



HAL
open science

Navigation Référencée Terrain pour Véhicule Autonome Sous-marin

Vincent Creuze

► **To cite this version:**

Vincent Creuze. Navigation Référencée Terrain pour Véhicule Autonome Sous-marin. Automatique / Robotique. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2002. Français. NNT : . tel-00010829

HAL Id: tel-00010829

<https://theses.hal.science/tel-00010829>

Submitted on 30 Oct 2005

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

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

**UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC**

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Systèmes Automatiques

Formation Doctorale : Systèmes Automatiques et Microélectroniques

Ecole Doctorale : Information, Structures, Systèmes

présentée et soutenue publiquement

par

CREUZE Vincent

le 14 novembre 2002

Titre :

**Navigation référencée terrain
pour véhicule autonome sous-marin**

JURY

M. ABOU-KANDIL Hisham	Professeur, E.N.S. Cachan, LESIR	, Président du Jury
M. JOUVENCEL Bruno	Professeur, Univ. Montpellier II, LIRMM	, Directeur
M. MARTINET Philippe	Professeur, Univ. de Clermont-Ferrand, LASMEA	, Rapporteur
M. MEIZEL Dominique	Professeur, U.T.C. Compiègne, HEUDIASYC	, Rapporteur
M. ZAPATA René	Maître de Conférence, Univ. Montpellier II, LIRMM	, Examinateur

Remerciements

Les travaux présentés ont été réalisés au LIRMM, Laboratoire d'Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier, Unité mixte de recherche du CNRS et de l'Université de Montpellier II.

Je remercie Michel Habib, directeur du LIRMM, Christian Landrault, directeur adjoint et Gaston Cambon, ancien directeur, de m'avoir accueilli au sein du laboratoire.

Je remercie également les membres de mon jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à mes travaux. En particulier M.Philippe Martinet, professeur à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand et M. Dominique Meizel, professeur à l'Université de Technologie de Compiègne à dont la précision des rapports m'a permis d'améliorer le présent manuscrit. Monsieur Hisham Abou-Kandil, professeur à l'École Normale Supérieure de Cachan, pour avoir accepté de présider le jury de thèse. Je remercie également M. René Zapata, Maître de Conférences à l'Université de Montpellier II.

Je remercie bien-sûr mon directeur de thèse, Bruno Jouvencel, Maître de Conférence à l'Université de Montpellier II, pour ses conseils et son aide dans l'accomplissement de mon travail de thèse. Merci aussi à Jérôme Vaganay, chargé de recherche au CNRS, actuellement ingénieur chez « Bluefin Robotics », pour son soutien et son aide précieuse durant la thèse et lors de la rédaction et de la correction du manuscrit. Merci à Philippe Baccou, ancien doctorant de l'équipe de robotique sous-marine, pour son aide et son amitié.

Je remercie particulièrement Geovany Borges, docteur en robotique, pour la précision et la qualité de ses nombreux conseils ainsi que pour son amitié. Merci également à Christophe Rabaud, doctorant au LIRMM, pour son aide précieuse dans la préparation de la soutenance de thèse.

Je remercie également, pour leurs réponses à mes nombreuses questions, Marie-José Aldon, Alain Liégeois, Etienne Dombre et François Pierrot. Merci aux membres du service technique pour leur aide dans les développements matériels liés à mon travail de thèse : Michel Benoît, Denis Pinna et Thierry Gil. Pour leur aide en informatique, je remercie Philippe Tilloy, Catherine Tuchming et Pascal Lépinay. Merci également aux membres du service administratif pour leur aide fréquente, efficace et bienveillante : Anne Bancel, Josette Durante, Ghislaine Takessian, Nadine Tilloy et Elizabeth Petiot.

Merci à tous ceux qui m'ont aidé au cours de ma thèse et que je n'ai pas pu nommer ici.

Merci enfin, pour leur soutien amical tout au long de ma thèse, à Corine Zicler, Jérôme Albaric, Olivier Company et Olivier Strauss.

Sommaire

<i>Introduction Générale</i>	11
<i>Chapitre I : Suivi de fond</i>	15
I.1. Introduction	16
I.2. Applications	17
I.2.1. Acquisitions d'images acoustiques ou vidéo.....	17
I.2.1.a. Sonar latéral.....	17
I.2.1.b. Acquisition vidéo	18
I.2.2. Suivi de structures industrielles.....	19
I.2.3. Evitement d'obstacles.....	19
I.3. Méthodes existantes	19
I.3.1. Suivi de profil de fond référencé capteur	19
I.3.1.a. Méthode linéaire quadratique	20
I.3.1.b. Fonction de Lyapunov.....	21
I.3.2. Perception de l'environnement, création de cartes.....	21
I.3.2.a. Une méthode utilisée en robotique terrestre... ..	21
I.3.2.b. ...et son adaptation au milieu sous-marin	22
I.3.2.c. positionnement par observation active du fond	23
I.3.3. Navigation référencée terrain	25
I.3.4. Evitement d'obstacles par sonar	26
I.3.5. Génération et suivi de trajectoires en robotique terrestre	28
I.3.5.a. Génération de trajectoires pour véhicules à roues	28
I.3.5.b. Fonction de tâche et suivi de fond référencé capteur	29
I.3.5.c. Positionnement du véhicule lors du suivi de trajectoire :.....	30
I.3.5.d. Chemins de Dubins pour véhicules non holonomes	31
I.4. Conclusion	32
<i>Chapitre II : Modélisation et commande du véhicule</i>	33
II.1. Introduction	34
II.2. Modélisation du véhicule sous-marin	34

II.2.1. Modèle dynamique	34
II.2.2. Espace de travail	34
II.2.3. Configuration du véhicule <i>Taipan</i>	35
II.2.4. Contraintes physiques retenues	35
II.2.4.a. Rayon de giration	36
II.2.4.b. Limitation de l'angle d'assiette	37
II.3. Commande du véhicule	39
II.3.1. Généralités	39
II.3.2. Commande en mode glissant	40
II.3.2.a. Définition du suivi de trajectoire	40
II.3.2.b. Principe	41
II.3.2.c. Surface de glissement	41
II.3.2.d. Détermination de la loi de commande	43
II.3.3. Cas du véhicule <i>Taipan</i>	44
II.3.3.a. Equations du mouvement	44
II.3.3.b. Modèle approché	44
II.3.3.c. Modèle d'évolution de <i>Taipan</i> dans le plan vertical.....	47
II.3.3.d. Commande en mode glissant	47
II.3.3.e. Dynamique du système sur la surface de glissement	48
II.3.3.f. Diminution du « chattering ».....	49
II.3.3.g. Détermination de la loi de commande en immersion	49
II.3.3.h. Expérimentations	51
II.3.4. Commande en mode glissant améliorée.....	52
II.4. Conclusion.....	52
<i>Chapitre III : Planification de trajectoires</i>	53
III.1. Introduction.....	54
III.2. Mise en équation des contraintes.....	54
III.2.1. Prise en compte de la dynamique	54
III.2.2. Limitation de l'angle d'assiette	55
III.2.3. Limitation du rayon de courbure	55
III.3. Méthode de suivi de fond en environnement connu.....	55
III.3.1. Franchissement des sommets.....	56

III.3.2. Rayon de courbure dans les creux	57
III.3.3. Interpolation du profil bathymétrique	58
III.3.3.a. Continuité de la dérivée seconde	58
III.3.3.b. Splines cubiques semi-forcées	59
III.3.3.c. Polynômes d'interpolation de Hermite	59
III.3.4. Consigne de distance	60
III.3.5. Limites	60
III.4. Méthode de suivi de fond en environnement inconnu	61
III.4.1. Nécessité de la méthode.....	61
III.4.2. Zones d'ombre	62
III.4.2.a. définition.....	62
III.4.2.b. Critère d'apparition d'une zone d'ombre	62
III.4.2.c. Danger potentiel des zones d'ombre	63
III.4.3. Algorithme	64
III.4.4. Adaptation de la méthode de suivi au véhicule Taipan.....	65
III.4.4.a. Dispositif bathymétrique	65
III.4.4.b. Caractéristiques du faisceau acoustique	65
III.4.5. Incertitudes de localisation	68
III.4.5.a. Erreurs de mesure bathymétrique : distance et angle	68
III.4.5.b. Erreurs de mesure bathymétrique : Echos multiples	69
III.4.5.c. Erreur due à l'odométrie du véhicule	69
III.4.5.d. Compensation des données	70
III.4.6. Limites	70
III.5. Méthode de détection et d'évitement des falaises.....	71
III.5.1. Hypothèses.....	73
III.5.1.a. Environnement	73
III.5.1.b. Sondeur supplémentaire.....	73
III.5.2. Trajectoire maximale d'évitement	73
III.5.2.a. Existence	73
III.5.2.b. Détermination	74
III.5.3. Zones de perception.....	74
III.5.3.a. Zone de limite de portée	75
III.5.3.b. Zone sure	76

