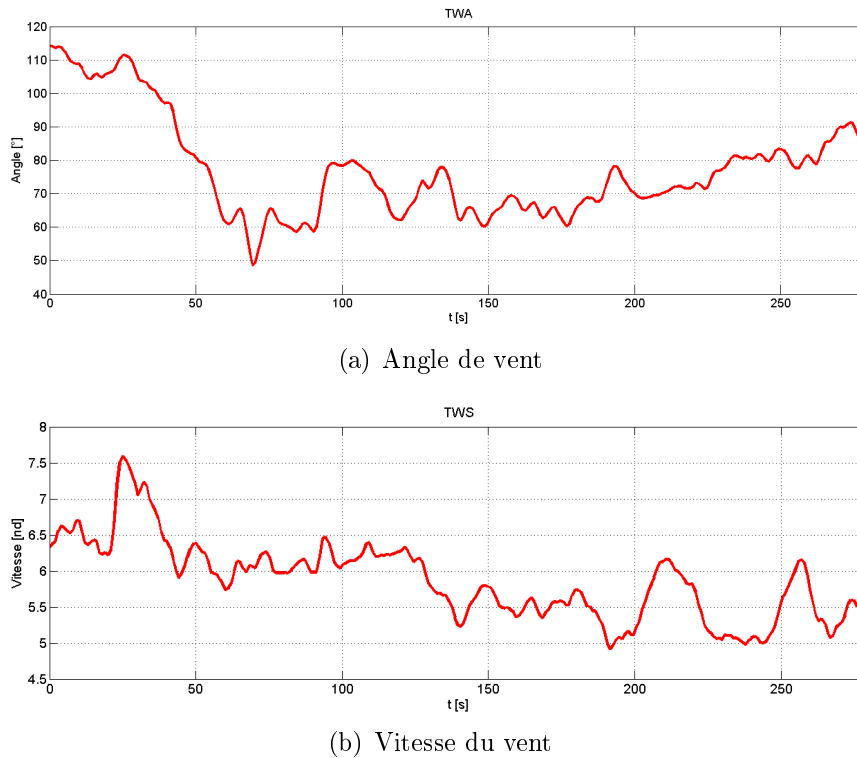


FIGURE 6.2 – Profil de vent réel

En raison des conditions de vent variables et des courants, il est en pratique assez difficile pour un voilier d'atteindre un point précis. Pour éviter que le bateau navigue de façon indéfinie autour d'un *waypoint* qui n'a pas été atteint précisément, nous avons défini pour ces simulations des zones de réussite (fig. 6.3). Le critère utilisé dans les algorithmes de navigation afin de gérer ces zones est relativement simple. Il s'agit d'un critère d'arrêt : dès que le voilier arrive dans une zone circulaire de rayon R_a autour de son objectif, cet objectif est considéré comme atteint et le *waypoint* suivant dans la liste devient le nouvel objectif. La valeur de R_a est égale à 10 m pour l'ensemble des simulations. Cette valeur du rayon d'approximation est compatible avec les essais en virage réalisés dans le chapitre 3 §3.5.5. En effet, la valeur constatée de l'avance à 90° du voilier pour une vitesse de vent de 10 nd (soit une vitesse bateau au près de $3,8\text{ nd}$) est de l'ordre de 10 m (cf figure 3.18, page 70).

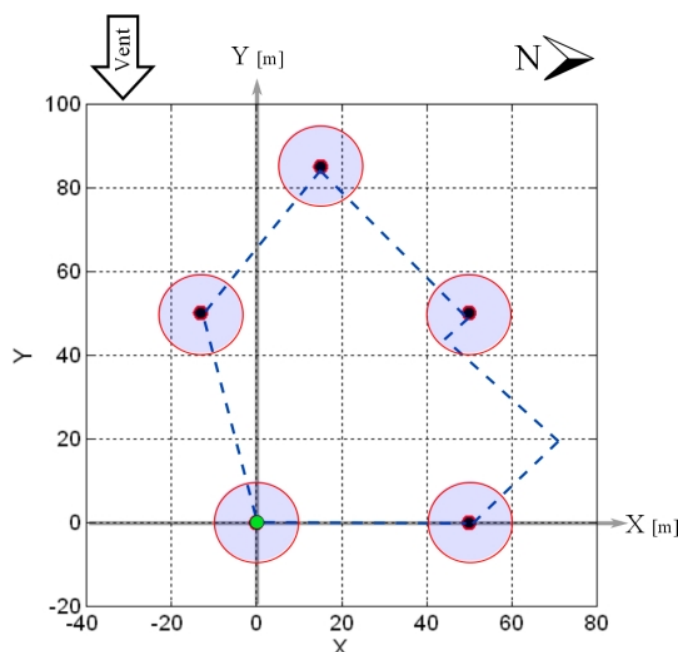


FIGURE 6.3 – Définition des rayons d'approximation

Dans chacun des algorithmes, les zones interdites (no-go zones) des courbes polaires de vitesse correspondent à des secteurs angulaires de $\pm 45^\circ$ pour le vent de face et de $165^\circ - 195^\circ$ pour le vent arrière. Les 3 types de polaire ayant été utilisées sont illustrées figure 6.5. Ces polaires correspondant aux vitesses de vent observées pendant les simulations (5 et 10 nœuds). Elles sont normalisées (la vitesse maximale pour une vitesse de vent donnée est ramenée à l'unité) pour leur utilisation dans les algorithmes de navigation.

Pour la validation des algorithmes de navigation avec évitement d'obstacles, nous utilisons un obstacle statique pour tous les essais. Il est placé en différents points sur le chemin entre deux *waypoints* afin de représenter une perturbation pour l'ensemble des algorithmes. Le choix d'utiliser un obstacle fixe n'empêche pas la considération d'obstacles en mouvement vu que les algorithmes de perception sont assez rapides pour traiter et représenter les obstacles, fixes ou dynamiques, sur la carte locale de navigation.

A chaque itération des algorithmes de navigation, un nouveau cap consigne est sélectionné en évaluant les fonctions de coût (ou les potentiels) sur une couronne circulaire autour du voilier. A chaque itération, les conditions de vent (vitesse et

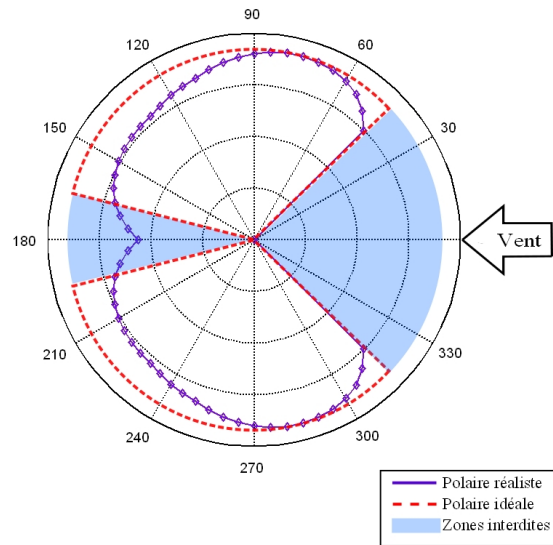
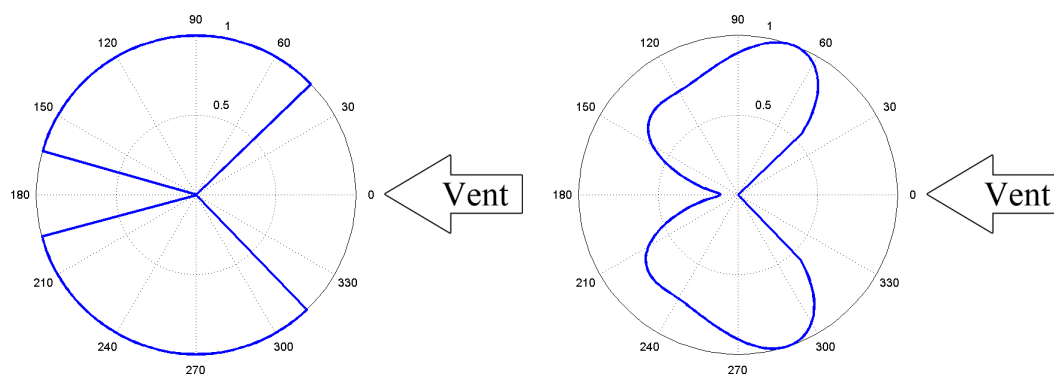


FIGURE 6.4 – No-go zone des polaires de vitesse idéale et réelle

direction) ainsi que la carte des obstacles sont mises à jour. Le pas d'évaluation sur la couronne circulaire est fixé à 1° . Pour les simulations effectuées sans couplage avec le simulateur, la position est incrémentée de 1 m dans la direction indiquée par le cap sélectionné. Pour les simulations couplées avec le simulateur, la position est incrémentée de la valeur du déplacement donnée par le simulateur. La période temporelle d'appel au simulateur est fixée à 100 ms .

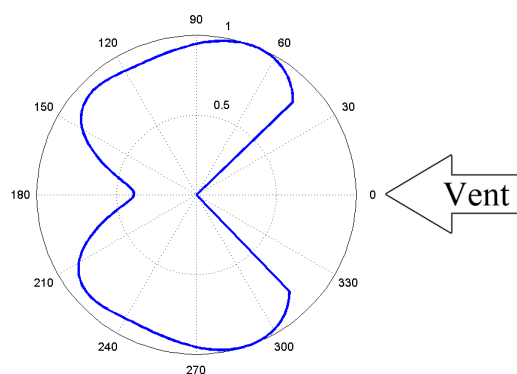
Ensuite, afin de suivre le cap calculé à partir des algorithmes de navigation, l'asservissement de cap est assuré par un régulateur PID. Ces simulations ayant comme objet de valider les algorithmes de sélection de cap, la valeur de l'angle de voile est déterminée à chaque instant à partir des courbes polaires de bôme présentées chapitre 3 §3.5.3 (figure 3.13 page 65). Ce choix d'angle de voile permet de maximiser à chaque instant la vitesse, indépendamment de considérations sur la consommation énergétique.

Finalement, pour chacune des simulations effectuées, la position et l'orientation initiale du bateau sont signalées par le voilier placé au-dessous de l'origine. La direction du vent est indiquée soit avec une flèche pour les conditions de vent constant, soit avec la légende "*vent réel*". Dans le deuxième cas, la référence du profil du vent réel utilisée est donnée dans les figures 6.2(a) pour l'angle absolu du vent (*TWA*) et 6.2(b) pour sa vitesse. Afin d'avoir une corrélation temporelle entre les courbes de vent et les courbes d'avancement du voilier, des marqueurs (carrés verts) ont été ajoutés aux graphiques des trajectoires. L'écart entre chacun



(a) Polaire idéale

(b) Polaire réelle : 5 nd



(c) Polaire réelle : 10 nd

FIGURE 6.5 – Courbes polaires utilisées pour les simulations

des marqueurs représente un temps égal à 10 s. Les paramètres d'hystérésis et les coefficients de pondérations des différents algorithmes ont été réglés de manière à obtenir un comportement similaire. La taille de la carte locale reste constante pour chacune des simulations afin de faciliter les comparaisons.

Étant donné que ce scénario d'essais prend en compte les conditions variées de navigation d'un voilier, nous pouvons considérer qu'il s'agit d'une méthode de validation complète.

6.2 Navigation réactive sans obstacles

Sur chacune des figures correspondant à des simulations sous des conditions de vent constant, nous avons tracé deux courbes : la rouge (ligne pointillée) représente la trajectoire calculée par l'algorithme de navigation sans prendre en compte la dynamique du voilier. La bleue (ligne pleine) représente la trajectoire calculée par l'algorithme de navigation couplé au simulateur dynamique. Pour les simulations sous conditions de vent réel, seules les courbes provenant du couplage des algorithmes sélection de cap avec le simulateur sont présentées. En effet, sans couplage avec le modèle dynamique, il est impossible d'obtenir pour chaque itération de l'algorithme un état (cap et vitesse en particulier) du voilier et des conditions de vent similaires, ce qui rend la comparaison des résultats obtenus avec et sans appel au simulateur sans objet.

6.2.1 Méthode par projection de la vitesse

Cette méthode de sélection de cap s'appuie sur l'évaluation d'une fonction de coût construite en projetant, pour un cap donné, la vitesse du voilier issue de la polaire de vitesse sur l'axe reliant la position du voilier à son l'objectif. Cette fonction de coût représente l'efficacité de l'avance vers l'objectif. Une autre fonction de coût permet de tenir compte des obstacles éventuels.

Il est possible de constater que l'algorithme de sélection de cap, testé sous conditions très favorables (vent constant, polaire idéale, dynamique du voilier négligée), est capable de calculer un chemin qui rejoint la totalité des *waypoints* (fig. 6.6(a) "P.T."). L'allure de ce chemin est complètement en accord avec les caractéristiques du vent et de la polaire utilisées. Entre les *waypoints* 1 et 2 le voilier suit une allure de travers, ce qui rend possible la navigation en ligne droite. Ensuite, entre les *waypoints* 2 et 3 le bateau est soumis à un vent de face. Cette allure ne permet pas d'aller directement dans la direction du WP_2 donc il est nécessaire de

*louvoyer*¹ afin de poursuivre dans ce sens. Pour *louvoyer* efficacement, l'allure qui donne le meilleur compromis cap - vitesse pour cette condition du vent est l'allure *au près*. Cet allure est définie, sur la courbe polaire de vitesse, par l'angle qui est à la limite de la zone navigable et de la zone d'interdiction du vent de face. Alors, nous pouvons remarquer que, pour remonter au vent, l'algorithme de navigation fait une sélection qui offre un bon compromis cap - vitesse permettant au bateau de s'approcher de l'objectif le plus rapidement possible.

Ensuite, pour atteindre les WP_4 et WP_5 , la direction du vent permet de naviguer directement avec des allures de large.

Quant au vent entre le WP_5 et l'origine, il est à l'arrière du bateau. L'allure de vent arrière étant très instable, à cause du risque d'empannage non contrôlé, la zone d'interdiction dans la polaire idéale empêche l'algorithme de sélectionner un cap correspondant à une allure de vent arrière. Nous aurons donc une consigne de cap dirigeant le voilier dans l'allure de grand large (cf. figure 6.5(a)) puis un empannage lorsque le voilier arrive à proximité de son objectif.

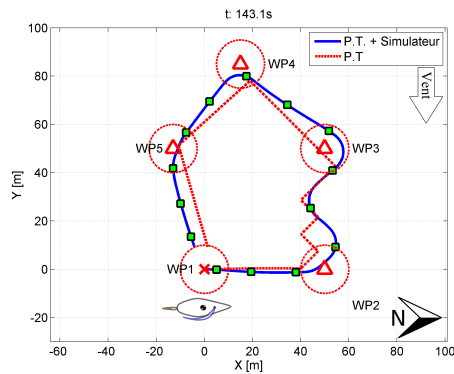
Concernant le résultat du couplage du simulateur(P.T. + Simulateur, fig. 6.6(a)), on constate que la trajectoire est lissée par l'effet de la dynamique du bateau mais, malgré tout, l'algorithme de navigation reste capable de sélectionner un cap permettant au voilier de rallier chacun des *waypoints*. Les deux cas présentés (avec et sans couplage avec le simulateur) affichent une similitude de comportement évidente.

Dans un deuxième temps, nous avons répété l'expérience mais cette fois avec la courbe polaire de vitesse réelle (cf. figure 6.5). Dans ce cas, l'algorithme est toujours capable de sélectionner un cap permettant d'amener le voilier à passer par chacun des *waypoints* (cf. figure 6.6(b)). En comparant les résultats avec ceux obtenus en utilisant une polaire idéale, nous pouvons constater quelques modifications dues aux différences de forme entre ces deux polaires. En effet, avec la polaire réelle, l'algorithme a tendance à privilégier des caps correspondant plus à des allures de travers ce qui se traduit par des trajectoires qui s'éloignent plus de la ligne droite joignant deux points de passage en particulier par des conditions de navigation par vent de face ou par vent arrière. Cet écart est particulièrement visible en comparant les résultats obtenus sans couplage au simulateur (courbes rouges pointillées sur les figures 6.6(a) et 6.6(b)).

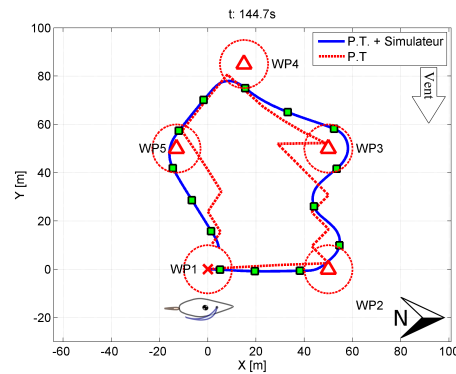
1. L'action de *louvoyer*, en vocabulaire maritime, est, pour un voilier, de tracer des zigzags afin de "remonter" au vent.

6.2. NAVIGATION RÉACTIVE SANS OBSTACLES

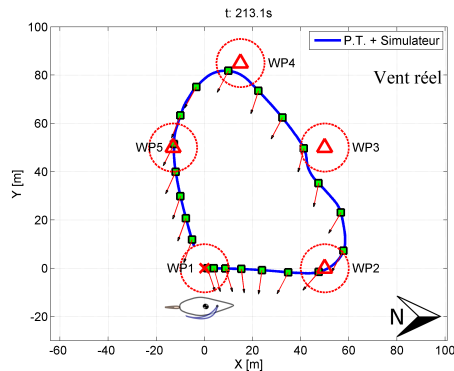
Les figures 6.6(c) et 6.6(d) montrent respectivement les trajectoires obtenues pour des simulations effectuées avec un vent réel et en utilisant soit la polaire idéale soit la polaire réelle. Nous voyons que la similitude de comportement entre les simulations avec la polaire idéale et la polaire réelle sont conservées bien que le vent ne soit plus constant. Le changement de la forme générale de la trajectoire, par rapport aux trajectoires tracées sous conditions de vent constant, s'explique par le fait que les variations instantanées de la direction du vent font que le cap calculé change légèrement à chaque itération. Le comportement global lié à la dynamique du bateau, qui ne permet pas de changements instantanés de cap, agit comme un filtre passe bas lissant l'ensemble de la trajectoire.