III.5.3.c. Zone dangereuse	76
III.5.4. A propos de la “Zone Sure”	77
III.5.4.a. Faisceau conique	77
III.5.4.b. Hauteur maximale détectable	78
III.5.5. Algorithme	78
III.5.5.a. Obstacle détecté dans la “Zone Sure”	78
III.5.5.b. Obstacle approchant de la « Zone Dangereuse »	79
III.5.5.c. Echo perçu dans la “Zone Limite de Portée”	79
III.5.6. Détermination de l’angle d’inclinaison du transducteur	79
III.6. Conclusion.....	82
<i>Chapitre IV : Simulations et expérimentations</i>	<i>84</i>
IV.1. Introduction.....	85
IV.2. Cadre des simulations	85
IV.2.1. Le simulateur	85
IV.2.2. Variables d’état du système	86
IV.2.3. Simulation des acquisitions bathymétriques	86
IV.2.3.a. Relevé bathymétrique réel	86
IV.2.3.b. Simulation du fonctionnement des sondeurs	87
IV.3. Méthode de suivi de fond en environnement connu	88
IV.3.1. Simulations sur données artificielles	88
IV.3.2. Simulations sur données réelles.....	90
IV.4. Méthode de suivi de fond en environnement inconnu	92
IV.5. Méthode de détection des falaises.....	94
IV.5.1. Hauteur de falaise inférieure à h_{max}	94
IV.5.2. Hauteur de falaise supérieure à h_{max}	96
IV.6. Conclusion des simulations	98
IV.7. Le véhicule Taipan.....	98
IV.8. Choix du dispositif bathymétrique	99
IV.8.1. Dispositifs existants	99
IV.8.1.a. Sondeur mono-faisceau	99
IV.8.1.b. Sondeur à formation de voies	100

IV.8.1.c. Sonar frontal à balayage	101
IV.8.2. Dispositif retenu	102
IV.8.2.a. Contraintes liées au véhicule	102
IV.8.2.b. Fonctionnement simultané de plusieurs sondeurs	103
IV.9. Implantation à bord du véhicule	103
IV.9.1. Sondeur utilisé	103
IV.9.2. Implantation des trois sondes	104
IV.9.3. Dispositif de sélection des transducteurs.....	105
IV.10. Essais préalables.....	106
IV.10.1. Relevé de la bathymétrie de la zone d'expérimentation.....	106
IV.10.1.a. Dispositif.....	106
IV.10.1.b. Acquisition des données	107
IV.10.2. Réponse angulaire du sondeur	107
IV.10.3. Expérimentations de la tête acoustique	110
IV.11. Essai en milieu naturel en boucle ouverte	111
IV.11.1. Conditions de l'essai.....	111
IV.11.2. Résultats	112
IV.12. Essai en milieu naturel en boucle fermée.....	113
IV.12.1. Conditions de l'essai.....	113
IV.12.2. Résultats	113
IV.13. Conclusion des expérimentations	117
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>118</i>
<i>Lexique.....</i>	<i>124</i>
<i>Bibliographie.....</i>	<i>125</i>
<i>Annexe 1 : Commande de Taipan en cap et en immersion.....</i>	<i>130</i>
<i>Annexe 2 : Traitement des données bathymétriques.....</i>	<i>138</i>

Liste des figures

<i>Figure 1 - Le véhicule autonome sous-marin Taipan.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure 2 - Images acoustiques obtenues par sonar latéral.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure 3 - Reconstitution d'image large par la technique du mosaicing.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure 4 - Neptune.....</i>	<i>21</i>
<i>Figure 5 - The Twin-Burger.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure 6 - Oberon.....</i>	<i>24</i>
<i>Figure 7 - Méthode de navigation du véhicule Oberon</i>	<i>25</i>
<i>Figure 8 - un exemple de plus court chemin de Dubins</i>	<i>31</i>
<i>Figure 9 - Le véhicule autonome sous-marin sous-actionné Taipan.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 10 - Courbe L/R en fonction de l'angle de barre pour un sous-marin stable.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 11 - Une partie des forces exercées sur le véhicule.....</i>	<i>38</i>
<i>Figure 12 - Les forces créant un couple par rapport au centre de volume</i>	<i>39</i>
<i>Figure 13 - Convergence de l'état d'un système vers la surface de glissement.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 14 - Effet de f sur la commutation</i>	<i>49</i>
<i>Figure 15 - Essai de la commande de Taipan dans le plan vertical</i>	<i>51</i>
<i>Figure 16 - Franchissement d'un sommet.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 17 - Déplacement des points inaccessibles.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure 18 - Traitement d'un creux.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure 19 - Comparaison des splines cubiques et des polynômes de Hermite.....</i>	<i>60</i>
<i>Figure 20 - Zone d'ombre</i>	<i>62</i>
<i>Figure 21 - Faisceau ultrasonique.....</i>	<i>62</i>
<i>Figure 22 - Limites d'une zone d'ombre.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 23 - Orientations des deux transducteurs reliés au sondeur.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 24 - Dispositif d'émission d'ondes acoustiques.....</i>	<i>66</i>
<i>Figure 25 - Intensité acoustique en fonction de $\sin(q)$.....</i>	<i>67</i>

<i>Figure 26 - Erreur de localisation de l'obstacle.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 27 - Orientation des sondeurs</i>	<i>73</i>
<i>Figure 28 - Trajectoire maximale d'évitement.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 29 - Les trois zones de perception (A,B,C).....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 30 - Détection d'une falaise dans la "zone limite de.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 31 - Trois instants d'échantillonnage : $t, t+T, t+2T$.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 32 - La « zone dangereuse » (C)</i>	<i>77</i>
<i>Figure 33 - Calcul de l'angle a_{min}.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 34 - Courbe $a=f(NM, h_{min})$.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 35 - Courbe $h_{max}=g(NM, h_{min})$.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 36 - Aperçu du relevé bathymétrique de la zone côtière.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 37 - Traitement de deux sommets proches.....</i>	<i>88</i>
<i>Figure 38 - Problème de continuité de la dérivée dans le traitement d'un creux.....</i>	<i>89</i>
<i>Figure 39 - Traitement des creux avec sur-échantillonnage local du profil.....</i>	<i>89</i>
<i>Figure 40 - Génération de trajectoire sur profil de fond réel.....</i>	<i>90</i>
<i>Figure 41 - Ecart entre la trajectoire suivie et la trajectoire planifiée</i>	<i>91</i>
<i>Figure 42 - Angle de tangage du véhicule le long de sa trajectoire.....</i>	<i>91</i>
<i>Figure 43 - Simulation d'une navigation au-dessus de la source de La Vise</i>	<i>93</i>
<i>Figure 44 - Evolution de l'angle de tangage le long de la trajectoire précédente....</i>	<i>93</i>
<i>Figure 45 - Ecart entre la trajectoire suivie et la trajectoire idéale.....</i>	<i>94</i>
<i>Figure 46 - Evitement d'une falaise de hauteur comprise entre h_{min} et h_{max}.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure 47 - Ecart entre la trajectoire suivie et la trajectoire idéale.....</i>	<i>95</i>
<i>Figure 48 - Evolution de l'angle de tangage le long de la trajectoire précédente</i>	<i>96</i>
<i>Figure 49 - Détection et évitement d'une falaise de hauteur supérieure à h_{max}</i>	<i>97</i>
<i>Figure 50 - Agrandissement de la courbe précédente.....</i>	<i>97</i>
<i>Figure 51 - Sonde Interphase.....</i>	<i>100</i>

<i>Figure 52 - Balayage vertical obtenu par formation de voies (Logiciel PCView)..</i>	<i>100</i>
<i>Figure 53 - Balayage horizontal obtenu par formation de voies (Logiciel PCView)</i>	<i>101</i>
.....	
<i>Figure 54 - Autonomie de Taipan en fonction du type de capteur embarqué.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 55 - Tête acoustique de Taipan.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 56 – Nez du véhicule et implantation des deux premiers transducteurs</i>	<i>105</i>
<i>Figure 57 - Implantation électronique dans le véhicule Taipan</i>	<i>105</i>
<i>Figure 58 - Relevé bathymétrique de la source de La Vise.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 59 - Dispositif expérimental de mesure de la réponse angulaire du sondeur</i>	<i>108</i>
.....	
<i>Figure 60 – Inclinaison inférieure à $q_0/2$.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 61 – Inclinaison supérieure à $q_0/2$.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 62 - Test d'acquisition de distances avec inclinaison du transducteur</i>	<i>110</i>
<i>Figure 63 - Test de la tête instrumentée en milieu naturel (Source de La Vise).....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 64 - Parcours d'acquisition</i>	<i>111</i>
<i>Figure 65 - Acquisitions bathymétriques lors du premier essai (navigation en boucle ouverte).....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 66 - Acquisitions bathymétriques lors du deuxième essai (boucle fermée). .</i>	<i>114</i>
<i>Figure 67 - Trajectoire du véhicule dans le plan vertical (essai en boucle fermée)</i>	<i>114</i>
<i>Figure 68 - Trajectoire du véhicule et données bathymétriques perçues.....</i>	<i>115</i>
<i>Figure 69 - Acquisitions bathymétriques lors du deuxième essai en boucle fermée</i>	<i>116</i>
.....	
<i>Figure 70 - Dimensions, masses et distances des éléments constitutifs.....</i>	<i>133</i>
<i>Figure 71 - Essai de la commande en cap</i>	<i>137</i>
<i>Figure 72 - Erreur de localisation de l'obstacle.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 73 - Choix des angles.....</i>	<i>139</i>

Introduction Générale

L'investigation du milieu sous-marin est une préoccupation dans de nombreux domaines comme la recherche océanographique, les applications militaires et plus récemment l'offshore avec la volonté d'exploiter les ressources naturelles à plus de 1000 mètres de profondeur. L'automatisation de tâches d'inspection, de reconnaissance, de détection ou encore de mesure de paramètres physico-chimiques est fortement justifiée dans ce milieu immense. L'utilisation de véhicules télé-opérés est ancienne dans ces domaines et a été la première technique mise au point dans la mesure où l'homme intervient dans la chaîne de décision. Les problèmes à résoudre alors relevaient du domaine de la technologie des grands fonds ainsi que du transfert de l'énergie et des informations via un lien ombilical. Depuis la fin des années 80, de nombreux programmes de recherche ont émergé aux Etats-Unis, en Europe ainsi qu'en Asie, pour apporter une solution s'appuyant sur des véhicules autonomes. Le terme anglo-saxon «*Autonomous Underwater Vehicles* » ou *A.U.V.* s'est imposé pour les désigner.

Cette catégorie d'engins est confrontée à quatre grandes classes de problèmes scientifiques, à savoir : l'autonomie énergétique, la navigation couplée au problème de positionnement et l'autonomie décisionnelle. Notre travail se situe dans le cadre de la problématique de la navigation qui peut se décliner sous trois aspects essentiels : contrôle du véhicule, planification de trajectoires, évitement d'obstacles. Le premier thème a été largement traité en intégrant des techniques de commande robuste vis à vis des paramètres hydrodynamiques inconnus [FOS94]. Les deux autres thèmes font l'objet de nombreuses recherches et c'est dans ce cadre que s'inscrit notre travail de thèse.

Nous déclinons les problèmes de navigation sous un autre volet qui est celui de la navigation dépendant d'une tâche. De fait, il est possible de poser le problème de la navigation de façon générale sous l'aspect de la réalisation des contraintes liées à une tâche. Ici, il s'agit de la planification de trajectoire par rapport à une connaissance du fond sous-marin.

La notion de suivi de fond dépend du type de tâche à réaliser. Nous pouvons distinguer les tâches ne nécessitant qu'un survol du relief en restant à une altitude moyenne lissée par rapport aux variations du fond et celles qui nécessitent de suivre au plus près les variations du relief sous-marin. Dans la première catégorie de tâches, on trouve le survol pour la bathymétrie (mesure des profondeurs), la seconde catégorie intègre les tâches de suivi de pipeline ou de câble par exemple.

La définition du suivi de fond peut impliquer plusieurs contraintes. Ainsi, de même qu'en robotique classique, il peut s'agir de suivre une trajectoire qui recopie le profil de fond, de sorte que la distance entre ce dernier et le véhicule demeure constante. La réalisation de cette tâche peut ou non être assortie de contraintes sur l'inclinaison du véhicule. Le suivi de fond peut également consister à naviguer à profondeur et attitude fixes, la distance entre le véhicule et le fond variant alors au cours des déplacements. Le type de suivi adopté dépend de l'application envisagée. Ainsi, dans l'exemple de la prise d'images par sonar latéral, on privilégie la conservation d'une assiette du véhicule constante par rapport au fond (navigation dans un plan parallèle au fond) afin d'éviter les redondances d'information d'une part et les calculs laborieux de recalage des données d'autre part. Dans l'exemple du suivi de pipeline, suivant la précision désirée, il peut être nécessaire d'obtenir des distances de suivi relativement faibles. Ceci nécessite alors de suivre l'inclinaison du plan tangent associé au profil du fond.

Enfin il faut tenir compte d'un élément important qui concerne le risque pour le véhicule de se retrouver soit face à un aplomb soit face à un obstacle imprévu. Dans le cas d'un véhicule sur-actionné, il est possible de suivre une paroi verticale ou encore d'effectuer un surplace accompagné d'un changement d'orientation. Dans le cas de véhicules sous-actionnés non holonomes, les capacités de suivi de fond se trouvent de fait plus limitées [SAN95a].

Nos travaux s'inscrivent dans la problématique de recherche démarrée il y a six ans au *LIRMM* concernant la mise au point de petits véhicules sous-marins. De façon générale, la recherche concernant les véhicules autonomes se penche essentiellement sur la problématique des engins ayant des capacités de charge utile importante, pesant plusieurs centaines de kilogrammes à plusieurs tonnes. L'intérêt des petits engins de poids inférieur à 100kg, est qu'ils ne nécessitent que de faibles moyens logistiques et que leur utilisation est rendue possible dans les petits fonds (inférieurs à 20 mètres) [VAG98]. Cette approche particulière des véhicules autonomes introduit de fortes contraintes concernant les capacités d'emport et l'obligation d'optimiser la consommation d'énergie. Ces contraintes se traduisent par la nécessité d'optimiser à la fois le type de capteurs embarqués ainsi que les traitements informatiques des données.

Dans ce manuscrit, nous présentons une méthode de planification de trajectoires, permettant à un véhicule autonome sous-marin sous actionné de suivre le fond. Nous

commençons par une étude détaillée des applications nécessitant le suivi de fond et des contraintes qu'elles impliquent, puis nous présentons et comparons les principales techniques développées à ce jour en robotique sous-marine mais aussi terrestre (Chapitre I).

Nous étudions ensuite le véhicule considéré et son modèle dynamique, ce qui nous permet d'établir les deux contraintes physiques majeures associées aux déplacements. La commande du véhicule par mode glissant est également détaillée et clôt le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous proposons une méthode de planification de trajectoires de suivi de fond tenant compte des contraintes de manœuvrabilité du véhicule. Elle suppose la connaissance a priori de la bathymétrie¹ de l'environnement dans lequel ce dernier évolue. A partir de cette méthode, nous développons également une technique couplant la perception de l'environnement et la planification en ligne de trajectoires.

Lorsque le fond marin présente des variations brutales de la profondeur, telles que des falaises sous-marines, la sécurité du véhicule est menacée. En effet, si ce dernier n'est pas capable de détecter suffisamment à l'avance de tels obstacles, il ne saura les éviter à temps. Afin de résoudre cette catégorie de problèmes lors du suivi de fond, nous proposons une méthode de détection et d'évitement d'éventuels aplombs sous-marins.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre rassemble les résultats des simulations ainsi que les résultats expérimentaux obtenus lors d'essais réalisés en milieu naturel avec le robot autonome sous-marin *Taipan* (Figure 1).