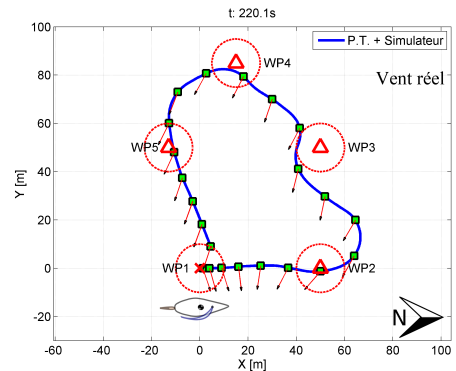
(a) Avec polaire idéale et vent constant



(b) Avec polaire réelle et vent constant



(c) Avec polaire idéale et vent réel



(d) Avec polaire réelle et vent réel

FIGURE 6.6 – Sélection de cap par projection de la vitesse (sans obstacle)

Avec cette série de simulations, nous avons validé l'efficacité de l'algorithme de sélection de cap par projection des caractéristiques de la polaire de vitesse. Les résultats présentés confirment la possibilité de calculer une route navigable entre

deux *waypoints* indépendamment de leur localisation par rapport à la direction du vent. Ces résultats ne sont pas une surprise dans la mesure où l'algorithme traduit la stratégie des navigateurs lors de course au large. Par ailleurs, cet algorithme, publié initialement par R. Stelzer dans [70] a été implémenté, testé et validé par ce dernier lors des différentes compétitions *WRSC* auquel il a participé avec le voilier robotisé *RoBoat*. Toutefois, ces différentes simulations nous ont permis de valider le couplage des algorithmes de navigation avec le simulateur numérique de voilier. Par ailleurs, cet algorithme de navigation constitue un point de référence pour les autres méthodes de sélection de cap développées dans le cadre de cette thèse.

6.2.2 Méthode par inférence floue

La méthode de sélection de cap précédente a été codée en logique floue. Le cap consigne est la valeur qui maximise la sortie d'un système d'inférence floue de type Mamdani. Les deux entrées du système d'inférence floue sont les fonctions de coût représentant l'efficacité de l'avance vers l'objectif (la projection, pour un cap donné, de la vitesse issue de la courbe polaire sur l'axe voilier-objectif) et l'influence des obstacles. La valeur de la sortie, pour chaque cap évalué, est le résultat de l'application d'un système de 9 règles combinant les deux entrées. Les résultats attendus avec cet algorithme doivent être très similaires à ceux obtenus avec la méthode par projection de la vitesse.

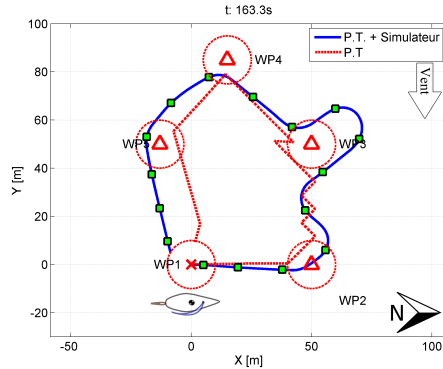
Dans les figures 6.7(a) (vent constant, polaire idéale) et 6.7(b) (vent constant, polaire réelle) nous observons que le chemin résultant passe par tout les *waypoints* en respectant les restrictions de navigation dues aux *no-go* zones des courbes polaires.

En couplant l'algorithme au simulateur, nous observons une trajectoire plus lissée comparée à celles obtenues dans les mêmes conditions avec la méthode précédente par projection de la vitesse. Ce comportement s'explique par le fait que la valeur du cap déterminée par le système flou est calculée à partir du barycentre du polygone qui représente l'ensemble flou de sortie. Étant donné que les valeurs d'entrée ne changent pas de façon abrupte, l'abscisse du barycentre, c'est-à-dire la valeur du cap de consigne, garde le même comportement. Le principal avantage de cette souplesse dans la trajectoire est la minimisation de l'actionnement du gouvernail, ayant pour conséquences une réduction des manœuvres qui font gêner le bateau ainsi qu'une économie énergétique. Son inconvénient est une réactivité moins bonne ce qui se traduit par des trajectoires qui ont tendance à s'éloigner plus de la ligne droite entre deux points de passage et donc potentiellement un temps de navigation en augmentation par rapport aux temps obtenus avec les

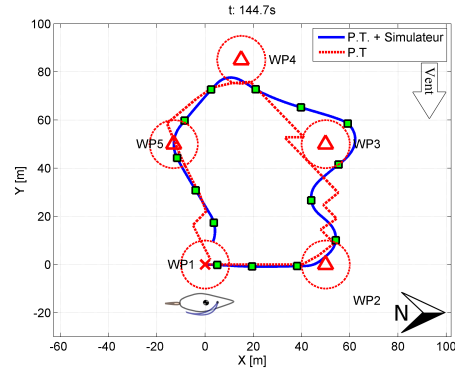
6.2. NAVIGATION RÉACTIVE SANS OBSTACLES

autres méthodes de navigation.

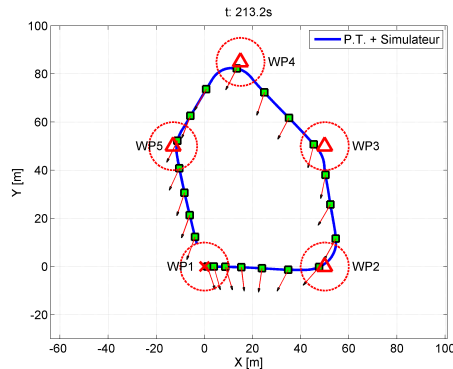
Dans les simulations effectuées sous conditions du vent réel, figures 6.7(c) et 6.7(d), nous vérifions la robustesse de l'algorithme. Les différences d'accélération au départ, la vitesse maximale et la forme générale de la trajectoire dépendent du type de courbe polaire utilisé.



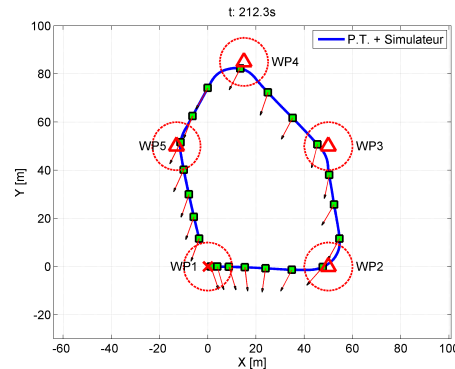
(a) Avec polaire idéale et vent constant



(b) Avec polaire réelle et vent constant



(c) Avec polaire idéale et vent réel



(d) Avec polaire réelle et vent réel

FIGURE 6.7 – Sélection de cap par logique floue (sans obstacle)

6.2.3 Méthode des champs de potentiels

Cet algorithme de navigation s'appuie sur la méthode des champs de potentiels. Un potentiel attractif est classiquement attaché au *waypoint* courant. Ce potentiel croît linéairement avec la distance à l'objectif à rejoindre. Un deuxième potentiel, local au sens où il est lié au navire, est ensuite créé de manière à représenter les

no-go zones de la polaire de vitesse comme des obstacles virtuels.

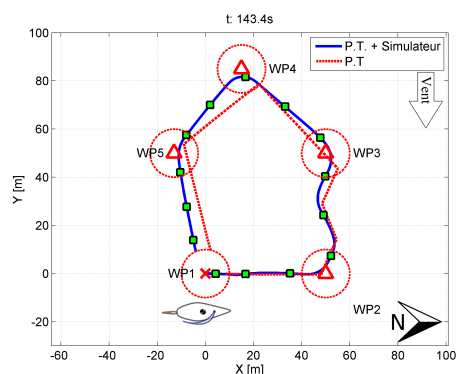
Le résultat brut de la navigation réactive (P.T.), sans tenir compte de la dynamique du voilier, est montré en rouge (pointillé) sur les figures 6.8(a) et 6.8(b). D'après ces courbes, nous pouvons déduire que, comme dans les autres cas, l'algorithme est capable de conduire le voilier pour le faire passer par tous les *waypoints*. Cet algorithme se démarque des autres déjà décrits, par ses meilleures performances pour le calcul du cap instantané. Cette caractéristique est facilement observable dans le voisinage des *waypoints* où la distance entre le chemin obtenu et les points de passage est inférieure à celle trouvée avec les autres méthodes. Cette précision est maintenue même lorsque la simulation est effectuée en tenant compte de la dynamique du voilier (lignes pleines).

Les figures 6.8(c) et 6.8(d)) nous permettent de vérifier le bon fonctionnement de l'algorithme pour gérer les scénarios avec un vent variable. Nous pouvons remarquer que le calcul du cap consigne par cette méthode aboutit également à un comportement assez réactif du voilier est correcte même lorsque le bateau est soumis à un vent variable. Il est évident que, à part pour l'allure du vent arrière (à cause des différences entre les *no-go zones* de vent arrière de la polaire idéale et de la polaire réelle), le comportement de l'algorithme de navigation reste équivalent pour les deux types de polaires utilisées.

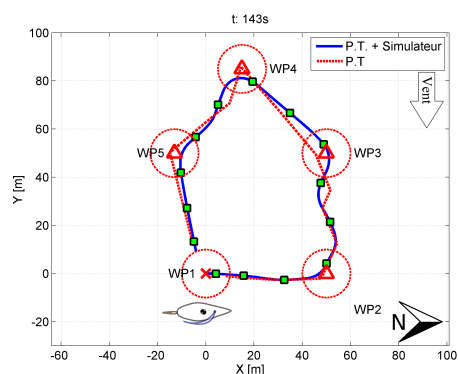
Les simulations effectuées jusqu'à présent ont montré que les trois algorithmes de navigation permettent de piloter un voilier vers son objectif, quelque soit sa position par rapport au vent. Nous avons vu aussi que ces méthodes dépendent peu de la connaissance spécifique du comportement du voilier. Les résultats obtenus en utilisant la courbe polaire réelle et la courbe polaire idéale demeurent très similaires. Par ailleurs, en comparant les résultats de ces trois méthodes, nous pouvons constater que les trajectoires obtenues avec la méthode des champs potentiels sont plus réactives que celles obtenues avec les deux autres méthodes. Les temps de parcours, pour ces trois méthodes sont très similaires, la faible distance entre les points de passage ne permettant pas de conclure sur l'efficacité comparée de ces différentes méthodes par rapport à ce critère de temps.

Dans la prochaine partie de ce chapitre, nous présenterons les résultats de l'intégration des algorithmes de navigation et des stratégies d'évitement d'obstacles.

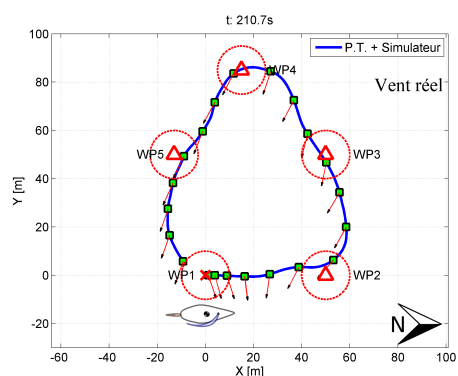
6.2. NAVIGATION RÉACTIVE SANS OBSTACLES



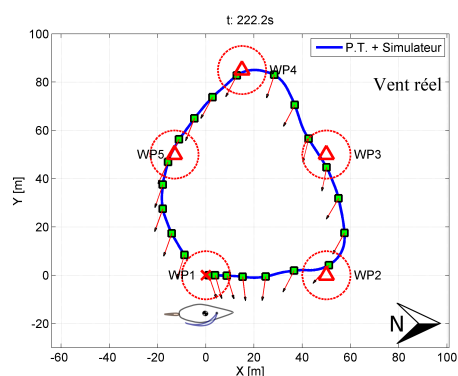
(a) Avec polaire idéale et vent constant



(b) Avec polaire réelle et vent constant



(c) Avec polaire idéale et vent réel



(d) Avec polaire réelle et vent réel

FIGURE 6.8 – Sélection de cap par la méthode des champs potentiels (sans obstacle)

6.3 Navigation réactive avec obstacle

Dans la section §6.2, nous avons vérifié que les trois algorithmes de navigation étaient capables de guider un voilier à travers une liste de points de passage avec des conditions de vent constantes. Nous avons également constaté qu'en utilisant des données de vent réels, cette capacité était maintenue et que l'usage d'une polaire réelle ou d'une polaire idéale n'avait qu'une influence marginale sur les trajectoires résultantes. Dans la suite de ce chapitre, nous nous concentrerons donc sur les résultats des simulations avec évitement d'obstacles sous conditions de vent constant et en utilisant la polaire idéale. Néanmoins, afin d'illustrer le comportement sous toutes les conditions d'essai, nous avons décidé de montrer pour chaque cas, les figures correspondant aux simulations avec vent réel ainsi que celles qui exploitent la polaire réelle. Sur chacun de ces résultats de simulation, nous avons fait figurer d'une part la trajectoire obtenue avec l'évitement d'obstacle (en bleu sur les figures) et d'autre part la trajectoire obtenue en l'absence d'obstacle. Ces derniers résultats sont directement tirés de la section §6.2 précédentes et sont placés sur les figures afin de faciliter les comparaisons.

Pour l'ensemble des simulations réalisées dans le scénario avec obstacles, nous avons testé deux valeurs différentes pour la distance d'influence de l'obstacle (25 m et 30 m). Le rayon d'influence, RI , d'un obstacle est la distance maximale entre le bateau et l'obstacle pour que celui soit pris en compte par l'algorithme de navigation. Les résultats montrent l'efficacité des algorithmes de sélection de cap avec évitement d'obstacles. La valeur du rayon d'influence de l'obstacle doit être choisie en fonction de la vitesse du bateau et de sa capacité à changer de direction. Dans le cas spécifique du voilier simulé et pour des vitesses de vent de l'ordre de 10 nd , nous avons constaté qu'une valeur de rayon d'influence de 30 m est un bon compromis, permettant d'éviter efficacement les obstacles sans éloigner significativement le bateau de sa trajectoire originale.

Pour la quasi-totalité des essais de simulation réalisés, l'obstacle est fixe et positionné à proximité du point de passage WP_2 dans une zone de remontée au vent. Ce choix nous a semblé judicieux dans la mesure où il permet de cumuler deux difficultés : d'une part, un positionnement proche d'un point de passage permet de vérifier les bonnes pondérations entre les fonctions de coût liées à l'efficacité de l'avance vers l'objectif et celles liées aux obstacles (ou pour la méthode des champs de potentiel : les champs attractifs et répulsifs). D'autre part, lors d'une remontée au vent, les capacités de manœuvre du voilier sont beaucoup plus limitées. Dans la section §6.3.4, nous montrerons quelques résultats de simulations, réalisées avec l'algorithme de sélection de cap basée sur la méthode des champs potentiels, avec

un obstacle se situant sur d'autres parties du parcours.

6.3.1 Méthode par projection de la vitesse

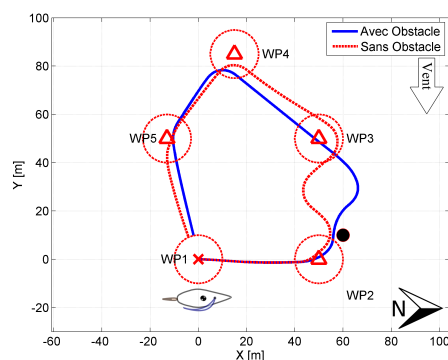
Cette méthode permet de sélectionner un cap consigne qui maximise l'efficacité de l'avance vers l'objectif tout en maximisant la distance à ou aux obstacles. Le calcul de ce cap consigne optimal est basée sur la minimisation de deux fonctions coûts : la première est liée à la projection, pour un cap donné, de la vitesse du voilier sur l'axe voilier-objectif et la seconde est liée aux obstacles. Cette dernière est nulle en dehors de la zone d'influence des obstacles.

La figure 6.9(a) montre de façon évidente la déformation de la trajectoire à cause de l'influence de l'obstacle. La réaction du bateau en présence d'obstacle est liée directement d'une part au cap courant et d'autre part au rayon d'influence de l'obstacle. Dans le cas d'un rayon d'influence $RI=25\text{ m}$, le bateau suit un cap courant orienté nord-nord-est quand l'obstacle est détecté. L'algorithme sélectionne à partir de là un cap, compatible avec la no-go zone, permettant de remonter un peu plus au vent et d'éviter l'obstacle. Lorsque la distance entre le bateau et l'obstacle s'accroît, l'influence de l'obstacle décroît et par conséquent le bateau reprend un cap vers le *waypoint* courant. La figure 6.9(b) montre le comportement du bateau pour un rayon d'influence $RI=30\text{ m}$. Cette fois, comme l'obstacle est détecté plus tôt que dans l'exemple précédent, le cap courant du bateau est orienté plutôt vers le nord. Cette fois, le cap qui minimise la fonction coût de l'algorithme de navigation fait passer le voilier par dessous le *waypoint* en conservant l'orientation générale du bateau. Une fois que le WP_2 est atteint, l'algorithme essaie d'amener le voilier vers le WP_3 en contournant l'obstacle. Une fois que la position courante du navire est au-delà de la zone d'influence de l'obstacle, le cap est corrigé afin d'atteindre le WP_3 tout en effectuant des virements de bord puisque ce dernier se trouve face au vent. Le fait que les trajectoires tracées dans les figures 6.9(c) et 6.9(d) diffèrent des trajectoires obtenues sous conditions de vent constant s'explique par la différence du contour des polaires idéales et réelles utilisées ainsi que par le cap courant du bateau au moment où l'obstacle est détecté.

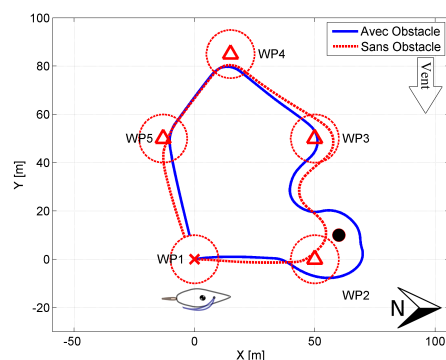
La figure 6.10 met en évidence l'aptitude de l'algorithme pour recalculer un cap approprié en présence d'obstacles et avec un vent variable.