¹ bathymétrie : mesure des profondeurs marines



Figure 1 - Le véhicule autonome sous-marin Taipan

Chapitre I : Suivi de fond

I.1. Introduction

Nous l'avons évoqué précédemment, le suivi de fond peut s'effectuer de deux façons. Soit il consiste à naviguer à altitude moyenne (dans le cas d'un fond accidenté), soit il consiste à suivre le profil du fond à attitude constante (par exemple parallèle au sol). Dans ce dernier cas, le suivi n'est rigoureusement possible que si l'ordre de grandeur des variations du relief est compatible avec les capacités de déplacement du véhicule (cf. chapitre II). Le choix du type de suivi dépend de l'application envisagée.

Dans ce chapitre, nous allons étudier quelques exemples d'applications du suivi de fond ainsi que les contraintes qui leur sont associées. Les exemples des acquisitions d'images acoustiques par sonar latéral ou d'images vidéo seront présentés, ainsi que le suivi d'une structure industrielle telle qu'un pipeline.

Nous analyserons ensuite diverses techniques de suivi de fond existantes. La plus courante est probablement l'approche référencée capteur associée à une commande non-linéaire ou exploitant le modèle linéarisé du véhicule.

Nous verrons ensuite comment, à partir des techniques de navigation et de construction de cartes utilisées en robotique terrestre, des méthodes ont été développées spécialement pour les véhicules sous-marins. Les ondes électromagnétiques ne se propageant pas dans la mer, la détection du fond ne peut se faire que grâce aux ondes acoustiques (sondeur ou sonar). La caractérisation des points remarquables du fond constitue dans certains cas un élément clé de la navigation près du fond. Nous verrons pourquoi, et nous verrons par quelles méthodes améliorer la connaissance du fond acquise grâce aux capteurs acoustiques. Nous évoquerons certains cas (Concurrent Mapping and Localization) où la détection des caractéristiques du fond sert aussi à positionner le véhicule.

La présentation d'une méthode utilisant le sonar frontal à balayage nous permettra de constater que le suivi de fond peut aussi prendre la forme d'algorithmes d'évitement d'obstacle.

Nous présenterons également plusieurs méthodes utilisées en robotique terrestre pour le suivi et la génération de trajectoires. Elles sont basées sur l'utilisation du modèle cinématique de véhicule à roues, sur des fonctions d'erreur, dites *fonctions de tâches*, ou encore exploitent les *chemins de Dubins* ou la notion de *Zone Virtuelle Déformable*.

I.2. Applications

I.2.1. Acquisitions d'images acoustiques ou vidéo

I.2.1.a. Sonar latéral

L'utilisation de véhicules autonomes sous-marins pour l'acquisition d'images acoustiques par sonar latéral (Lexique) présente de nombreux avantages. En effet, à l'instar des « poissons » instrumentés tractés par des navires de surfaces, les A.U.V. immergés suffisamment profond présentent l'avantage de n'être pas ou peu sujets aux perturbations acoustiques et dynamiques de surface telles que les vagues, les rafales de vent ou les bruits de moteurs. L'acquisition d'images peut dès lors se faire de façon stable quelles que soient les conditions météorologiques (sous réserve d'une profondeur d'immersion suffisante), avec une qualité constante. Dans le cas du sonar latéral, il est fondamental que le véhicule conserve une assiette constante et qu'il ne « roule » pas (lexique). Il s'agit donc de suivre le fond ou de le survoler à une altitude égale à 10% de la demie fauchée du faisceau sonar, en conservant une attitude constante. En effet, les images obtenues dans de mauvaises conditions de déplacement seraient déformées. La navigation à attitude fixe évite de nombreux recalages logiciels des images, voire des pertes d'informations et de résolution. Sur la Figure 2, on observe à gauche une image de sonar latéral obtenue lors de déplacements perturbés. On constate plusieurs déformations symétriques de l'image (flèches blanches) qui n'apparaissent pas dans l'image de droite obtenue, elle, lors d'une navigation stable.

De plus, l'utilisation d'A.U.V. suivant le fond permet de naviguer très près de ce dernier, ce qui assure une incidence rasante des signaux émis et donc l'acquisition d'images plus intéressantes.[LUR98]

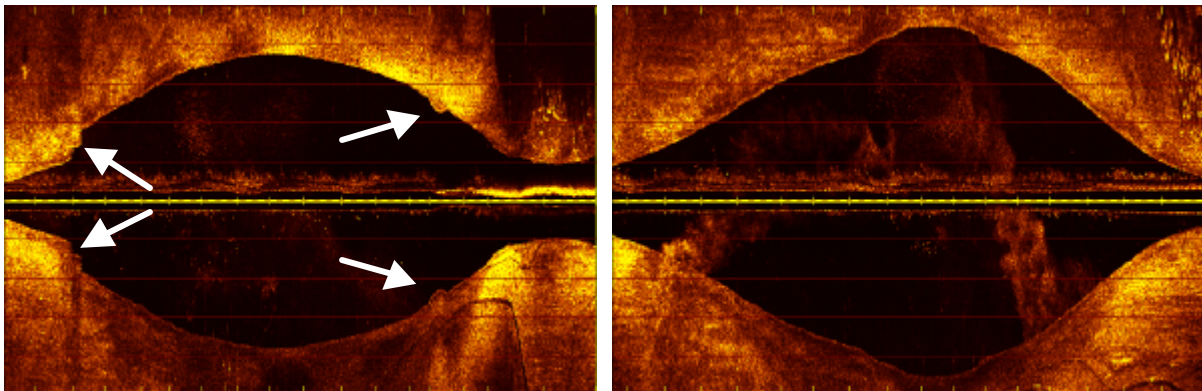


Figure 2 - Images acoustiques obtenues par sonar latéral

I.2.1.b. Acquisition vidéo

Outre les raisons présentées pour l'acquisition d'images acoustiques par sonar latéral, l'acquisition d'image vidéo par A.U.V. se justifie également par la nécessité de naviguer très près du fond. En effet, la turbidité de l'eau, l'absorption des couleurs et les contraintes d'éclairages limitent la portée des caméras à quelques mètres. Ainsi, les images vidéo de grande taille ne peuvent être obtenues que par la technique du « mosaicing » qui consiste à juxtaposer plusieurs images contiguës issues par exemple d'une séquence vidéo (Figure 3). Pour cela, le véhicule porteur du dispositif de prises de vues doit survoler la zone à photographier en effectuant un balayage de manière à en couvrir toute la surface. Selon le type d'images désirées, le suivi de fond peut se faire à assiette constante ou bien à attitude constante par rapport au fond. Cette dernière technique est nécessaire si l'on souhaite par exemple extraire de l'image les dimensions des objets visualisés. Dans ce cas, la prise d'images s'accompagne également d'un relevé d'informations télémétriques obtenues par des méthodes acoustiques ou optiques (repérage sur l'image de deux impacts de faisceaux lasers parallèles, ou télémétrie laser directe).

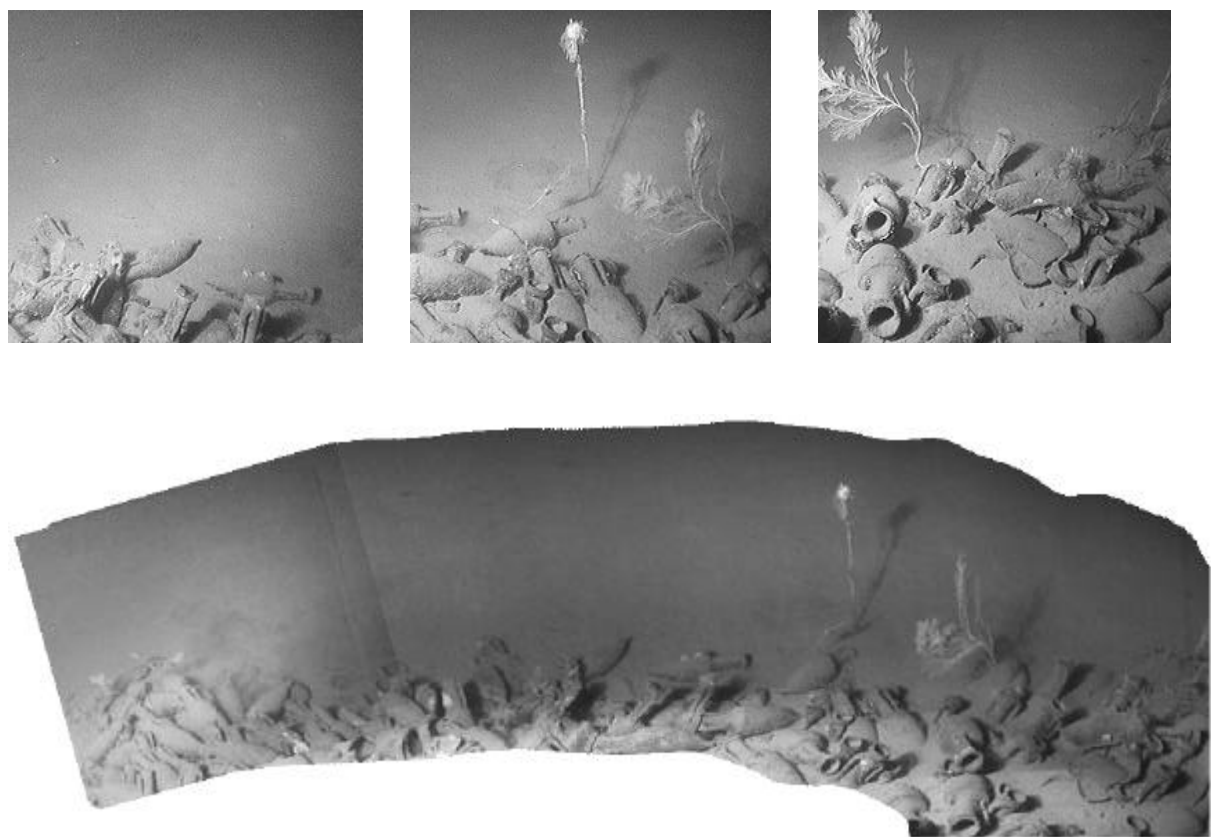


Figure 3 - Reconstitution d'image large par la technique du mosaicing

I.2.2. Suivi de structures industrielles

L'industrie d'exploitation off-shore du pétrole a très fréquemment recours aux véhicules sous-marins télé-opérés ou autonomes pour assurer la surveillance des installations d'extractions (plate-formes) et d'acheminement du pétrole (pipeline). Dans le cas des plate-formes, il peut s'agir par exemple de vérifier l'état des dispositifs d'ancrage ou de forage. Les véhicules holonomes télé-opérés de type R.O.V. (Remotely Operated Vehicles) sont les mieux adaptés à ce type de tâches. Ils sont en outre souvent équipés de bras manipulateurs qui leur permettent d'intervenir lorsqu'une anomalie est détectée. Dans le cas des pipelines, à l'inverse, ce sont les AUV qui se prêtent le mieux aux missions de surveillance. Il s'agit d'abord de détecter le pipeline, puis de le suivre sur une partie de sa longueur afin d'enregistrer des images sonar ou vidéo. Ces images sont ensuite récupérées et analysées hors-ligne lors du retour du véhicule à sa base. Elles servent par exemple à contrôler l'aspect extérieur du pipeline ou encore la répartition des sédiments (sable, vase) sous ce dernier. En effet, si le courant emporte les sédiments sur lesquels repose le pipeline, celui-ci peut se trouver localement en porte-à-faux et risquer de se briser sous son propre poids.

I.2.3. Evitement d'obstacles

Lorsqu'un véhicule sous-marin effectue un suivi de fond, il acquiert nécessairement de nombreuses informations environnementales. Ces dernières sont souvent simultanément utilisées pour assurer l'évitement d'obstacles. Par ailleurs, le fond marin présente parfois des discontinuités telles qu'il ne doit alors plus être suivi mais évité. C'est le cas des falaises sous-marines ou aplombs. Les notions de suivi de fond et d'évitement d'obstacle sont donc complémentaires et indissociables. Parfois même, nous le verrons dans le paragraphe I.3.4, le suivi de fond et l'évitement d'obstacle ne forment qu'une seule et même tâche.

I.3. Méthodes existantes

I.3.1. Suivi de profil de fond référencé capteur

Aristide Simon Santos a traité [SAN95a] [SAN95b] la commande référencée capteur des véhicules holonomes de type R.O.V. (Remotely Operated Vehicle) et des véhicules non-holonomes de type AUV (Autonomous Underwater Vehicle) pourvus d'un unique propulseur arrière, d'un gouvernail et de deux paires de barres de plongée horizontales situées à l'arrière et à l'avant. Cette catégorie de véhicules est aussi appelée : type « plan canard ».

Santos a montré que commander un tel véhicule dans le plan vertical équivalait à le commander en vitesse de tangage. La variable de pseudo-commande choisie est donc $q = \dot{\mathbf{q}}$. Dès lors, deux lois de commande ont été étudiées : l'une synthétisant la loi de commande par une *méthode linéaire quadratique (LQ)* et l'autre à partir d'une *fonction de Lyapunov*. Ces deux approches ne sont valables que pour un profil de fond continu. Le cas où des discontinuités apparaîtraient est traité à part au moyen d'un transducteur ultrasonique supplémentaire.

Le problème consiste à asservir l'A.U.V. en altitude et en inclinaison par rapport au fond. Pour accomplir cette tâche, le véhicule est équipé de deux capteurs d'altitude élémentaires (de type sondeur) orientés verticalement vers le bas et placés à l'avant et à l'arrière du véhicule.

I.3.1.a. Méthode linéaire quadratique

La méthode linéaire quadratique (LQ) repose sur une synthèse LQ calculée à partir du linéarisé tangent du modèle définissant l'interaction AUV/environnement. On détermine cette interaction grâce aux informations délivrées par les deux transducteurs ultrasoniques (sondeurs). Le vecteur d'état Z utilisé pour décrire le système dépend donc uniquement de l'altitude de l'avant et de l'arrière du véhicule. En dérivant par rapport au temps le vecteur d'état, on fait apparaître non seulement Z mais aussi $\dot{\mathbf{q}}$ la vitesse de tangage. On linéarise le système obtenu autour du point Z_0 pour lequel le véhicule navigue parallèlement au fond et à l'altitude désirée. On obtient une relation matricielle du type :

$$\dot{Z} = AZ + B\dot{\mathbf{q}} \quad (\text{Eq 1})$$

D'après [AIT93], une commande LQ qui stabilise le véhicule peut être obtenue en minimisant un critère de la forme :

$$I = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (u^2 Z^T \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & I_0^2 \end{bmatrix} Z + I_1^2 \dot{\mathbf{q}}^2) dt \quad (\text{Eq 2})$$

où $u > 0$ est la vitesse axiale du véhicule et où I_0 et I_1 sont des réels positifs.

Après résolution de l'équation de Riccati, on obtient la valeur de $\dot{\mathbf{q}}$ qui doit être appliquée, sous la forme : $\dot{\mathbf{q}} = -\mathbf{a}[\mathbf{b} \quad 1]Z$.

I.3.1.b. Fonction de Lyapunov

Le problème de suivi de fond référencé capteur peut aussi être résolu en choisissant une fonction de Lyapunov adaptée. On en déduit alors une commande non-linéaire en vitesse de tangage assurant la convergence asymptotique de l'angle de tangage vers la valeur de consigne. Par rapport à la précédente (linéaire quadratique), cette méthode présente l'avantage de permettre d'ajouter une contrainte supplémentaire sur l'orientation relative du véhicule en phase transitoire de convergence, lorsque le véhicule est loin de la trajectoire désirée. Cette méthode a été validée en simulation sur sol régulier.

I.3.2. Perception de l'environnement, création de cartes

I.3.2.a. Une méthode utilisée en robotique terrestre...

Antonio Elfes (Carnegie-Mellon University) a présenté [ELF86] une méthode utilisant 24 transducteurs ultrasoniques montés en couronne. Ce système nommé *Dolphin* permet à la fois la cartographie et la navigation d'un robot terrestre sans aucune information préalable sur l'environnement. Il s'agit pour le véhicule de se déplacer sans collision et de se repérer dans son environnement. La méthode, testée avec succès sur le robot *Neptune* (Figure 4), exploite les données des capteurs affectées de probabilités afin d'établir plusieurs types de cartes.