6.3.2 Méthode par inférence floue

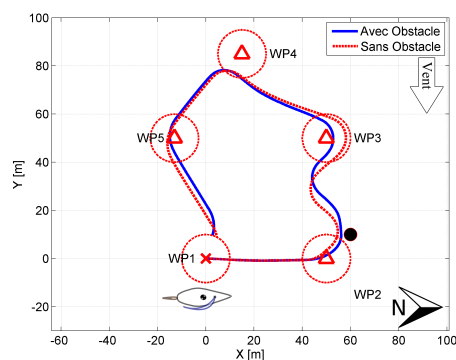
La navigation réactive avec évitement d'obstacles par logique floue est basée, comme la précédente sur l'évaluation de deux fonctions coûts : l'une liée à l'effi-



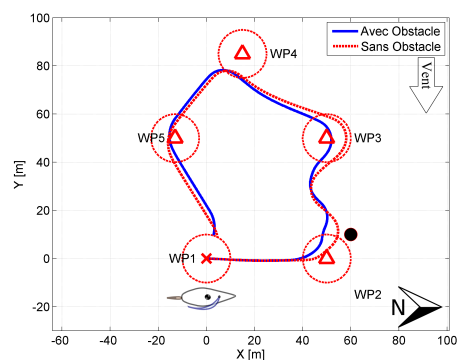
(a) Polaire idéale et $RI=25\text{ m}$



(b) Polaire idéale et $RI=30\text{ m}$

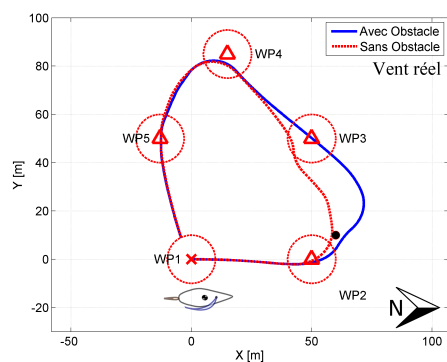


(c) Polaire réelle et $RI=25\text{ m}$

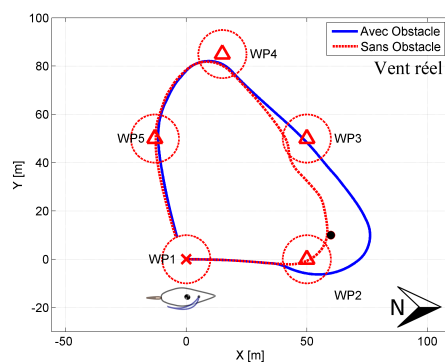


(d) Polaire réelle et $RI=30\text{ m}$

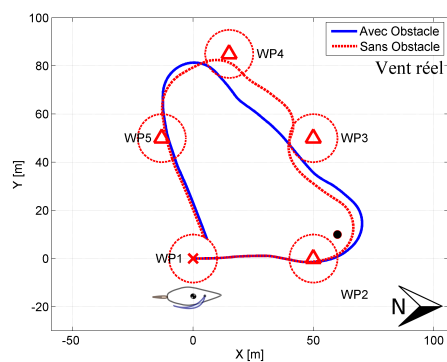
FIGURE 6.9 – Sélection de cap par projection de la vitesse avec évitement d'obstacle (vent constant)



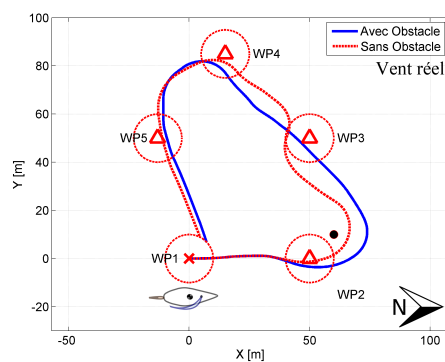
(a) Polaire idéale et $RI=25\text{ m}$



(b) Polaire idéale et $RI=30\text{ m}$



(c) Polaire réelle et $RI=25\text{ m}$



(d) Polaire réelle et $RI=30\text{ m}$

FIGURE 6.10 – Sélection de cap par projection de la vitesse avec évitement d'obstacle (vent réel)

capacité pour rejoindre l'objectif, l'autre à la distance par rapport aux obstacles. Le cap évalué qui maximise la sortie du système flou est envoyé comme consigne au système de suivi de cap.

Pour la simulation avec un $RI=25\text{ m}$ (fig. 6.11(a)), nous observons que la trajectoire initiale du bateau est modifiée en présence d'un obstacle. Cependant, le comportement associé à la méthode floue, qui rend '*souple*' les trajectoires, ne permet pas d'éloigner suffisamment le voilier de l'obstacle. Pour le cas d'un $RI=30\text{ m}$, nous constatons que l'obstacle est évité efficacement mais, à cause de la souplesse des trajectoires calculées, le voilier tend à s'éloigner significativement de la trajectoire navigable, la plus directe, vers le WP_3 . Sur les figures 6.11(c) et 6.11(d), tracées en utilisant la polaire réelle, il est possible de vérifier que l'obstacle est bien contourné pour les rayons d'influence de 25 m et 30 m . Néanmoins, pour la trajectoire obtenue avec un rayon d'influence de 25 m , le calcul du cap n'est pas efficace en termes de distance parcourue.

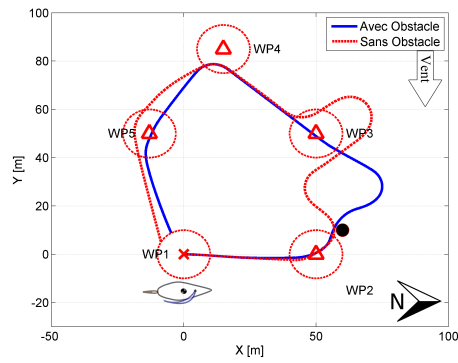
Pour les simulations avec vent réel (cf figure 6.12) et contrairement aux simulations avec conditions de vent constant, le comportement de l'algorithme qui lisse les trajectoires a tendance à amortir l'effet des changements abruptes de la direction du vent. Cette condition aide à la construction des trajectoires plus efficaces par rapport à la quantité de virements de bord et d'empannages et en conséquence, en termes de distance parcourue. Cet amortissement permet au bateau de s'éloigner correctement des obstacles même avec un $RI=25\text{ m}$ (voir figures 6.12(a) et 6.12(c)). En utilisant un $RI=30\text{ m}$, l'écart entre le navire et l'obstacle est plus important que dans le cas précédent mais l'algorithme est capable de calculer un cap qui permet au voilier de reprendre rapidement une trajectoire assez proche de celle obtenue sans la présence d'obstacles (en rouge pointillé sur la figure).

6.3.3 Méthode des champs de potentiels

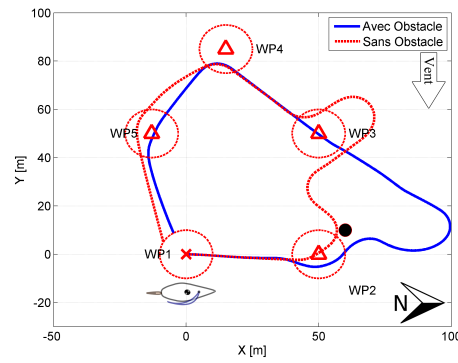
La navigation réactive avec évitement d'obstacle est obtenue dans ce cas à partir de l'évaluation d'un potentiel attractif (vers le *waypoint*) et répulsifs qui éloignent le navire des obstacles et des *no-go* zones de la polaire de vitesse.

Les résultats de simulation sont présentés sur la figure 6.13. Ces résultats mettent en évidence la modification du potentiel local selon la valeur du rayon d'influence de l'obstacle. Les figures 6.13(a) et 6.13(c) donnent les résultats de la sélection de cap avec évitement d'obstacle pour un rayon d'influence RI de 25 m . Les figures 6.13(b) et 6.13(d) montrent les résultats obtenus avec un RI égal à 30 m . Cette méthode conduit à des trajectoires globalement assez '*réactives*', proches de

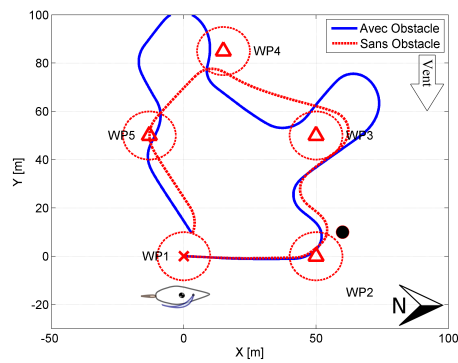
6.3. NAVIGATION RÉACTIVE AVEC OBSTACLE



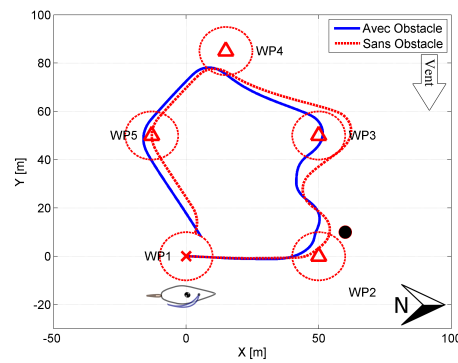
(a) Polaire idéale et $RI=25\text{ m}$



(b) Polaire idéale et $RI=30\text{ m}$

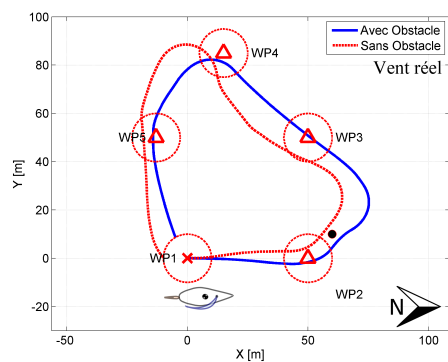


(c) Polaire réelle et $RI=25\text{ m}$

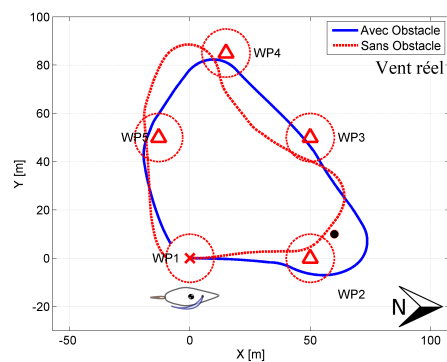


(d) Polaire réelle et $RI=30\text{ m}$

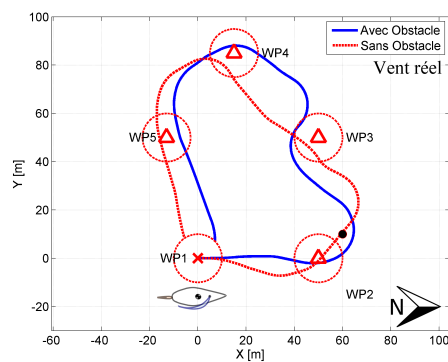
FIGURE 6.11 – Sélection de cap par logique floue avec évitement d'obstacle (vent constant)



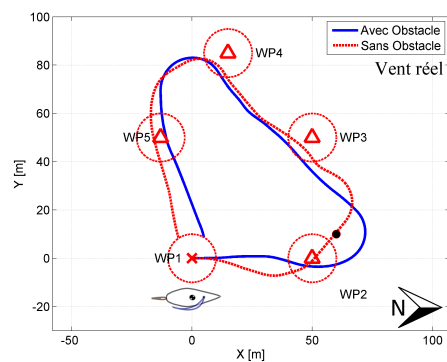
(a) Polaire idéale et R.I. = 25m



(b) Polaire idéale et R.I. = 30m



(c) Polaire réelle et R.I. = 25m

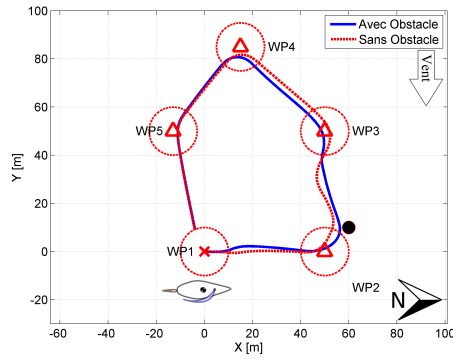


(d) Polaire réelle et R.I. = 30m

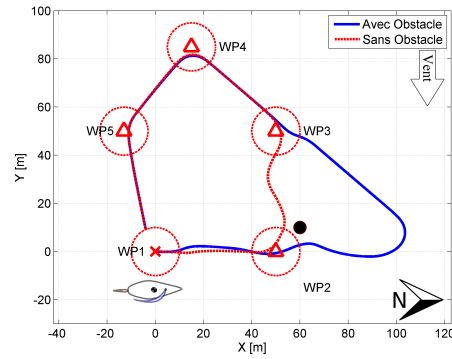
FIGURE 6.12 – Sélection de cap par logique floue avec évitement d'obstacle (vent réel)

6.3. NAVIGATION RÉACTIVE AVEC OBSTACLE

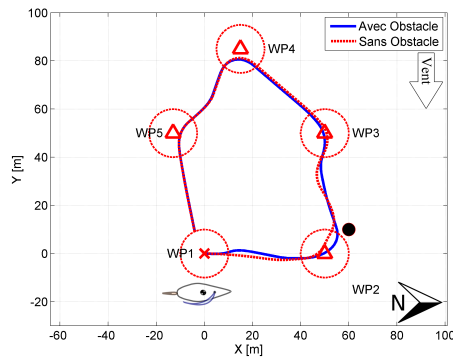
celles obtenues sans obstacle. Le seul cas où cette méthode est prise en défaut est celui de la figure 6.13(b) où l'équilibre des potentiels attractifs et répulsifs conduit le voilier à s'écarter assez fortement du chemin direct liant les points de passage WP_2 et WP_3 .



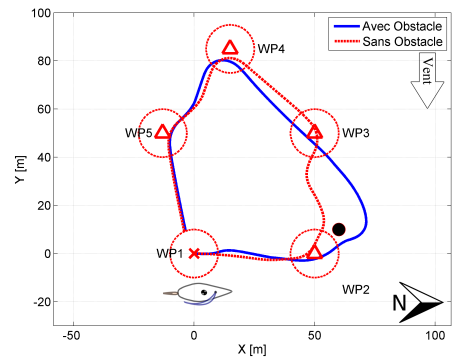
(a) Polaire idéale et $RI=25m$



(b) Polaire idéale et $RI=30m$



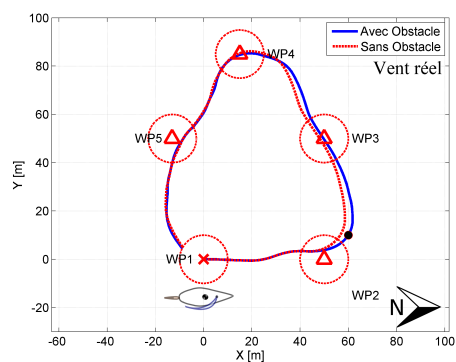
(c) Polaire réelle et $RI=25m$



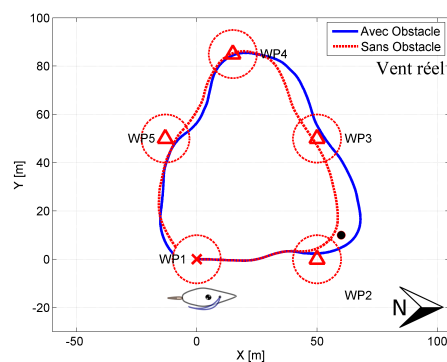
(d) Polaire réelle et $RI=30m$

FIGURE 6.13 – Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle (vent constant)

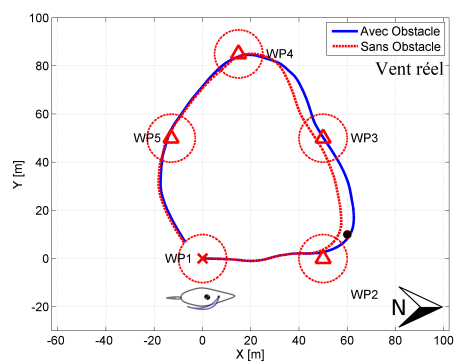
Les simulations présentées dans la figure 6.14 montrent la capacité de l'algorithme à réagir à un changement de direction du vent au cours du mouvement en présence d'obstacles.



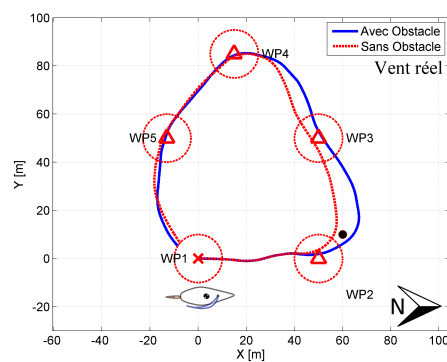
(a) Polaire idéale et $RI=25m$



(b) Polaire idéale et $RI=30m$



(c) Polaire réelle et $RI=25m$



(d) Polaire réelle et $RI=30m$

FIGURE 6.14 – Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle (vent réel)

6.3.4 Modification de la position des obstacles

Dans les sections précédentes, nous avons validé la capacité des différents algorithmes à sélectionner un cap adéquat en présence d'un obstacle placé dans une zone de remontée au vent. Afin de compléter cette analyse, nous avons vérifié que ces algorithmes étaient également capables de d'éviter des obstacles placés sur le parcours du voilier mais correspondant aux autres allures du voilier. Afin de ne pas alourdir ce document, nous présentons ci-dessous uniquement les résultats de simulation obtenus avec la méthode des champs de potentiels. Les autres méthodes donnent des résultats similaires.

Les figures 6.15(a) , 6.15(b) et 6.15(c) montrent respectivement l'aptitude de l'algorithme à contourner les obstacles pour des allures de près, de travers et de grand large. Nous constatons sur ces figures que l'algorithme permet d'éviter correctement les obstacles tout en passant par les *waypoints* programmés. Ce résultat était assez prévisible dans la mesure où, dans le scénario de test initial, l'obstacle avait été volontairement positionné dans la zone la plus délicate pour les manœuvres : la zone de remontée au vent. Dans les simulations de la figure 6.15, l'obstacle se trouve dans des zones moins contraintes du point de vue de la capacité de manœuvre du voilier.

Enfin, nous avons également réalisé des simulations afin de vérifier si les algorithmes de navigation réactive pouvaient être piégés dans un minimum local. En effet, les différentes méthodes de navigation réactive proposées s'apparentent à des techniques de planification locale et ces méthodes ne garantissent pas la convergence des solutions. Ces problèmes sont fréquents en particulier lorsque la densité d'obstacles est importante ce qui peut conduire l'engin à se trouver piégé dans un corridor ou un puits de potentiel (pour la méthode des champs de potentiels).

Dans le cas de la navigation à voile, et en particulier pour le type d'application visée qui concerne de la mesure en haute mer, la densité d'obstacle est très faible ce qui signifie qu'il est peu probable d'avoir plus d'un obstacle dans une zone limitée par la portée du système de perception et par voie de conséquence qu'il est peu probable d'avoir une configuration obstacles/objectif telle qu'elle piège le système dans un minimum local.

Nous avons toutefois réalisé quelques simulations, avec la méthode de navigation réactive basée sur les champs de potentiels, afin de vérifier le comportement du voilier lorsque l'obstacle se trouve à proximité du point de passage courant, ce qui conduit les potentiels attractif et répulsif à se neutraliser.

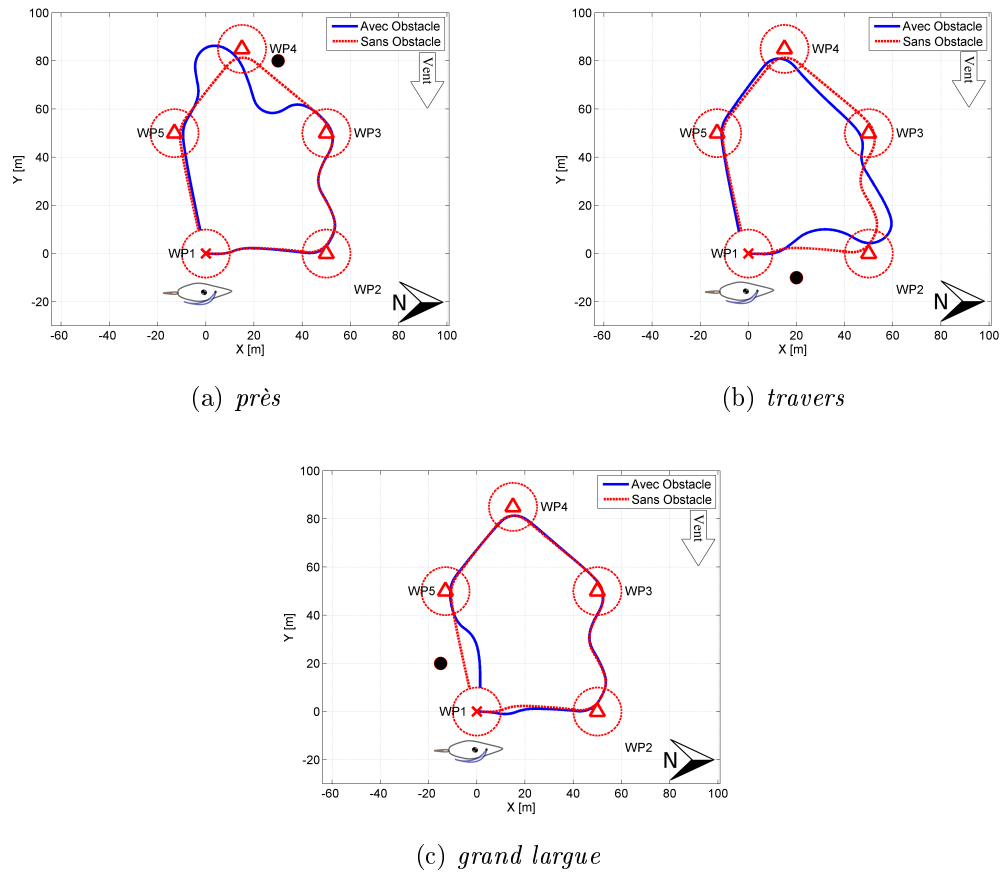
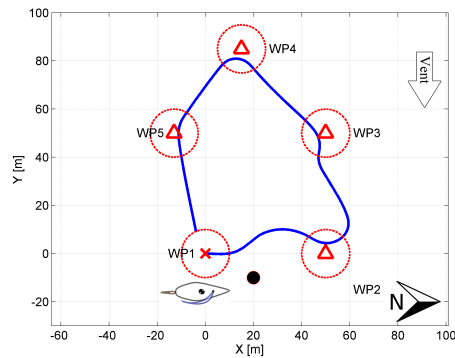
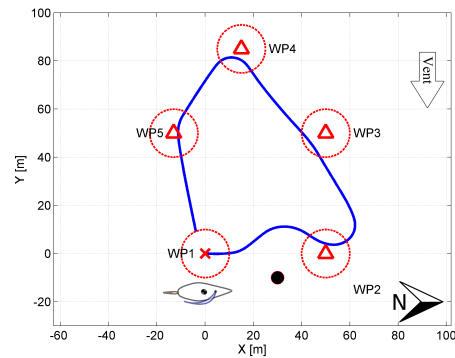


FIGURE 6.15 – Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle placé en différents points du parcours (vent constant, polaire idéale et $RI = 30\text{ m}$)

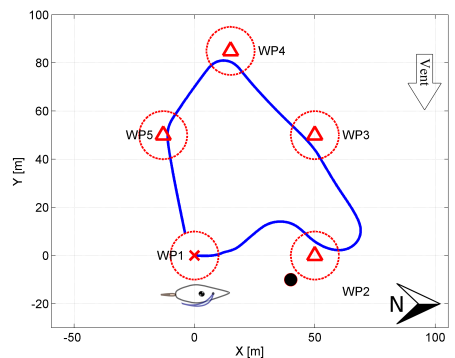
6.3. NAVIGATION RÉACTIVE AVEC OBSTACLE



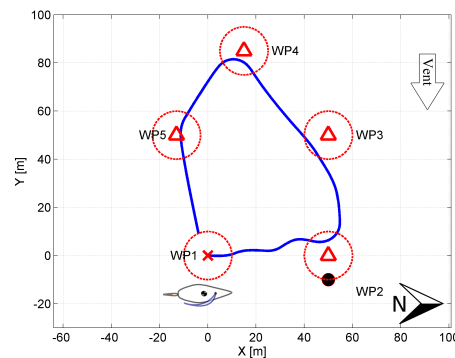
(a) Obs. (20,-10), W.P.(50,0)



(b) Obs. (30,-10), W.P.(50,0)



(c) Obs. (40,-10), W.P.(50,0)



(d) Obs. (50,-10), W.P.(50,0)

FIGURE 6.16 – Sélection de cap par la méthode des champs de potentiel avec obstacle. Essais avec différentes distances entre l'obstacle et le point de passage (vent constant, polaire idéale et $RI = 30\text{ m}$)

Dans ces simulations, dont les résultats sont présentés figure 6.16, nous avons positionné un obstacle à 31 m , 22 m , 17 m puis à 10 m de la position du point de passage WP_2 . Sur ces figures, nous pouvons constater la '*déformation*' de la trajectoire et la capacité de l'algorithme à éviter l'obstacle y compris lorsque celui ci se trouve très proche du point de passage. Cette capacité est principalement liée à la zone de tolérance autour de l'objectif. En effet, une fois que le bateau atteint la zone de tolérance autour du point de passage courant, le potentiel attractif est donc calculé par rapport au *waypoint* suivant. Ce simple critère modifie la valeur du potentiel attractif et guide le bateau vers le nouvel objectif.

Par ailleurs, une technique classiquement utilisée avec la méthode des champs de potentiels consiste à ajouter un bruit sur l'état ou un bruit de mesure de manière à venir briser la stationnarité liée à l'annulation des potentiels [132]. Dans le cas d'un voilier, ce '*bruit*' est intrinsèquement présent à travers les variations permanentes de l'angle de vent, ce qui rend en pratique quasi nulle la probabilité que le système se trouve piégé dans un minimum local.

Les différents résultats de simulation obtenus dans la partie §6.2 et §6.3 valident amplement l'efficacité de l'algorithme de navigation basé sur la méthode des champs potentiels et sa supériorité par rapport aux deux autres méthodes que nous avons développées. Cette méthode a donc été choisie pour effectuer les validations expérimentales sur la maquette du voilier lors d'essais réalisés sur un lac. Les résultats expérimentaux sont présentés et discutés dans la section suivante.

6.4 Résultats expérimentaux

Dans cette section nous présentons les premiers résultats expérimentaux obtenus avec le modèle réduit de voilier dont l'architecture est décrite dans le chapitre 4 et les lois de commande décrites au chapitre 5. Les résultats obtenus grâce aux expériences nous ont permis de corroborer la validité des résultats obtenus en simulation au chapitre 6.

La première partie de ce chapitre décrit la zone de test et le protocole d'essai. Ensuite, dans la deuxième partie, nous montrons les résultats obtenus en utilisant l'algorithme des champs des potentiels. Finalement, nous présentons la conclusion des résultats expérimentaux.

6.4.1 Zone d'essais et conversion des coordonnées GPS

Les expériences effectuées afin de valider les lois de commande développées ont été mises en œuvre sur le lac de la base de loisirs de Créteil (Fig. 6.17).

La zone désignée pour effectuer les test est une surface de $100m \times 100m$ où le vent dominant provient du *SE*. Afin de soumettre le bateau à différentes directions de vent, en sortant du ponton, trois points de repère (*waypoints*) ont été fixés de la façon suivante (cfr. fig. 6.18) :

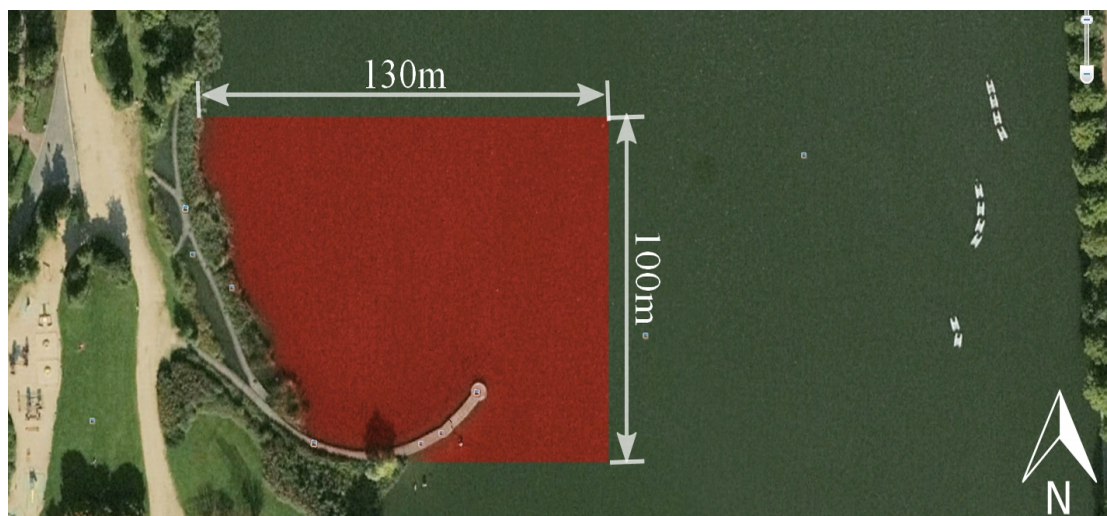


FIGURE 6.17 – Plan de la zone d'essais

1. WP_1 (48.77836945 N, 2.45009444 E) : Ce waypoint permet d'avoir un vent moyen de travers et grand largue.
2. WP_2 (48.77836945 N, 2.44945555 E) : Pour l parcours entre le WP_1 et le WP_2 , le vent moyen se présente dans les allures de bon plein et au près.
3. WP_3 (48.77792222 N, 2.44945555 E) : Finalement, entre les WP_2 et le WP_3 , nous aurons un vent moyen entre les allures de grand largue et vent arrière.

Afin de convertir les coordonnées géographiques (λ_{p1}, ϕ_{p1}) d'un point obtenu par le GPS en coordonnées cartésiennes (X_{GPS}, Y_{GPS}) dans le repère bateau, nous utilisons une projection gnomonique. Ces projections ont l'avantage de conserver l'orthodromie, c'est-à-dire qu'elles font apparaître sous forme de ligne droite le chemin le plus court entre deux points. Cet type de projection provoque des déformations importantes en terme de surface et de forme dès qu'on s'éloigne du point

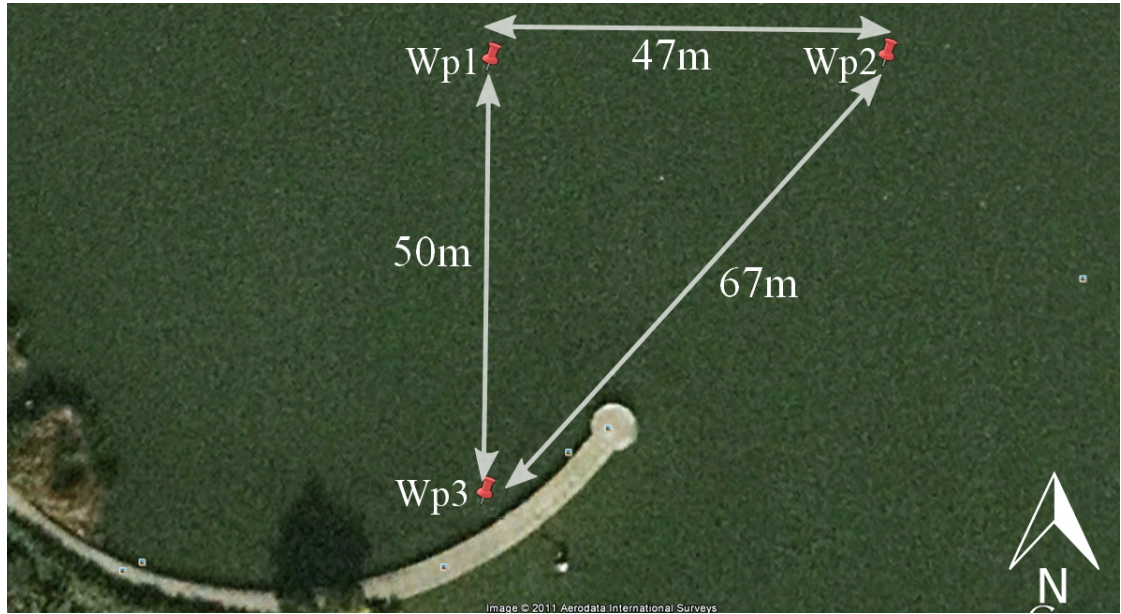


FIGURE 6.18 – Localisation des waypoints

tangent. Cependant, comme les test de navigation effectués pour valider les algorithmes de navigation sont effectués dans une région relativement proche du point tangent, nous pouvons conclure qu'elle reste valable pour tout point à l'intérieur de la zone d'essai.

Le point de tangence S que nous utilisons est un point arbitraire situé à proximité de la tour Eiffel (eq. 6.1). Comme l'écart de la localisation géographique entre point S et celle de la zone d'essais ne dépasse pas 90° , la projection gnomonique reste valide pour les expériences effectuées [138].

La transformation pour le plan tangent au point S , qui appartient à une sphère de rayon $RE = 6371\text{ km}$ (la terre), permettant d'obtenir la projection (X_{GPS}, Y_{GPS}) d'un point de coordonnées géographiques $(\lambda_{p1}, \phi_{p1})$ est donnée par les équations 6.3 et 6.2 où $\cos(c)$ est obtenu par l'équation 6.4 ([138]).

$$S = (\lambda_p, \phi_p) = (48^\circ 51' 30.66'' N, 2^\circ 17' 41.01'' E) \quad (6.1)$$

$$X_{GPS} = RE \cdot \frac{\cos(\phi_{p1}) \cdot \sin(\phi_p) - \sin(\phi_{p1}) \cdot \cos(\phi_p) \cdot \cos(\lambda_p - \lambda_{p1})}{\cos(c)} \quad (6.2)$$

$$Y_{GPS} = -RE \cdot \frac{\cos(\phi_p) \cdot \sin(\lambda_p - \lambda_{p1})}{\cos(c)} \quad (6.3)$$

$$\cos(c) = \sin(\phi_{p1}) \cdot \sin(\phi_p) + \cos(\phi_{p1}) \cdot \cos(\phi_p) \cdot \cos(\lambda_p - \lambda_{p1}) \quad (6.4)$$

6.4.2 Réglage de voile et limitation de la gîte

Pour calculer un cap à partir de la méthode des champs de potentiels, il est nécessaire de connaître la polaire du bateau ou, a minima, de connaître les angles qui définissent les *no-go* zones si on utilise une polaire idéale. Pour le prototype utilisé, ces valeurs sont inconnues. Cependant, nous avons calculé une polaire idéale en observant le comportement du voilier en pilotage manuel. Après plusieurs essais, nous avons vérifié que la capacité du voilier pour remonter au vent est assez réduite par rapport à celle du simulateur. Suite à ces essais, nous avons déterminé que le voilier est capable de remonter au vent seulement pour un angle de cap supérieur à 60° par rapport au vent. Concernant la navigation par vent arrière, nous avons trouvé que le prototype est assez stable pour cette allure. Néanmoins, pour éviter des empannages non désirés ainsi que des changements brutaux de l'angle de bôme, nous avons défini une *no-go* pour le vent arrière correspondant à un angle de cap par rapport au vent compris entre 165° et 195° . Les observations et considérations précédentes nous ont amené au calcul de la polaire de la figure 6.19.

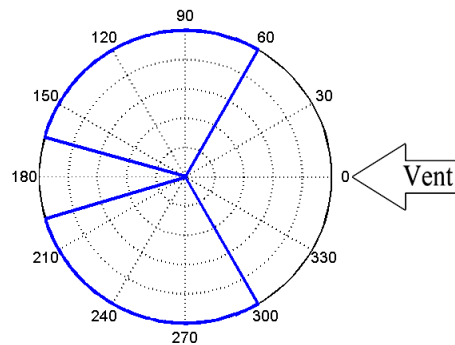


FIGURE 6.19 – Polaire idéale pour le prototype

Pour les essais réalisés, nous ne disposons pas de moyens de récupération du voilier en cas de défaillance de l'algorithme de sélection de cap ou de chavirement. Pour éviter ce dernier type de risque, nous avons décidé de mettre en place une sécurité permettant de limiter l'angle de gîte.

Afin de limiter la gîte du voilier nous avons proposé une méthode dans le chapitre 5 pour sélectionner un cap consigne à partir de la polaire de vitesse pondérée

par la polaire de gîte. Cependant, pour le prototype cette polaire de gîte est inconnue. Nous avons donc préféré une méthode plus fondée sur l'expérience : en sachant que la gîte est une conséquence de la poussée générée par la voile, il est possible de calculer un angle de bôme à partir de la valeur de l'angle de gîte mesuré par la centrale inertielle embarquée. Cette fonction doit permettre d'assurer une poussée suffisante pour faire avancer le voilier tout en conservant un angle de gîte raisonnable. Par ailleurs, cette fonction doit permettre également d'ouvrir la voile même en conditions de vent arrière. La fonction pour calculer l'angle de bôme est donnée par l'équation 6.5 où $f(gite)$ et $f(AWA)$ sont données par les équations 6.6 et 6.7.

$$angle\ bôme = \max(f(gite), f(AWA)) \quad (6.5)$$

$$f(gite) = \begin{cases} 10^\circ & \text{si } gite \geq 20^\circ \\ 20^\circ & \text{si } gite \geq 30^\circ \\ 40^\circ & \text{si } gite \geq 40^\circ \\ 60^\circ & \text{si } gite \geq 60^\circ \\ 0^\circ & \text{autrement} \end{cases} \quad (6.6)$$

$$f(AWA) = \begin{cases} 60^\circ & \text{si } 150^\circ \leq AWA \leq 210^\circ \\ 0^\circ & \text{autrement} \end{cases} \quad (6.7)$$

6.4.3 Suivi de cap

Nous présentons ici le protocole utilisé pour la validation du régulateur PID qui est utilisé pour asservir le safran. Nous montrons également les résultats obtenus permettant de vérifier le fonctionnement des lois de commande pour le suivi de cap.