Elfes pose le problème en définissant trois axes de représentation :

- ✓ l'axe d'abstraction qui rassemble lui-même trois sous-types de cartes : représentation des données recueillies par les capteurs, interprétation géométrique de ces dernières puis interprétation symbolique globale et définition de zones d'intérêt.
- ✓ l'axe géographique qui associe une carte globale de l'environnement à une multitude de cartes locales plus précises.
- ✓ l'axe de résolution qui stocke, à plusieurs niveaux de résolution, chacune des cartes locales définies par les capteurs. Les différents niveaux de résolution sont exploités pour effectuer de manière optimale les différents calculs.

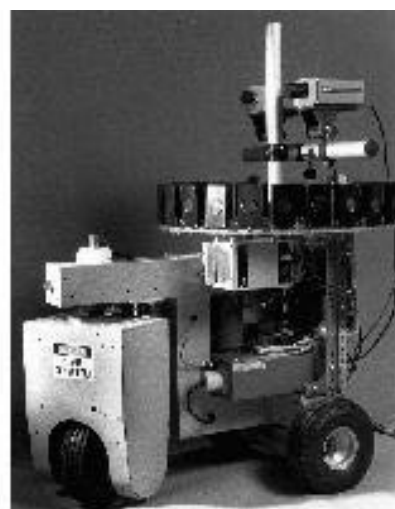


Figure 4 - Neptune

Cette approche à plusieurs niveaux de résolution permettait aux calculateurs de l'époque d'accomplir, en temps réel, les calculs assurant la sécurité des déplacements du véhicule. Les importants calculs relatifs à «l'axe d'abstraction» étaient, quant à eux, effectués à part et réservés au positionnement précis du robot. Cette méthode aboutissait à un système complexe mais efficace au vu des résultats obtenus.

L'augmentation considérable de la capacité et de la vitesse de calculs des calculateurs actuels la rend partiellement désuète, cependant elle a inspiré de nombreuses équipes de recherche dans la conception des systèmes de navigations des véhicules sous-marins.

I.3.2.b. ...et son adaptation au milieu sous-marin

En 1996, Koji Aramaki et de Tamaki Ura de l'Université de Tokyo (Institute of Industrial Science) [ARA94] ont repris et amélioré la méthode d'Elfes (§I.3.2.a). Ils ont gardé de ce travail la technique de pondération des données de la carte par des probabilités. En outre, ils ont défini trois types de profondeurs pour l'établissement de la carte locale. Il s'agit de la profondeur réelle (*Ztrue*), de la profondeur estimée affectée d'un coefficient de fiabilité statistique (*Zconjectured*) et enfin de la profondeur de sécurité (*Zsafety*) qui garantit la préservation de l'A.U.V. en toutes circonstances.

Les données recueillies et traitées sont stockées dans une carte locale matricielle. La planification de la tâche d'acquisition des informations se fait en deux étapes :

- ✓ Le robot sous-marin (A.U.V., R.O.V., ou autre) survole d'abord la zone à explorer à très faible profondeur, de manière à recueillir des informations grossières sur la bathymétrie des lieux sans prendre le risque de heurter le fond.

- ✓ Le robot détermine ensuite un trajet pour couvrir toutes les parcelles de la zone explorée, en commençant par les plus méconnues et en s'approchant davantage du fond.

Durant tout son parcours, le robot effectue de plus un évitement d'obstacle basé sur les données de la bathymétrie enregistrée. L'acquisition de carte par cette méthode a été testée en piscine (2 mètres de profondeur) en utilisant l'A.U.V. «*The Twin-Burger*» (Figure 5) doté de 16 capteurs ultrasoniques.

La méthode d'élaboration de carte s'est révélée efficace lors de ces tests. La planification de la tâche d'acquisition n'a été testée qu'en simulation. Les résultats obtenus sont meilleurs que ceux que donnerait, par exemple, un balayage de la zone par quadrillage. Ceci est dû aux zones d'ombre acoustique qui apparaissent naturellement (à cause du relief sous-marin) lorsque le parcours est aléatoirement choisi. La planification compense cela en explorant plus précisément les zones dans lesquelles les profondeurs de type *Zconjectured* sont insuffisamment connues (c'est le cas des zones d'ombre).



Figure 5 - The Twin-Burger

On le voit, il s'agit ici essentiellement de cartographier le fond marin, tâche préalable nécessaire à tout suivi de fond. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle nécessite plusieurs passages avant d'être efficace. En orientant les capteurs de distance au cours du déplacement, on améliore considérablement l'efficacité du dispositif. C'est ce qui est décrit à présent.

I.3.2.c. positionnement par observation active du fond

Une équipe de Sydney a présenté une méthode originale pour traiter le problème de la navigation associée à la perception du fond [NEW98]. A bord de l'A.U.V « *Oberon* » (Figure 6) se trouvent entre autres une centrale inertielle triaxiale et un sonar. Ce dernier est motorisé afin de pouvoir braquer son faisceau dans n'importe quelle direction pour observer et suivre des points d'intérêts, appelés également « *focus of attention* ».



Figure 6 - Oberon

Chacun de ces points d'intérêt est affecté d'un coefficient de séparation $s \in [0;1]$ dépendant de la capacité de l'objet à «sortir du lot». Ce coefficient est calculé en utilisant le taux de première réflexion des ondes acoustiques sur l'objet ainsi que le taux de réflexion obtenu après une légère rotation du sonar. Les motifs du fond qui présentent un coefficient s supérieur à un certain seuil servent à établir une carte. Si cette dernière devient trop dense, on peut rehausser le seuil de sélection de s et ainsi diminuer le nombre de points retenus.

Les auteurs, P. Newman et H. Durrant-Whyte considèrent que, pour se positionner, il n'y a aucun intérêt à posséder une carte précise et complète. Le fait de suivre quelques bonnes « cibles » permet en effet d'utiliser une carte plus facilement gérable et suffit pour le recalage du véhicule dans son environnement. Dès lors, la carte obtenue est utilisée pour la navigation de l'A.U.V.

On procède ensuite à la fusion des informations provenant du sonar avec celles provenant de la centrale inertielle. Les images sonar sont corrélées avec la carte précédemment construite et l'on obtient la position absolue du robot par rapport au fond. Cette position sert non seulement à recalculer la position estimée par la centrale inertielle, mais aussi à ajuster les paramètres d'un filtre de Kalman qui a pour but de corriger les dérives de cette centrale. Le schéma de principe du système est le suivant (Figure 7) :

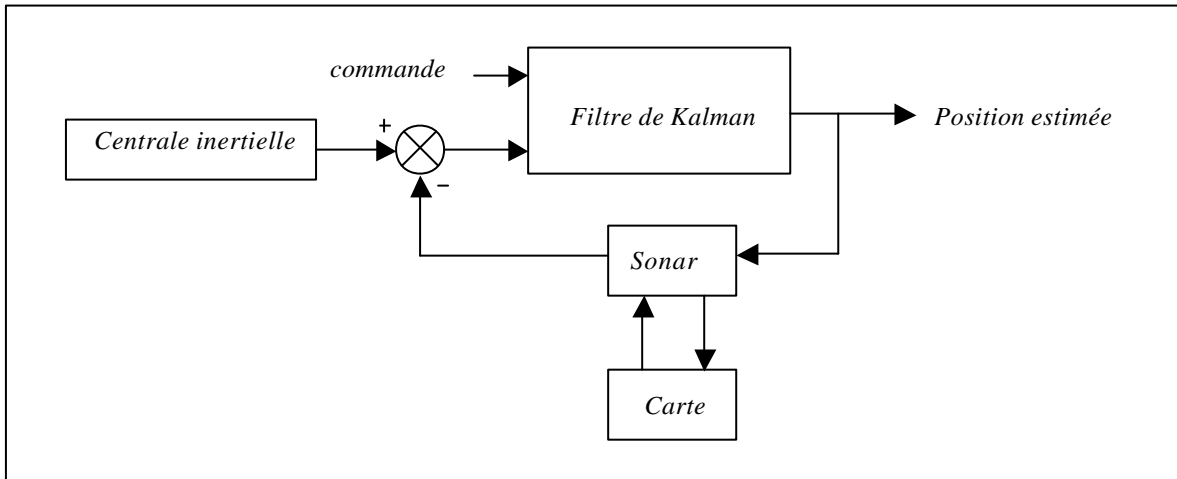


Figure 7 - Méthode de navigation du véhicule Oberon

I.3.3. Navigation référencée terrain

Plusieurs méthodes dérivées de la précédente ont été développées par d'autres équipes de recherche. Dans la plupart des cas, il ne s'agit pas comme ici d'orienter le capteur sonar, mais plutôt de faire décrire des trajectoires au robot qui permettent par plusieurs passages d'observer les points d'intérêts sous des angles différents afin de mieux les caractériser. John Leonard a baptisé C.M.L. (Concurrent Mapping and Localization) cette technique [LEO00]. Il s'agit pour l'A.U.V. de construire une carte et de l'utiliser en temps réel pour la navigation.