D'abord, nous avons choisi à partir du vent dominant des consignes de cap navigables, c'est-à-dire, sans obstacles et hors des *no-go* zones de la polaire du bateau. Ensuite, pour le réglage de la voile, nous avons fixé l'angle de la bôme à 15° . Bien qu'il s'agisse d'un réglage sous-optimal, cet angle de voile nous permet d'avoir une poussée suffisante pour faire avancer le bateau et tester le régulateur. Puis, pour lancer le voilier, nous avons orienté son cap directement dans la direction désirée. Une fois le mouvement du voilier stabilisé, nous avons perturbé manuellement, à l'aide de la télécommande, le cap courant.

Les résultats obtenus pour un de ces essais de suivi de cap est donné figure 6.20. Pendant cette expérience, nous avons fixé la consigne de cap à 60° . Nous

6.4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

constatons qu'aux temps $t = 5\text{ s}$, $t = 25\text{ s}$ et $t = 50\text{ s}$, la trajectoire a été perturbée et le régulateur a réussi efficacement à remettre le cap du bateau autour de la valeur de la consigne. Lors de la perturbation au temps $t = 75\text{ s}$, nous avons franchi en pilotage manuel la ligne du vent. Le voilier met alors près d'une minute pour rejoindre le cap désiré. Cependant, dans le deuxième graphique de la figure 6.20, nous constatons que le correcteur envoie une consigne correcte d'angle de safran mais que le bateau ne change pas de cap. En analysant les données de vent, nous avons pu constater que, juste après la perturbation le vent est tombé (vitesse de vent presque nulle) ce qui contribue à faire chuter la vitesse du voilier, déjà diminuée du fait de la manœuvre manuelle. A vitesse très faible, la capacité du voilier à changer de cap est très réduite (cf les analyses de comportement en virage de la section §3.5.5), d'où cette réponse très lente du voilier lors de cette perturbation. Une fois que les conditions de vent ont changées (une rafale conduisant à une augmentation de la vitesse du voilier), le bateau parvient de nouveau à franchir la ligne du vent pour s'orienter correctement par rapport au cap consigne.

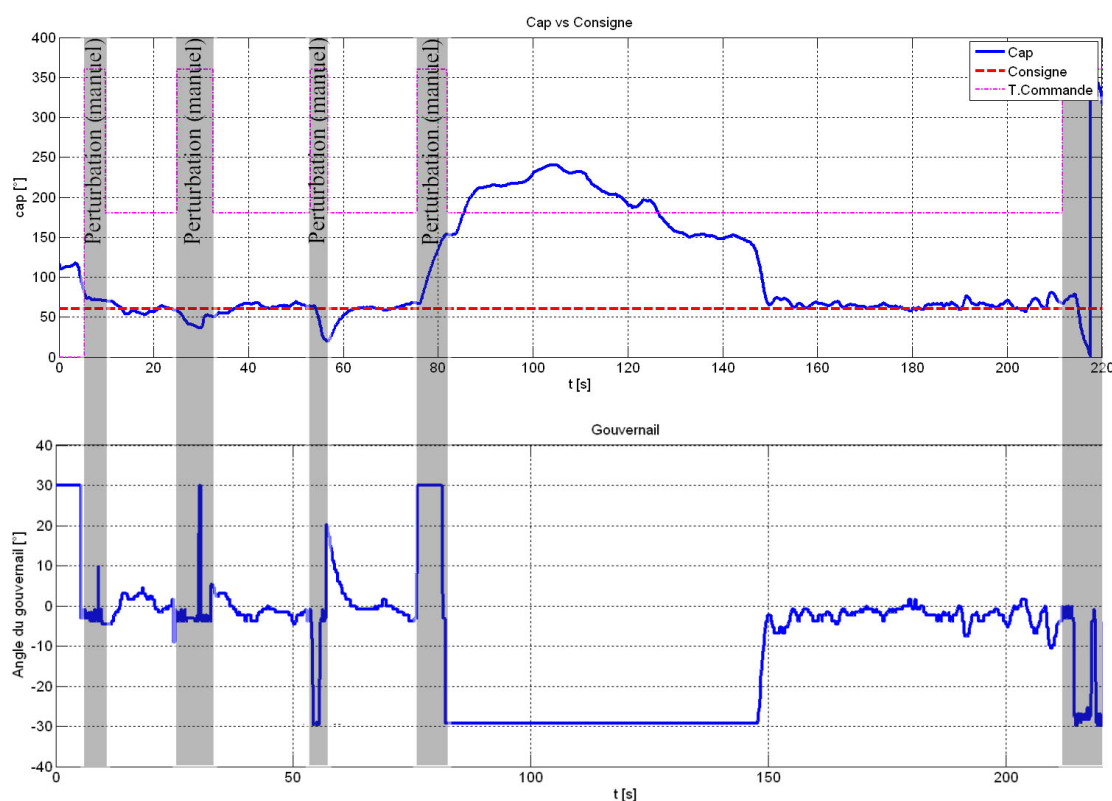


FIGURE 6.20 – Asservissement de cap

En conclusion, nous avons validé la capacité du régulateur PID pour suivre un

angle de cap correspondant à une trajectoire navigable. Dans la prochaine section nous présentons les résultats expérimentaux de l'intégration du contrôleur pour le suivi de cap avec les algorithmes de navigation.

6.4.4 Navigation réactive

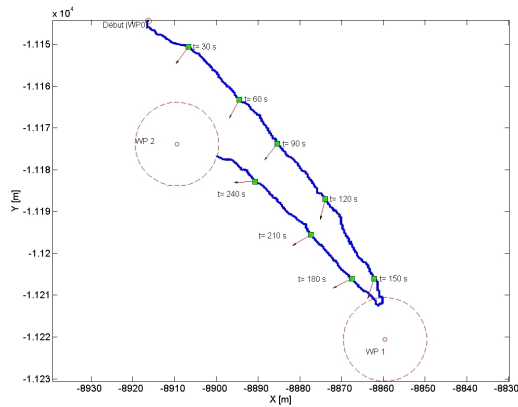
La méthode des champs de potentiels a été testée et validée expérimentalement sur la maquette de voilier développé à l'ISIR lors de ces essais. Le scénario de test consiste à passer par trois *waypoints* (avec une tolérance de 10 m). Le premier essai a été effectué pour vérifier les capacités du bateau à faire des virages lors de l'arrivée à un point de passage. Avec cet essai nous avons constaté la capacité du bateau à faire des aller - retours simples.

Les figures 6.22 et 6.22(b) montrent la trajectoire du voilier lors du deuxième essai et les figure 6.22(c) et 6.22(d) le profil de vent enregistré lors de l'évolution par la girouette-anémomètre embarquée.

Pendant le temps écoulé pour arriver au premier *waypoint* ($\approx 300s$) la direction du vent moyen était comprise entre 280° et 340° . Dans ces conditions de vent l'algorithme de navigation calcule une trajectoire quasiment directe vers le point de passage car il se trouve en dehors des *no-go* zones. Ensuite entre les WP_1 et WP_2 , c'est-à-dire pour des temps compris entre $300s$ et $390s$, la direction du vent est dans l'intervalle 0° - 60° puis 120° - 230° . Dans ces conditions, l'algorithme sélectionne un cap permettant d'amener directement le voilier vers le but, sans nécessité de réaliser des manœuvres. Finalement, entre les WP_2 et WP_3 ($390 < t < 450$), l'angle de vent réel était compris entre 200° et 280° , conditions qui, encore une fois, ont permis à l'algorithme de trouver un cap correct sans avoir besoin de louvoyer.

Étant donné que durant cet essai les conditions de vent ont permis au bateau de naviguer de façon quasi directe entre les *waypoints*, nous avons inversé l'ordre des points de passage WP_1 et WP_2 . Les résultats de ce deuxième essai sont montrés figure 6.23.

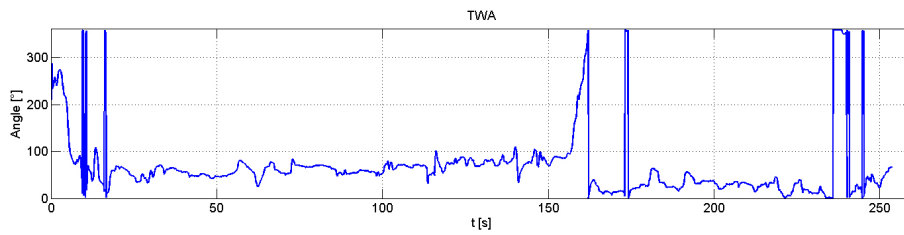
Pour la première étape du troisième essai le bateau a été soumis aux conditions de vent arrière et, en raison de la polaire utilisée, nous espérons une trajectoire de zigzags due à la *no-go* zone pour ce type d'allure. Ce comportement est visible de façon évidente sur les figures 6.23(a) et 6.23(c). Nous observons les virements de bord effectués à $t \approx 25s$, $t \approx 75s$, $t \approx 120s$, $t \approx 180$ et $t \approx 210s$. Après, à $t \approx 240s$, le bateau effectue un empannage afin de se rapprocher au WP_2 . Entre les WP_2 et WP_3 les conditions sont assez favorables pour la navigation directe cependant,



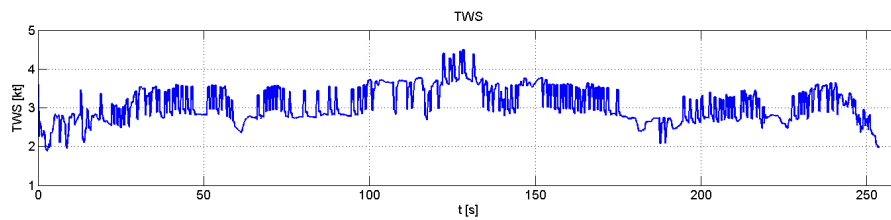
(a) Trajectoire



(b) Trajectoire sur le lac

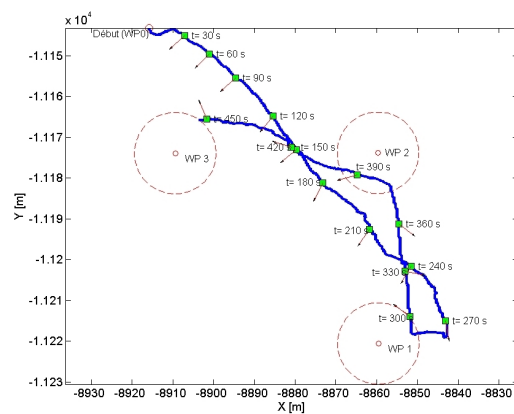


(c) TWA

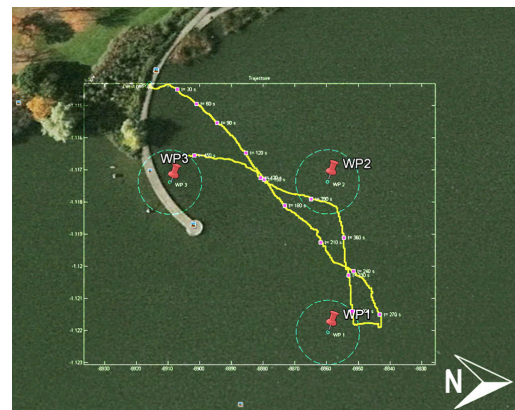


(d) TWS

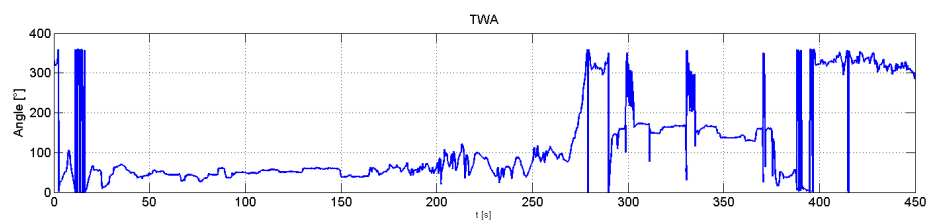
FIGURE 6.21 – Validation expérimentale de la sélection de cap par la méthode des champs de potentiel : essai 1.



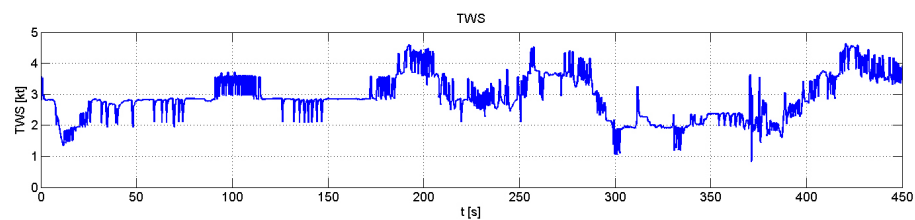
(a) Trajectoire



(b) Trajectoire sur le lac



(c) TWA

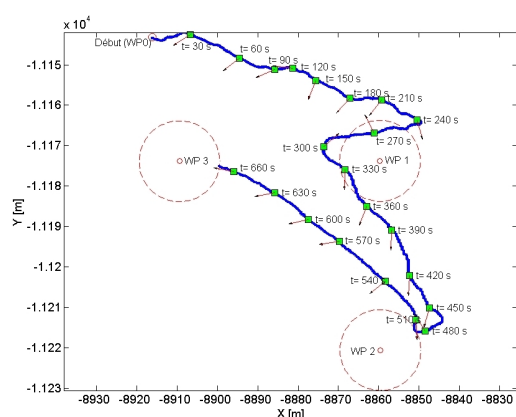


(d) TWS

FIGURE 6.22 – Validation expérimentale de la sélection de cap par la méthode des champs de potentiel : essai 2.

6.4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

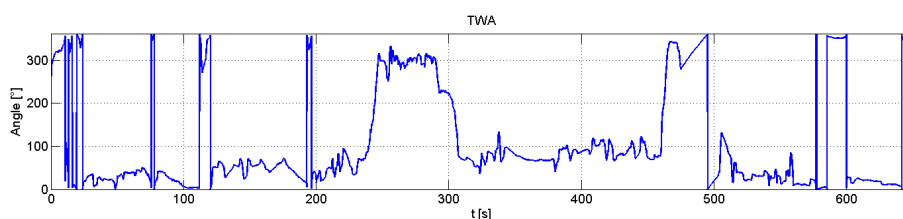
nous observons un léger zigzag. Ce phénomène s'explique car le vent provient d'un angle proche du nord, ce qui cause une dérive constante du bateau. L'algorithme a fait zigzaguer légèrement le bateau afin de corriger cette dérive. Finalement pour des temps compris entre $t = 510s$ et $t = 660s$, le vent se situait entre 250° et 300° ce qui permet de naviguer directement vers le *waypoint* final.



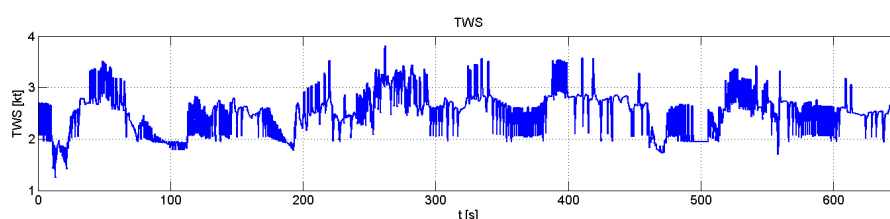
(a) Trajectoire



(b) Trajectoire sur le lac



(c) TWA



(d) TWS

FIGURE 6.23 – Validation expérimentale de la sélection de cap par la méthode des champs de potentiel : essai 3.

6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de simulation pour chacune des méthodes développées. Le scénario de test est identique dans chacun des trois cas et correspond à un parcours avec quatre points de passage et retour au point de départ. Ce scénario utilise un profil de vent constant ou réel et permet de tester l'évolution du voilier sous différentes allures et implique plusieurs manœuvres de virement de bord et d'empannage.

Sur les résultats des simulations présentés, nous pouvons constater que chacun des trois algorithmes de navigation réactive développés permet au voilier de rejoindre les points de passage fixés tout en évitant les obstacles.

A partir de l'analyse de cette campagne d'essais réalisée en simulation, nous pouvons extraire un certains nombre de résultats.

- La connaissance précise de la polaire de vitesse du voilier, qui est utilisée dans chacune de ces trois méthodes, n'est pas un pré-requis obligatoire. En effet, nous avons constaté, sur l'ensemble des simulations effectuées, qu'utiliser une polaire idéale permettait d'une part de faire naviguer le voilier tout en évitant les obstacles et d'autre part conduisait à des trajectoires similaires à celles obtenues en utilisant la polaire réelle du voilier (dans les mêmes conditions de simulation).
- Pour ce qui concerne la comparaison des trois algorithmes, nous constatons à travers ces simulations que la méthode basée sur les champs de potentiels est la plus performante : les mouvements du voilier sont assez '*réactifs*' ce qui permet de rejoindre les points de passage fixés tout en évitant les obstacles et en s'éloignant peu des segments de droite reliant deux points de passage consécutifs. La facilité de réglage de ses paramètres (gains des potentiels) et la possibilité d'ajouter aisément d'autres fonctions de potentiel représentant d'autres contraintes pour augmenter ses capacités, contribuent également à faire de cette méthode la meilleure option parmi les autres algorithmes développés.

La méthode par projection de la vitesse donne également des résultats satisfaisants quoique légèrement en retrait par rapport à la méthode précédente. La dernière méthode, basée sur des règles d'inférence floue, conduit à un comportement beaucoup moins '*réactif*', à des trajectoires plus lissées qui ont souvent tendance à s'éloigner assez fortement des segments de droite reliant deux points de passage consécutifs. Cette méthode est par ailleurs celle qui

est la sensible à la valeur du rayon d'influence des obstacles. Enfin, le réglage des nombreux paramètres de cet algorithme, réglage souvent effectué de façon empirique, fait que cette méthode s'avère en pratique assez peu commode d'usage.

- Nous n'avons pas pu détecter, au cours des nombreuses simulations effectuées, de cas où ces algorithmes restaient piégés dans un minimum local, bien que cette possibilité existe d'un point de vue théorique puisque chacune de ces méthodes est assimilable à des techniques de planification locale. Cette possibilité est en pratique évitée pour un certain nombre de raisons. D'une part la densité d'obstacles en mer est faible. D'autre part, la définition d'une zone de réussite autour de chaque point de passage objectif et le fait que la direction du vent varie en pratique en permanence (ce qui peut être vu comme un bruit par rapport à une direction moyenne de bruit) permet de réduire très fortement voire d'annuler cette possibilité.

A travers les simulations réalisées, l'algorithme de navigation réactive basée sur la méthode des champs potentiels a été jugé à la fois efficace et commode à mettre en œuvre. Pour ces différentes raisons, nous avons choisi d'implémenter cet algorithme sur le voilier modèle réduit que nous avons développé. Les résultats expérimentaux obtenus lors d'essais de navigation réalisés sur un lac permettent de valider cet algorithme de sélection de cap et confirment que cet algorithme de commande est applicable, même si les caractéristiques de polaire de vitesse du voilier sont mal connues ou inconnues (ce qui était notre cas).

7

Conclusion

Dans ce chapitre de conclusion, nous présentons un bilan du travail réalisé et nous proposons des perspectives pour la poursuite de recherches concernant les voiliers robotisés.

Cette thèse est une contribution à l'étude de système de pilotage pour des voiliers autonomes. L'objectif de ce système de pilotage est de permettre à un voilier de rejoindre des points de passage fixés au préalable par un opérateur humain en s'adaptant automatiquement aux variations de son environnement. Pour atteindre cet objectif, les principaux points qui ont été abordés dans cette thèse concernent :

- la construction d'un voilier de taille réduite, l'exploitation et le développement de différents types de capteurs, afin de fournir au système de commande embarqué des informations sur l'état du voilier et sur son environnement, en particulier le vent.
- le développement de méthodes de sélection automatique de cap permettant au voilier de rejoindre son objectif le plus rapidement possible tout en évitant les obstacles. Ces méthodes de navigation dites réactives permettent au voilier de naviguer tout en s'adaptant aux conditions instantanées de vent et aux obstacles perçus en temps réel par un système de perception embarqué.

Lorsqu'on s'intéresse à la commande de véhicules, toute forme de théorie doit être confrontée à une vérité terrain afin de valider par l'expérience l'efficacité de ces commandes. Cela est particulièrement vrai dans le cas de la robotique mobile en milieux naturels, donc incertains. Ces environnements variables dans le temps et l'espace se prêtent en effet mal à une modélisation précise permettant la validation de lois de commande par des outils numériques de simulation. Ceci est particulièrement vrai dans le cas de voiliers robotisés où les modèles de l'environnement sont complexes (modélisation du vent, des vagues, des courants,...) et souvent parcellaires car les modèles (analytiques ou numériques) des interactions entre le

véhicule et son environnement ne représentent que partiellement la réalité. Dans le cadre de cette thèse, et afin de valider nos algorithmes de navigation, nous avons construit un prototype à échelle réduite d'un voilier autonome. Sur la base d'un modèle de voilier radio-commandé, nous avons entièrement repris le pont arrière et son étanchéité afin de pouvoir loger sous le pont les calculateurs embarqués ainsi qu'une centrale inertielle et un GPS. Nous avons également construit une girouette/anémomètre afin de fournir les données de vent au calculateur embarqué et développé les systèmes électroniques d'interfaçage ainsi que les codes de gestion bas-niveau des différents capteurs et actionneurs.

Un deuxième voilier, de plus grande taille, a également été développé par *Robosoft* dans le cadre du projet *ASAROME*. Nous avons également défini l'architecture logicielle de ce voilier *Asarome*. Cette architecture logicielle est basée sur une décomposition en modules fonctionnels chargés de la perception, de la navigation, de la commande et de la gestion bas-niveau. Cette architecture logicielle a été dupliquée sur le voilier modèle réduit que nous avons développé afin de faciliter le portage des algorithmes d'un système à un autre. Ce voilier est désormais complètement opérationnel et a été utilisé pour valider les méthodes de sélection automatique de cap que nous avons développées.

Le pilotage automatique d'un voilier, permettant de lui donner les capacités de rejoindre automatiquement un point de passage arbitraire en s'adaptant à son environnement (vent, obstacles) n'est pas une tâche triviale. En dehors de la forte variabilité de l'environnement, la difficulté principale provient du fait qu'il existe des directions de l'espace, correspondant à des caps à suivre, qui ne peuvent être empruntées par un voilier. Cet ensemble de directions non navigables correspond en particulier aux zones se situant directement face au vent pour lesquelles la résultante des efforts produits par le vent sur les voiles ne permet pas de disposer d'une force de propulsion suffisante pour permettre au voilier de se déplacer. Le pilotage automatique d'un voilier autonome a donc été décomposé en deux tâches disjointes. Une première tâche dite de *navigation* permet de déterminer une consigne de cap navigable ainsi qu'un angle de voile et une seconde tâche dite de *commande* permet de réaliser l'asservissement du voilier sur ce cap navigable. On retrouve donc ici les deux modules (navigation et commande) mentionnés dans l'architecture logicielle que nous avons définie pour le voilier.

Les solutions que nous avons proposées pour réaliser cette première fonction de *navigation* s'apparentent en fait à des méthodes de planification locale de mouvement. Pour mettre en évidence le fait que cette planification se base sur des données perçues en temps réel (vent et obstacle), nous utilisons le terme de *navi-*

gation réactive.

Dans ce cadre, nous avons développé trois méthodes permettant à un voilier de rejoindre un ensemble quelconque de points de passages tout en évitant les obstacles. Ces trois méthodes permettent de tenir compte des capacités de déplacement du voilier en utilisant sa courbe polaire de vitesse. Nous avons validé par des simulations numériques ces trois méthodes et nous avons montré également, par ces simulations, leur robustesse vis-à-vis d'une connaissance imparfaite de ces courbes polaires de vitesse.

La première méthode, basée sur la projection de la vitesse sur la route directe vers l'objectif, reprend une méthode proposée par R. Stelzer et l'étend de manière à pouvoir tenir compte des obstacles dans la sélection de cap. La seconde méthode est similaire à cette première méthode mais repose sur une implémentation basée sur un moteur d'inférence flou.

La troisième méthode, qui constitue une des contributions de cette thèse, est fondée sur la méthode des champs de potentiels. Cette méthode, déjà largement utilisée pour la planification de mouvement de robots fixes ou mobiles n'avait jamais été appliquée au pilotage de bateaux (à moteur ou à voile). Dans cette méthode, les capacités de déplacement (i.e. la courbe polaire de vitesse) du voilier sont représentées par des obstacles virtuels se déplaçant avec le voilier et se déformant en fonction des conditions instantanées de vent. Un des intérêts de cette méthode est qu'elle permet de représenter, dans le formalisme unifié de champs de potentiel, à la fois les tâches à réaliser (ici un point de passage à rejoindre le plus vite possible) et les contraintes à satisfaire (éviter les obstacles, ne pas se déplacer selon certains caps). Cette méthode s'avère finalement, à travers les tests en simulations réalisés à l'aide du simulateur dont nous disposons, légèrement plus efficace que les deux précédentes et surtout d'un emploi plus aisé. En effet, dans ces méthodes fondées sur des techniques de planification locale, la pondération effectuée sur les différents critères a une influence non négligeable et parfois assez indirecte sur le résultat. Avec la méthode des champs de potentiels, ce réglage s'avère assez intuitif. Cette méthode a été validée expérimentalement par des tests réalisés avec le voilier que nous avons développé. Lors de ces essais, le voilier robotisé a montré sa capacité à passer par un ensemble de points de passage, définis par leur coordonnées GPS, pour différentes conditions moyennes de vent. Par ces expériences, nous avons pu également vérifier la robustesse de cette méthode de navigation puisque nous n'avions aucune connaissance a priori de la polaire de vitesse du voilier utilisé.

Toujours dans le cadre de la navigation réactive, nous nous sommes intéressés

au maintien de l'intégrité de l'engin. Une autre contribution de cette thèse réside dans la méthode que nous avons proposée pour limiter les risques de chavirement du voilier (ou tout au moins le risque de prise d'eau). Dans cette méthode, nous introduisons comme contrainte, une limitation sur l'angle de gîte du voilier, en déformant la polaire de vitesse du voilier. Cette nouvelle contrainte s'intègre ensuite très facilement dans les algorithmes précédents, en particulier celui basé sur la méthode des champs potentiels.

La deuxième fonction nécessaire au pilotage automatique d'un voilier est la fonction de *commande*. Cette commande consiste en un asservissement de cap. L'objectif est ici de déterminer la loi de commande permettant d'asservir les mouvements du safran en fonction de l'erreur entre le cap consigne et le cap réel suivi par le voilier. A travers un certain nombre de simulations, nous avons montré que, bien qu'un simple correcteur proportionnel soit suffisant pour réaliser cet asservissement de cap, l'ajout d'un terme dérivé permettait d'améliorer le temps de réponse de cette boucle d'asservissement mais surtout, de diminuer l'erreur statique de suivi de cap. Nous avons également mis en évidence par des simulations la forte non linéarité de la réponse cap/safran dans un voilier, réponse qui dépend en particulier de la vitesse du voilier. Pour tenir compte de la dépendance en vitesse, nous proposons d'utiliser un régulateur Proportionnel-Dérivé à gains variables pour obtenir des performances de ce suivi de cap homogènes sur une large plage de vitesse.

Ce travail constitue une contribution au pilotage automatique de voiliers robotisés. Une des toutes premières perspectives se situe dans l'immédiate continuité de ce travail de thèse. En effet, comme nous l'avons souligné, la validation et la qualification de méthodes de commande dans le domaine de la robotique en milieu naturel ne peuvent se passer d'une vérité terrain. Les algorithmes que nous avons développés nécessitent des essais plus nombreux et dans des conditions environnementales plus variées (en particulier, des essais en mer avec des effets de vagues et de courants réels). Le voilier modèle réduit que nous avons développé ainsi que le voilier *Asarome* sont désormais complètement opérationnels pour mener à bien ce type de tests.

Ce travail de thèse ouvre également un certain nombre de perspectives, qui peuvent permettre *in fine* d'améliorer les performances et l'autonomie de voiliers robotisés.

Ces améliorations de performances et d'autonomie peuvent être menées à notre sens selon trois grands axes :

-
- l'amélioration de la commande des mouvements permettant d'optimiser les manœuvres de changement de bord, la manœuvrabilité ou la prise de vitesse,
 - l'extension des méthodes de planification pour prendre en compte des contraintes de tâches autres que le passage par *waypoints* avec par exemple du suivi de route ou l'introduction de notion de temps de déplacement,
 - le développement d'un planificateur de haut niveau capable de réaliser des sélections d'action afin de maintenir le système opérationnel : compromis objectif/consommation énergétique, mise en sécurité en cas de conditions météorologiques menaçant l'intégrité du voilier ou capacité à fonctionner selon des modes dégradés.

Concernant le premier point, nos méthodes de sélection de cap déterminent un angle de cap acceptable par rapport à la direction du vent, la position du *waypoint* et du cap courant. Néanmoins, nous n'avons pas considéré de critère permettant de déterminer quelle manœuvre de virage (empannage ou virement de bord) convient le mieux pour l'état courant. Les manœuvres pour l'évitement des obstacles sont faites de la même façon. Une idée pour améliorer le comportement réactif lors d'évitement d'obstacles est de tenir compte de la direction du vent et d'éviter ces obstacles par le côté qui est sous le vent. Si l'obstacle est un autre voilier, nous devons également respecter les règles de priorité en mer qui indiquent par exemple que si deux voiliers au près se rapprochent, la priorité échoit au bateau au vent (en supposant qu'un voilier autonome soit considéré comme un navire avec équipage, ce qui ne semble pas être le cas dans le flou de la législation actuelle).

Une deuxième voie qui permettrait d'améliorer localement les mouvements d'un voilier, consiste à augmenter la manœuvrabilité du voilier. Comme nous l'avons montré à partir de simulations, le rayon tactique dépend de la vitesse mais également de l'angle de safran. Une modélisation plus fine de ce système couplé non linéaire pourrait permettre de synthétiser une loi de commande non linéaire sur l'asservissement de safran qui optimiserait la valeur du rayon tactique. Une autre possibilité consisterait à exploiter des mesures d'efforts sur la mèche de safran pour maximiser la composante de portance qui permet au bateau de virer de bord.

Une troisième voie permettant d'améliorer localement les mouvements d'un voilier concerne le réglage des voiles. Cette recherche d'un angle optimal de voile, permettant d'assurer une propulsion continue, peut difficilement être menée sur la base d'un modèle précis en raison d'un certain nombre de difficultés : comportement non linéaire des voiles, couplages éventuels entre la grand-voile et le foc,

hypothèse de rigidité pas forcément vérifiée, courbure, vrillage de la voile, prise en compte des phénomènes non stationnaires,...

Afin de contourner ce problème de modélisation, nous proposons deux solutions. La première suppose l'utilisation d'un asservissement visuel. En utilisant une caméra fixée en haut du mât, il est possible d'identifier des témoins visuels (bandes de tissus fixés sur la voile, en anglais "*telltails*"). La position par rapport à la voile et la forme de ces indicateurs permettent de mesurer l'efficacité de la voile pour un angle d'attaque donné. Théoriquement, à partir de ces images, il est possible de calculer les corrections de l'angle d'attaque le mieux adapté aux besoins de navigation.

Une deuxième hypothèse pour le réglage des voiles est basée sur la relation *poussée-gîte*. Intuitivement, nous pouvons supposer que la gîte est un bon indicateur de la vitesse du bateau donc, de la poussée générée par les voiles. Parallèlement, nous cherchons à maintenir la gîte en dessous d'une valeur "acceptable" ce qui implique que la voile soit réglée pour un angle d'attaque sous-optimal. Une fonction qui, en plus des informations classiques du vent, prend en compte la gîte du bateau pourrait résoudre ce problème. Nous avons testé expérimentalement une première approche de cette idée qui donne des résultats intéressants même si la loi de commande qui en résulte n'est pas optimale et présente des discontinuités qu'il convient de mieux prendre en compte.

Le second axe pour les perspectives de ce travail concerne l'extension des méthodes de navigation réactive. Le cadre fixé pour ce travail de thèse portait sur le développement d'un démonstrateur, afin de démontrer lors de tests de courtes durées ses capacités à rejoindre automatiquement des points de passage le plus vite possible en s'adaptant à son environnement local (vent et obstacles). Afin de mener à bien d'autres missions, il est nécessaire d'étendre ces méthodes. Une première possibilité consiste à exprimer la mission non plus en terme d'un point à atteindre mais plutôt d'une route à suivre. En effet, pour des missions de plus grande envergure (c'est-à-dire telles que les points de passage sont fortement éloignés les uns des autres), les points de passage peuvent être fixés par un opérateur humain à partir de cartes marines et la route directe entre ces points permet d'éviter des zones (îles, couloirs de navigation,...) constituant des obstacles. La navigation par point de passage est assez mal adaptée dans ce cas, en particulier lorsque le point de passage est éloigné ce qui conduit le voilier à s'éloigner fortement de cette ligne directe entre les points de passage. D'autre part, certaines missions peuvent nécessiter explicitement de réaliser un suivi de lignes, telles que des missions de relevés bathymétriques ou de quadrillage d'une zone en vue de détecter des polluants.

La méthode des champs de potentiel pourrait être étendue pour réaliser ce suivi de ligne, en associant un champ de potentiel attractif à la route à suivre ou en associant un potentiel attractif à un point se déplaçant sur le chemin direct entre deux points de passage.

Les méthodes de navigation peuvent aussi être étendues pour prendre en compte la notion de temps dans la planification locale. Dans les méthodes que nous avons développées, cette notion de temps n'est prise en compte qu'à travers la méthode de réglage de voile et de sélection de cap qui permet de se déplacer le plus rapidement possible vers l'objectif, ce qui peut conduire à une sur-utilisation des actionneurs en particulier de voile. Lorsque les conditions de mission exigent que le voilier soit en un point précis à un instant précis (compatible avec les données de vent et de courant moyennes dans la zone), il est alors préférable de prendre en compte explicitement le temps et de mettre en place une forme de régulation sur le temps de mission. Cette régulation pourrait être mise en place par exemple en exploitant les polaires non normalisées du voilier et en associant, pour la variable de commande correspondant à l'angle de voile, un potentiel attractif au temps d'arrivée dont l'intensité serait fonction de l'écart temporel entre le temps estimé pour atteindre l'objectif (obtenu par la polaire de vitesse) et le temps désiré.

Enfin, pour envisager des missions de longue durée en quasi-complète autonomie de ces voiliers robotisés, il nous semble nécessaire de mettre en place une planification de plus haut niveau, chargée de la mise en place de stratégies de navigation. Sur la base d'une analyse des données intrinsèques au voilier (position, vitesse, gîte mais également niveau de charge des batteries) et des données de l'environnement (vents, courant, champs de vague), cet étage de planification 'intelligent' doit être capable de redéfinir en ligne les objectifs de mission. La mise en place de ces stratégies peut également se baser sur une connaissance plus globale de l'environnement en utilisant par exemple des cartes marines de vents et de courants et/ou des prévisions météorologiques.

Un des axes d'amélioration qu'il nous semble important de développer pour augmenter l'autonomie de ces voiliers, concerne leur autonomie énergétique. Cette étage de planification de haut niveau pourrait être chargé d'évaluer la consommation énergétique du voilier ainsi que la capacité de rechargement de ses batteries afin de redéfinir les objectifs de mission ou de modifier les paramètres des algorithmes de navigation pour préserver cette autonomie énergétique. Ce compromis entre atteinte des objectifs de mission et autonomie énergétique pourrait être trouvé par l'utilisation de commandes de type multi-objectifs.

CHAPITRE 7. CONCLUSION

De manière similaire, en cas de conditions de navigation difficiles (tempêtes, forts courants), l'objectif prioritaire ne s'exprime plus en terme de réussite de la mission mais en terme de préservation de l'intégrité de l'engin. Ici aussi, cet étage stratégique devra être capable de redéfinir les objectifs de mission pour s'adapter aux conditions locales afin de maintenir le voilier en état de fonctionnement.

Une autre fonction de cette boucle de surveillance/planification pourrait être sa capacité à gérer des modes dégradés de fonctionnement, par exemple lors de la rupture d'un élément (foc, grand-voile) ou de la défaillance d'un capteur (capteur de vent en particulier). En fonction de l'analyse de la situation, le voilier autonome pourra décider de poursuivre la mission en cours ou de modifier son objectif afin de le ramener vers un point de récupération. Dans les deux cas, les algorithmes de navigation et/ou de commande devront être commutés sur des modes n'utilisant pas les éléments défaillants.

Enfin, au-delà de ces perspectives d'amélioration de l'intelligence embarquée, l'augmentation de l'autonomie de voiliers robotisés peut évidemment être obtenue par des moyens matériels. Une plus grande autonomie pourrait être obtenue en réfléchissant la conception de ces voiliers autonomes de manière à les rendre plus robustes face à des états de mer difficiles. L'autonomie énergétique doit également faire partie des contraintes à intégrer dès la conception afin de choisir les calculateurs embarqués, les actionneurs et les capteurs permettant d'optimiser la consommation énergétique et d'installer des dispositifs de récupération de l'énergie efficaces (panneaux solaires, éoliennes, système de récupération de l'énergie des vagues, ...).

L'autonomie, au sens de la préservation de l'intégrité, peut aussi être augmentée en dotant le voilier d'un système de perception performant permettant de détecter les obstacles dérivants, les autres navires ou la dangerosité des conditions climatiques (vent, vagues). La détection d'autres navires peut également s'appuyer sur l'utilisation d'un système AIS. Ce dispositif, obligatoire sur les navire de jauge brute supérieure à 300 (soit 850 m^3) depuis juillet 2007, peut également permettre la mise en œuvre de manœuvres d'évitement.