Dans ce domaine, Smith, Self et Cheeseman ont développé l'approche dite par carte stochastique [SMI97]. Un vecteur représentant à la fois la position du véhicule et des points remarquables (features) est associé à une matrice de covariance. Lorsque le véhicule repasse sur un lieu déjà visité, la carte stochastique est mise à jour au moyen d'un filtre de Kalman étendu. Les cartes ainsi créées permettent un positionnement précis basé sur l'utilisation d'amers (ou point remarquables). Les données mémorisées se limitant à ces foyers d'attention, l'environnement n'est que partiellement connu. Ainsi, même si elles permettent un positionnement précis qui peut être utile au suivi de fond, ces méthodes ne permettent pas la planification des trajectoires.

I.3.4. Evitement d'obstacles par sonar

Y. Petillot et J.Teña-Ruiz proposent un système complet permettant la planification de trajet en vue de l'évitement d'obstacle pour R.O.V. (Remotely Operated Vehicle) [PET98]. Il a été conçu pour le système ARAMIS (Advanced ROV Package for Automatic Mobile Investigation of Sediments) qui doit équiper deux R.O.V. : Victor 6000 (IFREMER, France) et ROMEO (CNR-IAN, Italie). Ces deux véhicules naviguent près du fond (2mètres) dans la zone 50 à 6000mètres de profondeur. La vitesse de déplacement de ces robots est de 1 nœud.

Le système est constitué de 6 modules interdépendants :

- ✓ Segmentation: Les images obtenues par le sonar frontal (Lexique) sont bruitées. Elles sont filtrées par un filtre moyenneur. Le seuillage est adaptatif, basé sur un histogramme de l'image dépendant du signal actuel. Le principe consiste à estimer la fonction de densité de probabilité du bruit et à en déduire un taux de fausse alerte qui sert ensuite à fixer une valeur de seuillage. Une fois seuillées, les images sont segmentées. On s'oriente vers une description de l'espace orientée «objet».

- ✓ Extraction des caractéristiques (features): Dans l'image segmentée, on identifie les obstacles visibles ainsi que leurs caractéristiques (position, moments, aires...). Les obstacles de l'image sont labellisés et les caractéristiques de chacun sont extraites.

- ✓ Suivi (tracking): Cette étape fournit un modèle dynamique des obstacles. On commence le suivi des obstacles par une phase dite d'association de données, qui consiste à utiliser les paramètres de suivi obtenus lors des images précédentes. Les obstacles observés sont ensuite associés à leurs positions prédites. Lorsque l'obstacle se trouve à la position prédite, on calcule un nouveau vecteur d'état par filtrage de Kalman à partir des données observées. Le vecteur d'état rassemble les positions des obstacles ainsi que leurs caractéristiques. Si aucun obstacle ne se trouve à une position prédite, on estime la prochaine position de l'obstacle avec le filtre de Kalman non mis à jour. Si plusieurs trames se répètent ainsi sans retrouver cet obstacle, ce dernier est éliminé de la carte.

- ✓ Modélisation dynamique du ROV: Le modèle dynamique est pris en compte pour estimer les déplacements du véhicule entre deux images sonar.

- ✓ Représentation de l'espace de travail (Workspace): On construit un espace de travail intra-trame (intra-frame) à partir des données obtenues lors des précédentes étapes. En comparant l'espace de travail actuel avec les exemples donnés par les espaces de travail précédents, un nouvel espace de travail dynamique est construit et remis à jour en permanence.

- ✓ Planification de chemin (path planning): L'algorithme de planification de trajet doit être de type réactif et donc ne pas nécessiter une description complète de l'environnement entre le robot et le but dans la mesure où la résolution et la rapidité des capteurs sont limitées, où l'environnement peut changer et où la précision des mesures dépend fortement de la distance de l'obstacle. On parle de planification locale par opposition à une planification globale. Les espaces libres sont représentés par des inégalités qui sont les contraintes d'un problème d'optimisation non-linéaire. La position du véhicule sert à initialiser l'algorithme de résolution du problème. Les inégalités décrivant l'espace libre sont obtenues avec la CSG, la Géométrie Solide Constructive, dont les primitives sont les sphères, les cylindres et autres demi-espaces. Ces entités servent ici de briques de base pour décrire les autres objets. En CSG, chaque objet se résume donc à l'intersection ou la réunion de plusieurs cercles ou ellipses. L'application mathématique de ces unions ou intersections se fait en réalité par une approximation mathématique simple décrite dans [PET98]. Ici, les obstacles sont représentés par des ellipses, mais d'autres représentations sont possibles (ex : polygonale). La planification de trajet consiste à minimiser la distance euclidienne entre le robot et le but tout en ne pénétrant pas dans les ellipses décrivant les obstacles. La résolution de ce problème d'optimisation donne des trajectoires lissées facilement applicables au R.O.V.

Cette méthode n'a pas donné lieu à des expérimentations en milieu naturel, mais des tests des modules sur des séquences sonar réelles au milieu desquelles passe un plongeur dans l'axe du but ont été menés. Le système donne satisfaction, y compris sur des séquences très bruitées. Il présente la particularité de fournir des trajets lissés et de fonctionner dans un environnement changeant.

I.3.5. Génération et suivi de trajectoires en robotique terrestre

La recherche sur la génération de trajectoires a, jusqu'au début des années 80, concerné essentiellement les robots manipulateurs (bras articulés). A partir de cette date, la notion de génération de trajectoires pour véhicules a émergé et de nombreuses études ont permis de mieux situer le problème. L'ouvrage de P. Coiffet [COI92] pose clairement le problème de la génération de trajectoires pour les véhicules à roues. D'autres domaines sont explorés, tels que la planification pour robots à pattes, dont Sylvain Lazard [LAZ96] établit un état de l'art très complet, présentant les concepts mathématiques nécessaires à la génération de trajectoires en fonction du modèle du véhicule.

I.3.5.a. Génération de trajectoires pour véhicules à roues

La difficulté de planification de trajectoires pour les robots terrestres sujets à des contraintes cinématiques (tels que les véhicules à roues) s'expliquent par le fait que pour une position donnée, il n'est pas possible a priori de se mouvoir directement en tout point (non holonomie). Ainsi une voiture ne peut se déplacer transversalement à sa direction. Précisément, on dit qu'un véhicule est non holonome lorsque son mouvement est soumis à des contraintes s'exprimant par des relations non intégrables entre les composantes du vecteur d'état et ses dérivées [LAT91].

C'est le cas pour les véhicules à roues de type voiture ou bicyclette où le modèle cinématique s'exprime classiquement de la façon suivante [COI92] :

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos q \\ \dot{y} = v \sin q \\ \dot{q} = -\frac{v \tan d}{L} \end{cases} \quad (\text{Eq 3})$$

où x et y sont les coordonnées du centre de l'essieu avant du véhicule (supposé non orientable), q est l'angle que fait l'axe du véhicule avec l'axe des abscisses, d est l'angle d'orientation de la roue arrière orientable par rapport à l'axe du véhicule et L est la distance qui sépare cette roue de l'essieu avant.

Le suivi de trajectoires planifiées en tenant compte de ces contraintes a été largement étudié en utilisant différentes techniques de commande et de positionnement en fonction du domaine d'application.

Lorsque le système d'équations différentielles exprimant les contraintes cinématiques peut être transformé en « *forme chaînée* », on peut choisir des commandes sinusoïdales simples permettant de produire des mouvements qui modifient une composante d'état sans changer les autres [MUR90][SAM95]. Des contraintes spécifiques liées à l'application ont conduit à développer d'autres types de commandes dérivées de cette première.