Enfin, en guise de conclusion, soulignons que les retombées d'une partie de ces recherches peuvent également être exploitées pour construire des aides au pilotage pour des voiliers ou des navires motorisés habités.



Annexe1

A.1 Nombre de Froude

Le nombre de Froude caractérise, dans un fluide, l'importance relative des forces liées à la vitesse et à la force de pesanteur. Il est utilisé en particulier pour la conception de barrages ou en architecture navale. L'origine de ce nombre remonte au XIX^e siècle, où l'hydrodynamicien William Froude montra, à partir d'essais réalisés sur des modèles réduits de bateaux, que leur comportement restait semblable lorsque la vitesse du navire variait comme la racine carrée de sa longueur.

Le nombre de Froude (Fn) est un nombre sans dimension liant la gravité (g), la vitesse du bateau (V_b) et la longueur de flottaison (L_{WL}). Le nombre de Froude admet deux définitions. Celle utilisée pour spécifier le domaine de validité du modèle de Gerritsma utilisé pour l'évaluation des efforts hydrodynamiques sur la coque dans le chapitre 3 section §3.3 est la suivante :

$$F_r = \frac{V_B^2}{g \cdot L_{WL}} \quad (\text{A.1})$$

A.2 Coefficients de Gerritsma

Les valeurs des dix coefficients de la forme polynômiale de Gerritsma (équation 3.19, section 3.3) permettant d'évaluer la composante des efforts hydrodynamiques de résistance résiduaire s'exerçant sur la coque sont données dans le tableau suivant, en fonction du nombre de Froude. En première approximation (en considérant que la longueur à la flottaison reste constante), ces valeurs sont donc données en fonction du carré de la vitesse par rapport à l'eau.

ANNEXE A. ANNEXE1

Fn	a0	a1	a2	a3	a4
0.125	-6.735654	38.36831	-0.008193	0.055234	-1.997242
0.150	-0.382870	38.17290	0.007243	0.026644	-5.295332
0.175	-1.503526	24.40803	0.012200	0.067221	-2.448582
0.200	11.29218	-14.51947	0.047182	0.085176	-2.673016
0.225	22.17867	-49.16784	0.085998	0.150725	-2.87684
0.250	25.90867	-74.75668	0.153521	0.188568	-0.889467
0.275	40.97559	-114.2855	0.207226	0.250827	-3.072662
0.300	45.83759	-184.7646	0.357031	0.338343	3.871658
0.325	89.20382	-393.0127	0.617466	0.460472	11.54327
0.350	212.6788	-801.7908	1.087307	0.538938	10.80273
0.375	336.2354	-1085.134	1.644191	0.532702	-1.224173
0.400	566.5476	-1609.632	2.016090	0.265722	-29.24412
0.425	743.4107	-1708.263	2.435809	0.013553	-81.16189
0.450	1200.620	-2751.715	3.208577	0.254920	-132.0424

Fn	a5	a6	a7	a8	a9
0.125	-38.86081	0.956591	-0.002171	0.272895	-0.017516
0.150	-39.55032	1.219563	0.000052	0.824568	-0.04782
0.175	-31.91370	2.216098	0.000074	0.244345	-0.015887
0.200	-11.41819	5.654065	0.007021	-0.094934	0.006325
0.225	7.167049	8.600272	0.012981	-0.327085	0.018271
0.250	24.12137	10.48516	0.025348	-0.854940	0.048449
0.275	53.01570	13.02177	0.035934	-0.715457	0.039874
0.300	132.2568	10.86054	0.066809	-1.719215	0.095977
0.325	331.1197	8.598136	0.104073	-2.815203	0.155960
0.350	667.6445	12.39815	0.166473	-3.026131	0.165055
0.375	831.1445	26.18321	0.238795	-2.450.470	0.139154
0.400	1154.091	51.46175	0.288046	-0.178354	0.018446
0.425	937.4014	115.6006	0.365071	1.83867	-0.062023
0.450	1489.269	196.3406	0.528225	1.379102	0.013577

A.3 Mécanisme d'actionnement du safran

La liaison cinématique entre le vérin et le safran du voilier *Asarome* est représentée figure A.1(a) : la base du vérin est liée au pont du bateau par la liaison pivot A. La tige du vérin est liée à la barre du safran par la liaison pivot B. L'autre côté de la barre, relié à l'axe du safran, tourne autour du pivot O.

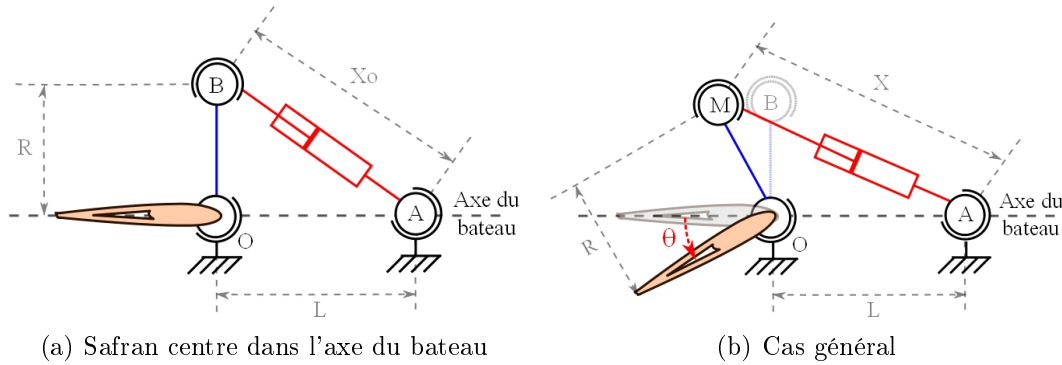


FIGURE A.1 – Système vérin-safran

Ce système vérin-safran permet de commander l'angle de safran θ depuis le mouvement linéaire du vérin (fig. A.1(b)). L'élongation du safran X (distance AB) est mesurée par un potentiomètre. La valeur de l'angle θ en fonction de l'élongation du vérin est donné par la relation A.2 où les valeurs des angles MNO et BOA sont déterminées par les relations A.3 à A.6. Dans ces relations, L est la distance AO , R la longueur de la barre du safran (distance BO) et X_0 la longueur du vérin lorsque l'angle de safran est nul (safran aligné dans l'axe du bateau).

$$\theta = \pi - 2 \times MNO - BOA \quad (A.2)$$

$$MNO = \arccos\left(\frac{MN}{2R}\right) \quad (A.3)$$

$$MN = \sqrt{X^2 + (L - R)^2 - 2X(L - R)\cos(MAO)} \quad (A.4)$$

$$\cos(MAO) = \frac{X^2 + L^2 - R^2}{2XL} \quad (A.5)$$

$$BOA = \arccos\left(\frac{R^2 + L^2 - X_0^2}{2RL}\right) \quad (A.6)$$

ANNEXE A. ANNEXE1

La relation d'inversion, donnant l'élongation du vérin X en fonction de l'angle de safran θ , est donnée ci-dessous :

$$X = \sqrt{4RL \sin^2 \left(\frac{\theta}{2} + \gamma \right) + (L - R)^2} \quad (\text{A.7})$$

$$\gamma = \arccos \left(\frac{R^2 + L^2 + X_0^2}{2RL} \right) \quad (\text{A.8})$$

Les valeurs numériques des longueurs des différents segments sont données dans le tableau suivant.

R	60 mm
L	315 mm
X_0	305 mm

Glossaire

Allure : Sur un voilier, l'allure désigne la direction d'où provient le vent. Les principales allures sont le prés, le bon plein, le travers, le grand largue et le vent arrière. L'allure dépend de l'angle formé entre l'axe principal du navire et le vent apparent.

Allure au largue : Cette allure est donnée quand le vent provient de 3/4 arrière.

Allure au prés : Cette allure est donnée quand le bateau se rapproche de la ligne du vent.

Allure de travers : Désigne lorsque le vent arrive par le travers du bateau, autrement dit à 90° de l'axe du bateau.

Amure : Position d'un bateau par rapport au vent. On dit bâbord amures quand le bateau reçoit le vent par bâbord (gauche) ou tribord amures quand il le reçoit par tribord (droite).

Angle d'attaque : En mécanique des fluides, l'angle d'attaque, ou d'incidence, est l'angle formé par la corde de référence du profil d'une surface et le vecteur vitesse du vent relatif.

Angle d'incidence : Voir Angle d'attaque.

ASB : De l'anglais "Autonomous SailBoat". Voilier autonome.

ASV : De l'anglais "Autonomous Surface Vehicle". Véhicule Autonome de Surface.

AWA : De l'anglais "Apparent Wind Angle". Angle du vent apparent.

AWS : De l'anglais "Apparent Wind Speed". Vitesse du vent apparent.

Bâbord : Côté gauche d'un navire pour un observateur regardant l'avant du navire.

Balestron : Pièce pivotant supportant l'ensemble de la voilure.

Bôme : Pièce de bois ou de métal horizontale qui permet de maintenir la bordure inférieure de la voile et de l'orienter.

Coque : Constituant premier d'un bateau : il forme le flotteur, c'est-à-dire l'élément assurant la flottabilité et l'étanchéité.

Écoute : Cordage servant à régler l'angle de la voile par rapport à l'axe longitudinal du voilier et en conséquence l'angle d'incidence du vent.

Empannage : En navigation à voile, empanner consiste pour un voilier à changer d'amure en passant par le vent arrière.

Foc : Voile triangulaire à l'avant d'un voilier.

Gîte : Inclinaison d'un voilier autour de son axe longitudinal.

GLOSSAIRE

Gouvernail : Dispositif mobile destiné au contrôle directionnel d'un bateau et plus généralement de tout engin se déplaçant sur l'eau, dans l'eau ou dans l'air.

Grand-voile : Voile principale située à l'arrière du mât de forme triangulaire, elle est maintenue sur deux de ses bords : d'un côté par le mât et de l'autre par la bôme, qui permet de l'orienter.

Hale-bas : Dispositif permettant de maintenir la bôme vers le bas.

Jibe : Voir empannage.

Ligne de flottaison : Ligne qui sépare la partie immergée de la coque d'un navire de celle qui est émergée.

Louvoyer : Tracer des zigzags afin de "remonter" au vent.

Nœud : Unité de vitesse utilisée en navigation maritime et aérienne. 1 nœud correspond à 1 mille marin par heure, soit environ $1,852\text{km/h}$ ou $0,514\text{m/s}$.

Poupe : Partie arrière d'un bateau.

Proue : Partie avant d'un bateau.

Quille : Appendice vertical fixe placé sous la coque afin de placer le lest et de servir de plan antidérive.

Safran : Partie du gouvernail d'un navire, constitué d'un plan vertical pouvant pivoter afin de dévier le flux d'eau sous la coque pour changer la direction du navire.

Skipper : Mot anglais pour désigner un barreur, c'est à dire le membre de l'équipage qui tient la barre pour diriger le bateau dans la direction souhaitée.

Tack : Voir virement de bord.

Tell-tales : Témoins visuels fixés sur la voile qui servent à matérialiser l'écoulement du vent autour de la voile.

Tribord : Côté droit d'un navire, pour un observateur regardant l'avant du navire.

TWA : De l'anglais "True Wind Angle". Angle du vent réel, mesuré généralement par rapport au Nord.

TWS : De l'anglais "True Wind Speed". Vitesse du vent réel.

Vent apparent : Le vent apparent est le vent ressenti par un observateur qui se situe dans un véhicule en déplacement. Il s'oppose au vent réel qui est le vent ressenti par le même observateur arrêté.

Vent réel : Vent perçu depuis une position fixe.

Virement de bord : Manœuvre qui consiste à faire virer le bateau de manière à changer d'amure en passant par le vent debout.

VMG : Sigle anglais de "Velocity Made Good". La VMG est une notion employée le plus souvent lors de la remontée au vent, aux allures de près. Elle est définie comme la vitesse effective dans la direction du point de passage.

Bibliographie

- [1] R. Stelzer and K. Jafarmadar, "A layered system architecture to control an autonomous sailboat," in "Conf. TAROS (Towards Autonomous Robotic Systems)," (2007), pp. 1–7.
- [2] Y. Andrillon, "Projet ASAROME - Réalisation d'un simulateur," Tech. rep., Hydrocéan - Ecole Centrale de Nantes (2010).
- [3] J. Yuh, "Design and control of autonomous underwater robots : A survey," *Autonomous Robots* **8**, 7–24 (2000).
- [4] E. Bovio, D. Cecchi, and F. Baralli, "Autonomous underwater vehicles for scientific and naval operations," *Annual Reviews in Control* **30**, 117 – 130 (2006).
- [5] G. Antonelli, T. I. Fossen, and D. R. Yoerger, "Underwater robotics," in "Springer Handbook of Robotics," , B. Siciliano and O. Khatib, eds. (Springer Berlin Heidelberg, 2008), pp. 987–1008.
- [6] Department of the Navy, USA, "The navy unmanned surface vehicle (USV) master plan," Tech. rep., Department of the Navy, United States of America (2007).
- [7] G. Elkaim and C. Boyce, "An energy scavenging autonomous surface vehicle for littoral surveillance," in "ION Global Navigation Satellite Systems Conference," (2008), pp. 852–860.
- [8] C. Thomas, "Continuing program of the dolphin semi submersible," in "4th Int. Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology," , vol. 4 (1985), vol. 4, pp. 223 – 229.
- [9] International Submarine Engineerig Ltd, "DOLPHIN MK I semi-submersible AUV," Tech. rep., International Submarine Engineering Ltd. (1988).
- [10] Jane's Underwater Security Systems and Technology, "SASS (united kingdom), autonomous semi-submersibles," [http ://articles.janes.com/articles/Janes-Underwater-Security-Systems-and-Technology/SASS-United-Kingdom.html](http://articles.janes.com/articles/Janes-Underwater-Security-Systems-and-Technology/SASS-United-Kingdom.html) (2007).
- [11] T. Alves, A. Pascoal, A. Pereira, J. Rodeia, A. Simões, M. Juliano, R. Duarte, C. Silvestre, P. Oliveira, L. Sebastião, and R. A. A. Jorge, "The use of caravela 2000 vehicles in operational oceanography," 2nd Eurogoos Conference (1999).
- [12] J. Manley and M. Frey, "Development and operation of the autonomous surface craft artemis," in "MIT Sea Grant Undergraduate Summer Research Program," (1994).
- [13] J. Manley, [http ://web.mit.edu/jmanley/www/Projects.html](http://web.mit.edu/jmanley/www/Projects.html).

BIBLIOGRAPHIE

- [14] J. Manley, "Development of the autonomous surface craft "aces", in "Oceans 1997," (1997), pp. 827–832.
- [15] J. Manley, A. Marsh, W. Cornforth, and C. Wiseman, "Evolution of the autonomous surface craft autocat," in "Oceans 2000," (2000), pp. 403–408.
- [16] J. Manley, J. Curran, B. Lockyer, J. Morash, and C. Chrysostomidis, "Applying auv lessons and technologies to autonomous surface craft development," in "Oceans 2001," (2001), pp. 545–549.
- [17] J. Curcio, J. Leonard, and A. Patrikalakis, "Scout - a low cost autonomous surface platform for research in cooperative autonomy," in "Oceans'05," (2005), pp. 725–729.
- [18] J. Curcio, J. Leonard, J. Vaganay, A. Patrikalakis, A. Bahr, D. Battle, H. Schmidt, and M. Grund, "Experiments in moving baseline navigation using autonomous surface craft," in "Oceans'05," (2005), pp. 730–735.
- [19] D. Eickstedt, M. Benjamin, J. Ianniello, H. Schmidt, and J. Leonard, "Adaptive tracking of underwater targets with autonomous sensor networks," *Journal of Underwater Acoustic* **56**, 465 – 495 (2006).
- [20] M. Benjamin, J. Curcio, J. Leonard, and P. Newman, "Navigation of unmanned marine vehicles in accordance with the rules of the road," in "IEEE International Conference on Robotics and Automation," (2006), pp. 3581–3587.
- [21] M. Benjamin, J. Curcio, J. Leonard, and P. Newman, "A method for protocol-based collision avoidance between autonomous marine surface craft," *Journal of Field Robotics* **23**, 333–346 (2006).
- [22] A. Leonessa, J. Mandello, Y. Morel, and M. Vidal, "Design of a small, multi-purpose, autonomous surface vessel," in "Oceans 2003," (2003), pp. 544–550.
- [23] Y. Morel and A. Leonessa, "A adaptative no linear cotracking control of an underactuated nonminimum phase model of a marine vehicle using ultimate boundedness," *Proc. of Conf. on Decision and Control, CDC 03* **1**, 3097–3102 (2003).
- [24] A. Leonessa and T. VanZwiteten, "Neural network model reference adaptive control of a surface vessel," in "Conf. on Decision and Control," (2004), pp. 662–667.
- [25] P. Mahacek, R. Kobashigawa, A. Schooley, and C. Kitts, "The wasp autonomous surface vessel," *Oceans 2005* (2005).
- [26] E. Beck, W. Kirkwood, D. Caress, T. Berk, P. Mahacek, K. Brashem, J. Acain, V. Reddy, C. Kitts, J. Skutnik, and G. Wheat, "Seawasp : A small waterplane area twin hull autonomous platform for shallow water mapping," *Marine Tech Soc Journal* **43**, 6–12 (2008).

- [27] M. Chaumet-Lagrange, H. Loeb, and S. Ygorra, "Design of an autonomous surface vehicle (asv)," *OCEANS '94* p. I/120 (1994).
- [28] J. Majohr, T. Buch, and C. Kort, "Navigation and automatic control of the measuring dolphin (messin)," in "IFAC Conf. on Manoeuvring and Control of Marine Crafts," (2000), pp. 405–410.
- [29] M. Caccia, R. Bono, G. Bruzzone, G. Bruzzone, E. Spirandelli, G. Veruggio, A. Stortini, and G. Capodaglio, "Sampling sea surfaces with SESAMO," *Robotics and Automation Magazine* **12**, 95–105 (2005).
- [30] M. Caccia, R. Bono, G. Bruzzone, G. Bruzzone, E. Spirandelli, G. Veruggio, and A. Stortini, "Design and exploitation of an autonomous surface vessel for the study of sea-air interactions," in "IEEE International Conference on Robotics and Automation," (2006), pp. 3582–3587.
- [31] J. E. Manley, "Unmanned surface vehicles, 15 years of development," *Oceans* 2008 pp. 1–4 (2008).
- [32] M. Caccia, G. Bruzzone, and R. Bono, "Modelling and identification of the charlie2005 asc," in "14th Mediterranean Conference on Control and Automation," (2005).
- [33] M. Caccia, "Experiments in low cost high precision motion control for rovs," in "International Conference on Robotics and Automation," (2005), pp. 4667–4672.
- [34] W. Naeem, T. Xu, J. Chudley, and R. Sutton, "Design of an unmanned surface vehicle for environmental monitoring," *World Maritime Technology Conference* (2006).
- [35] W. Naeem, R. Sutton, and J. Chudley, "Soft computing design of a linear quadratic gaussian controller for an unmanned surface vehicle," in "14th Mediterranean Conference on Control and Automation," (2006).
- [36] 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'00," (2000), pp. 409–415.
- [37] J. Alves, P. Oliveira, R. Oliveira, A. Pascoal, M. Rufino, L. Sebastião, and C. Silvestre, "Vehicle and mission control of the delfim autonomous surface craft," in "14th Mediterranean Conference on Control and Automation," (2006).
- [38] A. Pascoal, I. Kaminer, and P. Oliveira, "Navigation system design using time-varying complementary filters," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* **36**, 1099–1115 (2000).

- [39] P. Gomes, C. Silvestre, A. Pascoal, and R. Cunha, "A path-following controller for the delfim autonomous surface craft," in "IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Vehicles," (2006).
- [40] Moiré Incorporated, "The growing us market for unmanned surface vehicles (USVs)," <http://www.radix-marine.com/PDFs/USVMarketStudy.pdf> (2003).
- [41] V. Bertram, "Unmanned surface vehicles - a survey," [http://www.skibstekniskelskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Download materiale/2008/10 marts 2008/USVsurvey DTU.pdf](http://www.skibstekniskelskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Download%20materiale/2008/10%20marts%202008/USVsurvey%20DTU.pdf) (2008).
- [42] R.-j. Yan, S. Pang, H.-b. Sun, and Y.-j. Pang, "Development and missions of unmanned surface vehicle," *Journal of Marine Science and Application* **9**, 451–457 (2010).
- [43] W. Gayle, "Analysis of operational manning requirements and deployment procedures for unmanned surface vehicles aboard us navy ships," Ph.D. thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California (2006).
- [44] W. Warden, "A control system model for autonomous sailboat navigation," in "IEEE Proceedings of Southeastcon," , vol. 2 (1991), vol. 2, pp. 994–947.
- [45] M. L. van Aartrijk, C. P. Tagliola, and P. W. Adriaans, "Ai on the ocean : the robosail project," in "15th European Conference on Artificial Intelligence," (2002).
- [46] M. L. van Aartrijk and J. Samoocha, "Learning to sail," in "European Symposium on Intelligent Technologies, Hybrid Systems and their implementation on Smart Adaptive Systems," (2003).
- [47] E. Yeh and B. J.-C. Bin, "Fuzzy control for self-steering of a sailboat," in "Singapore International Conference on Intelligent Control and Instrumentation," , vol. 2 (1992), vol. 2, pp. 1339–1344.
- [48] J. Abril, J. Salom, and O. Calvo, "Fuzzy control of a sailboat," *International Journal of Approximate Reasoning - IJAR* **16**, 359–375 (1997).
- [49] G. Elkaim, "The atlantis project : A gps-guided wing-sailed autonomous catamaran," *Journal of the Institute of Navigation* **53**, 237–247 (2006).
- [50] G. Elkaim, "System identification for precision control of a wingsailed gps-guided catamaran," Ph.D. thesis, Stanford University (2002).
- [51] G. Elkaim, "An autonomous wing-sailed catamaran," *CATALYST : Journal of the Amateur Yacht Research Society* **16**, 21–36 (2004).
- [52] G. Elkaim, "Airfoil section design and configuration analysis of a free-rotating wing-sail for an autonomous marine surface vehicle," *AIAA Journal of Aircraft* **45**, 1835–1852 (2008).

- [53] G. Elkaim, "System identification based control of an unmanned autonomous wind-propelled catamaran," *Control Engineering Practice* **17**, 158–169 (2009).
- [54] G. Elkaim and R. Kelbley, "Direct measurement based h-infinity controller synthesis for an autonomous surface vehicle," in "ION Global Navigation Satellite Systems Conference," (2006), pp. 1973–1982.
- [55] G. Elkaim and R. Kelbley, "Station keeping and segmented trajectory control of a wind-propelled autonomous catamaran," in "45th IEEE Conference on Decision and Control," (2006), pp. 2424 –2429.
- [56] M. Neal, "A hardware proof of concept of a sailing robot for ocean observation," *IEEE Journal of Oceanic Engineering* **31**, 462–469 (2006).
- [57] C. Sauzé and M. Neal, "Design considerations for sailing robots performing long term autonomous oceanography," in "International Robotic Sailing Conference," (2008), pp. 21–29.
- [58] P. Miller, O. Brooks, and M. Hamlet, "Development of the USNA sailboats (asv)," in "International Robotic Sailing Conference," (2009).
- [59] Y. Briere, M. Gagneul, and P. Cormerais, "Challenge Microtransat," in "Congrès CETSIS EEA," (2005), pp. 1–4.
- [60] Y. Briere, "IBoat : an unmanned sailing robot for the Microtransat challenge and ocean monitoring," in "Conf. TAROS (Towards Autonomous Robotic Systems)," (2007), pp. 145–162.
- [61] Y. Briere, F. L. C. Ribeiro, and M. V. Rosa, "Design methodologies for the control of an unmanned sailing robot," 8th Conf. on Manoeuvring and Control of Marine Craft pp. 1–8 (2009).
- [62] Y. Briere, "IBoat : an autonomous robot for long-term offshore operation," in "14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)," (2008), pp. 323–329.
- [63] Y. Briere, "Sailing robot performance : maximum speed tracking vs energy efficiency," in "14th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR)," (2011), pp. 102–109.
- [64] "Robotique : le voilier qui vogue tout seul," Article paru dans l'Usine Nouvelle (p. 13), N° 3247 du 7 Juillet (2011).
- [65] C. Sauze and M. Neal, "An autonomous sailing robot for ocean observation," in "Conf. TAROS (Towards Autonomous Robotic Systems)," (2006), pp. 190–197.

- [66] N. Benatar, O. Qadir, J. Owen, P. Baxter, and M. Neal, "P-controller as an expert system for manoeuvring rudderless sail boats," in "UK Workshop on Computational Intelligence," (2009), pp. 1–6.
- [67] C. Sauze and M. Neal, "A neuro-endocrine inspired approach to long term energy autonomy in sailing robots," in "Conf. TAROS (Towards Autonomous Robotic Systems)," (2010).
- [68] C. Sauzé and M. Neal, "Long term power management in sailing robots," in "IEEE OCEANS," (2011), pp. 1–8.
- [69] C. Sauze and M. Neal, "A raycast approach to collision avoidance in sailing robots," in "International Robotic Sailing Conference," (2010), pp. 25–32.
- [70] R. Stelzer and T. Proll, "Autonomous sailboat navigation for short course racing," *Robotics and Autonomous Systems* **56**, 604–614 (2008).
- [71] R. Stelzer, T. Proll, and R. John, "Fuzzy logic control system for autonomous sailboats," in "IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems," (IEEE, 2007), pp. 1–6.
- [72] R. Stelzer, K. Jafarmadar, H. Hassler, R. Charwot *et al.*, "A reactive approach to obstacle avoidance in autonomous sailing," in "International Robotic Sailing Conference," (2010), pp. 33–39.
- [73] R. Stelzer and K. Jafarmadar, "Communication architecture for autonomous sailboats," in "International Robotic Sailing Conference," (2009), pp. 31–35.
- [74] H. Klinck, R. Stelzer, K. Jafarmadar, and D. Mellinger, "AAS endurance : An autonomous acoustic sailboat for marine mammal research," in "International Robotic Sailing Conference," (2009), pp. 43–48.
- [75] J. Alves and N. Cruz, "FASt - an autonomous sailing platform for oceanographic missions," in "IEEE OCEANS 2008," (2008), pp. 1–7.
- [76] N. Cruz and J. Alves, "Ocean sampling and surveillance using autonomous sailboats," in "International Robotic Sailing Conference," (2008), pp. 30–36.
- [77] N. Cruz and J. Alves, "Auto-heading controller for an autonomous sailboat," in "IEEE OCEANS 2010," (2010), pp. 1–6.
- [78] J. Sliwka, P.-H. Reilhac, R. Leloup, P. Crepier, H. Demalet, P. Sittaramane, F. L. Bars, K. Roncin, B. Aizier, and L. Jaulin, "Autonomous robotic boat of ENSIETA," in "International Robotic Sailing Conference," (2009), pp. 1–7.
- [79] L. Jaulin, "Modélisation et commande d'un bateau à voile," in "Conférence Internationale Francophone d'Automatique," (2004), pp. 1–6.
- [80] P. Herrero, L. Jaulin, J. Vehí, , and M. A. Sainz, "Guaranteed set-point computation with application to the control of a sailboat," *International Journal of Control, Automation and Systems* **8**, 1–7 (2010).

-
- [81] L. Jaulin, "A new interval state observer ; application to sailboat robotics," Article en cours de soumission pp. 1–6 (2011).
 - [82] J. Xiao, J. Sliwka, and L. Jaulin, "A wind-independent control strategy for autonomous sailboats based on voronoi diagram," in "14th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR)," (2011), pp. 109–123.
 - [83] L. Giger, S. Wismer, S. Boehl, G. Buesser, H. Erckens, J. Weber, P. Moser, P. Schwizer, C. Pradalier, and R. Siegwart, "Design and construction of the autonomous sailing vessel AVALON," in "International Robotic Sailing Conference," (2009), pp. 17–22.
 - [84] H. Erckens, G.-A. Busser, C. Pradalier, and R. Siegwart, "Avalon : Navigation strategy and trajectory following controller for an autonomous sailing vessel," IEEE Robotics Automation Magazine **17**, 45 –54 (2010).
 - [85] S. Wood, M. Rees, and Z. Pfeiffer, "An autonomous self-mooring vehicle for littoral coastal observations," in "OCEANS 2007 - Europe," (2007), pp. 1 –6.
 - [86] G. Podnar, J. Dolan, A. Elfes, S. Stancliff, E. Lin, J. Hosier, T. Ames, J. Moisan, T. Moisan, J. Higinbotham, and E. Kulczycki, "Operation of robotic science boats using the telesupervised adaptive ocean sensor fleet system," in "IEEE International Conference on Robotics and Automation," (2008), pp. 1061 –1068.
 - [87] E. Steimle and M. Hall, "Unmanned surface vehicles as environmental monitoring and assessment tools," in "OCEANS 2006," (2006), pp. 1 –5.
 - [88] R. R. Murphy, E. Steimle, C. Griffin, C. Cullins, M. Hall, and K. Pratt, "Co-operative use of unmanned sea surface and micro aerial vehicles at hurricane wilma," Journal of Field Robotics **25**, 164–180 (2008).
 - [89] P. Rynne and K. V. Ellenrieder, "Development and preliminary experimental validation of a wind- and solar-powered autonomous surface vehicle," IEEE Journal of Oceanic Engineering **35**, 971–983 (2010).
 - [90] G. Thomas, O. Ménage, T. Terre, and F. Gaillard, "An innovative approach of the surface layer sampling," Journal des Sciences Halieutique et Aquatique **4**, 105–109 (2011).
 - [91] E. Jacquin, "Navire autopropulsé en manœuvres : Simulation numérique et optimisation des performances hydrodynamiques," Ph.D. thesis, Université de Nantes (2007).
 - [92] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles* (Wiley, 1995).
 - [93] J. Gerritsma, "Motions, wave loads and added resistance in waves of two wigley hull forms," Tech. rep., Delft University of Technology, Ship Hydro-mechanics Laboratory (1988).
-

BIBLIOGRAPHIE

- [94] J. Gerritsma, J. Keuning, and R. Onnink, "Results and analysis of the Delft systematic series II yacht hull form experiments," in "11th HISWA Int. Symp. on Yacht Design and Construction," (1990).
- [95] N. Bose and S. Molloy, "Reliability and accuracy of ship powering performance extrapolation," in "First International Symposium on Marine Propulsors, (SMP'09)," (2009), pp. 1–8.
- [96] T. S. VanZwieten, "Dynamic simulation and control of an autonomous surface vehicle," Master's thesis, Florida Atlantic University (2003).
- [97] K. Roncin, "Simulation dynamique de la navigation de deux voiliers en interaction," Ph.D. thesis, Université de Nantes (2002).
- [98] P. German and P. Muller, *Introduction à la mécanique des milieux continus* (Masson, 1955), 2nd ed.
- [99] McGraw-Hill, Access Science, "Ship powering, maneuvering, and seakeeping," <http://accessscience.com/popup.aspx?id=619600&name=print>.
- [100] J. Journée, "Motions, resistance and propulsion of a ship in regular head waves," Tech. rep., Delft University of Technology, Ship Hydromechanics Laboratory (1976).
- [101] V. Bertram, *Practical Ship Hydrodynamics* (Butterworth-Heinemann, 2000).
- [102] J. Gerritsma, J. Keuning, and R. Onnink, "Sailing yacht performance in calm water and in waves," in "12th HISWA Int. Symp. on Yacht Design and Construction," (1992), pp. 1–32.
- [103] B. Alessandrini and J.-M. Rousset, "Projet ASAROME - Essais de validation en bassin : traction sur eau calme," Tech. rep., Ecole Centrale de Nantes (2010).
- [104] D. Harris, G. Thomas, and M. Renilson, "Downwind performance of yachts in waves," in "2nd Australian Sailing Science Conference," (1999).
- [105] L. Beguin and J.-M. Rousset, "Projet ASAROME - Résultats complets pour la caractérisation du comportement du voilier (manoeuvrabilité, comportement sur houle, effet du vent)," Tech. rep., Ecole Centrale de Nantes (2011).
- [106] K. Nomoto, K. Taguchi, K. Honda, and S. Hirano, "On the steering quality of ships," *International Shipbuilding Progress* **4**, 354–370 (1957).
- [107] Y. Guo, "Perception multimodale pour un robot mobile en milieu marin," Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie (2011).
- [108] Allied Vision Technologies, *Prosilica GE1350 User Manual*, <http://www.alliedvisiontec.com> (2011).
- [109] Tritech International, *Micron DST Sonar : Ultra Compact CHIRP Digital Sonar*, <http://www.tritech.co.uk>.

-
- [110] Aquarian Audio Products, *H2a-XLR Hydrophone Users's Guide*, <http://www.aquarianaudio.com>.
 - [111] Y. Guo and B. Gas, "Underwater transient and non transient signals classification using predictive neural networks," in "IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems," (2009).
 - [112] T. Lim, K. Bae, C. Hwang, and H. Lee, "Classification of underwater transient signals using MFCC feature vector," in "9th International Symposium on Signal Processing and Its Applications (ISSPA)," (2007), pp. 1–4.
 - [113] T. Lim, K. Bae, C. Hwang, and H. Lee, "Underwater transient signal classification using binary pattern image of MFCC and neural network," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science* **91**, 772–774 (2008).
 - [114] ARBOR, Embedded and Network Computing, *Arpex-2610 User's Manual, V10*, <http://www.arbor.com.tw>.
 - [115] Xsens, *MTi-G User Manual and Technical Documentation, Revision G*, <http://www.xsens.com/en/general/mti-g> (2009).
 - [116] Radio Océan, *Rowind Plus : Manuel d'utilisation*, http://www.furuno.fr/Multimedia/MU_ROWINDf.pdf (2002).
 - [117] Furuno, *Specifications CPTEVI-1*, <http://www.furuno.fr/>.
 - [118] LiPPERT ; The embedded PC Company, *Cool RoadRunner-945GSE PC104-Plus CPU Board, Technical Manual*, <http://www.lippertembedded.com>.
 - [119] Emtrion, *HiCO.SH7780-SBC Processor Board with SH7780 ; Hardware Description*, <http://www.emtrion.com>.
 - [120] R. Chang, "Etude des réseaux de caméras non synchronisées ou non calibrées," Ph.D. thesis, UPMC- Paris6 (2009).
 - [121] Megatron, *Potentiometre piste plastique PPS22*, www.megatron.fr.
 - [122] Arduino, *Arduino Duemilanove*, <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardDuemilanove>.
 - [123] L. Zadeh, "Fuzzy sets," *Journal of Information and Control* **8**, 338–353 (1965).
 - [124] Y. Jincong, Z. Xiuping, and et.al, "Intelligent robot obstacle avoidance system based on fuzzy control," *The 1st International Conference on Information Science and Engineering*, pp. 3812–3815 (2009).
 - [125] R. Malhotra and A. Sarkar, "Development of a fuzzy logic based mobile robot for dynamic obstacle avoidance and goal acquisition in an unstructured environment," *International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp. 1198–1203 (2005).
-

BIBLIOGRAPHIE

- [126] E. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* **121**, 1585–1588 (1974).
- [127] O. Khatib, "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots," *International Journal of Robotics Research* **5**, 90–98 (1986).
- [128] B. Krogh and C. Thorpe, "Integrated path planning and dynamic steering control for autonomous vehicles," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* pp. 1664–1669 (1986).
- [129] J. Barraquand, B. Langlois, and J. Latombe, "Numerical potential field techniques for robot path planning," *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* **22**, 224–241 (1992).
- [130] H. Haddad, M. Khatib, S. Lacroix, and R. Chatila, "Reactive navigation in outdoor environments using potential fields," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* **2**, 1232 – 1237 (1998).
- [131] S. Ge and Y. Cui, "Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method," *Autonomous Robots* **13**, 207 – 222 (2002).
- [132] S. Shimoda, Y. Kuroda, and K. Iagnemma, "Potential field navigation of high speed unmanned ground vehicles on uneven terrain," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* pp. 2828 – 2833 (2005).
- [133] Y. Guo, M. Romero Ramirez, S. Ieng, F. Plumet, R. Benosman, and B. Gas, "Reactive path planning for autonomous sailboat using an omni-directional camera for obstacle detection," in "IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)," (2011), pp. 445–450.
- [134] M. Romero Ramirez, Y. Guo, S. Ieng, F. Plumet, R. Benosman, and B. Gas, "Omni-directional camera and fuzzy logic path planner for autonomous sailboat navigation," *Research in Computing Science, Special Issue in Advances in Computer Science and Electronic Systems* **52**, 335–346 (2011).
- [135] C. Petres, M. Romero Ramirez, and F. Plumet, "Reactive path planning for autonomous sailboat," in "IEEE International Conference on Advanced Robotics," (2011), pp. 112–117.
- [136] C. Petres, M. Romero Ramirez, and F. Plumet, "Modeling and reactive navigation of an autonomous sailboat," in "IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems," (2011), pp. 3571–3576.
- [137] M.-A. Romero-Ramirez, C. Pêtrés, and F. Plumet, "Navigation with obstacle avoidance of an autonomous sailboat," in "International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines," (2011), pp. 85–92.
- [138] H. Coxeter, *Introduction to Geometry* (John Wiley & Sons, 1969).