Par exemple, dans le domaine agricole, l'imperfection de l'interaction machine-sol (glissement, enfoncement) peut perturber la vitesse de déplacement des machines et il est nécessaire d'établir à partir du modèle cinématique des lois de commande indépendantes de la vitesse afin d'assurer un suivi correct de la trajectoire planifiée [COR99a][COR99b].

Dans le domaine de la génération de trajectoires, la prise en compte de critères d'optimisations tels que le temps ou la consommation énergétique a donné lieu à de nombreuses recherches. On parle alors de « trajectoires optimales », ces recherches concernent des véhicules moins généraux que ceux considérés jusqu'à présent.

Nous venons de voir que la non holonomie des véhicules à roues impliquait l'impossibilité a priori de se mouvoir directement en tout point du voisinage. Il en va de même pour certains véhicules marins ou sous-marins (mono-propulsés) ou pour la plupart des robots à pattes mais pour des raisons différentes (ex : positionnement des pattes et équilibre) [LAZ96] et bien qu'ils ne soient pas pourvus de modèle cinématique. La génération de trajectoires pour cette deuxième catégorie d'engins est donc différente.

I.3.5.b. Fonction de tâche et suivi de fond référencé capteur

Si en robotique, la vidéo est fréquemment utilisée pour le contrôle des robots manipulateurs, son usage s'étend désormais également au guidage des véhicules. C'est le cas notamment des véhicules agricoles pour lesquels P. Martinet et C. Debain [MAR97a] ont développé une méthode de guidage par vision monoculaire basée sur la régulation à zéro d'une fonction d'erreur, encore appelée *fonction de tâche*, notion introduite par Samson et Espiau [SAM91] [ESP92]. L'établissement de la loi de commande suppose également la modélisation cinématique du véhicule considéré, ce qui est accompli en remplaçant le véhicule par un modèle dit « bicyclette » comparable à celui évoqué précédemment [MAR97b].

De manière plus générale, la *fonction de tâche* peut être déclinée à d'autres types de capteurs. On pourrait, par exemple, imaginer l'appliquer à des images obtenues par sonar frontal à balayage dans le cadre d'un suivi de pipeline dans le plan horizontal. Cependant, cette méthode ne semble pas se prêter au suivi de fond dans le plan vertical dans la mesure où les dépassements de trajectoire ne sont autorisés que s'ils se font vers la surface. L'application d'une telle méthode suppose en effet que le profil de fond soit compatible avec les capacités du véhicule. De la même manière, il serait risqué de faire suivre à une voiture une route de montagne dont les sinuosités auraient un rayon de courbure inférieur au rayon de braquage du véhicule.

Une autre approche intéressante du guidage des véhicules, basée sur les données de capteurs extéroceptifs, exploite le concept de Zone Virtuelle Déformable (Z.V.D.) introduite par R. Zapata. Son application aux véhicules sous-marins a d'ailleurs été étudiée [ZAP96] et simulée. Cette méthode se prête parfaitement au problème du suivi de fond pour des véhicules holonomes tels que les R.O.V. ou en cas de profil de fond régulier (au regard de la manœuvrabilité du véhicule). En revanche, elle ne permet pas tout type de suivi de fond pour des véhicules de type « torpille » car elle ne tient pas compte de leurs contraintes de manœuvrabilité. Pour cela, il conviendrait peut-être d'utiliser une Z.V.D. à géométrie variable, dont les variations seraient contraintes par la posture du véhicule et la trajectoire maximale de réaction du véhicule.

I.3.5.c. Positionnement du véhicule lors du suivi de trajectoire :

Le suivi d'une trajectoire en robotique terrestre implique le positionnement du véhicule. Il peut se faire par capteur proprioceptifs (on parle d'odométrie), avec le risque d'intégrer les erreurs de chaque capteur. Il peut également être purement extéroceptif [STR99], en utilisant par exemple des balises ou le système GPS, pour lequel certains récepteurs différentiels, exploitant la mesure de la phase du signal, permettent d'obtenir un positionnement absolu avec une précision centimétrique [COR99a]. Enfin, le positionnement nécessaire au suivi de trajectoire peut être mixte, c'est-à-dire basé sur l'utilisation de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs (exemple : Gyroscopes à fibre optique et GPS) [NAG97] [BOR01].

Dans le domaine sous-marin, le positionnement extéroceptif est largement pénalisé par l'hétérogénéité du milieu et les incertitudes de mesure qui en découlent (vitesse de propagation du son). Il n'est donc possible précisément qu'à petite échelle ou en exploitant des capteurs proprioceptifs de grande qualité (centrales inertielles à faible dérive temporelle).

I.3.5.d. Chemins de Dubins pour véhicules non holonomes

Dubins a prouvé que, pour certains véhicules non holonomes vérifiant le modèle cinématique évoqué précédemment, en l'absence d'obstacles, le plus court chemin entre deux configurations est une courbe obtenue par concaténation de segments de droite et d'arcs de cercle [DUB57]. Cette courbe est appelée *chemin de Dubins* et il peut exister jusqu'à 6 chemins différents pour parvenir d'une configuration du robot à une autre.

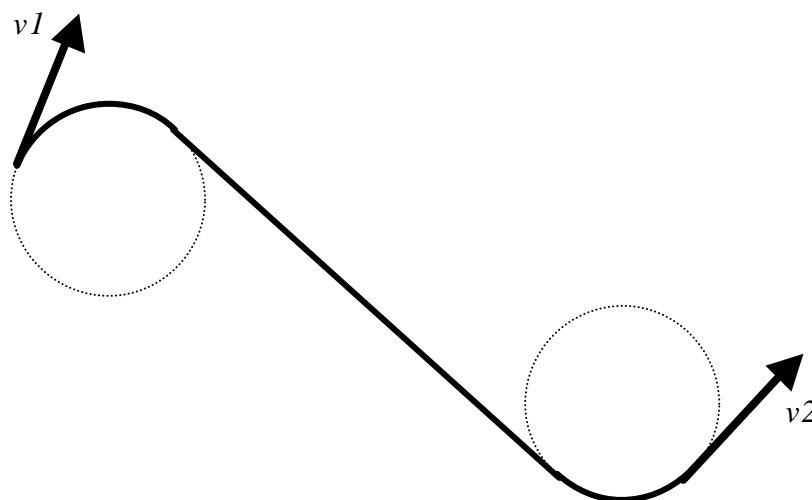


Figure 8 - un exemple de plus court chemin de Dubins

Reeds et Shepp ont développé une méthode similaire à celle de Dubins, mais en ajoutant la possibilité pour le véhicule de rebrousser chemin [REE90]. Dès lors on obtient des trajectoires de type « créneaux ». Ces chemins sont constitués d'au plus cinq éléments (arcs de cercle ou segments de droite). Ces résultats concernent essentiellement les déplacements de type « manœuvre » et ne sont pas directement applicables à notre problématique.

Les méthodes de construction de courbes de Dubins ou de Reeds ne n'impliquent pas la continuité du rayon de courbure. Dans le cas où l'on souhaite assurer également cette continuité, les trajectoires planifiées sont formées d'un assemblage de segments de droite et

de courbes appelées clothoïdes (courbes dont la dérivées de la courbure est constante et non nulle en tout point).

I.4. Conclusion

Selon l'application envisagée, nous avons vu que le suivi de fond peut prendre plusieurs formes. Les méthodes référencées capteurs sont efficaces mais elles se résument à un problème d'asservissement, sans anticipation des manœuvres d'évitement. Les méthodes plus complexes basées sur la fabrication de cartes ne traitent que rarement de la génération d'une trajectoire de suivi de fond à partir des informations contenues dans la carte. En effet, elles sont souvent destinées aux véhicules sous-marins sur-actionnés holonomes, pour lesquels le suivi strict du profil de fond est toujours possible. Dans ce cas, la génération de leur trajectoire ne pose pas de problème et se résume à la recopie décalée du fond marin.

Dans le cas des méthodes exploitant la détection d'obstacles pour définir des trajectoires de suivi de fond, les contraintes dynamiques prises en compte sont également celles, peu contraignantes, des véhicules holonomes.

Plusieurs méthodes de suivi utilisées en robotique terrestre ont également été présentées. La plupart tiennent compte des contraintes cinématiques des véhicules concernés pour accomplir leur guidage. Cependant, l'absence de contraintes cinématiques pour les véhicules non holonomes sous-marins (conditions de glissement et de dérapage non respectées) ne nous permettent pas d'exploiter directement les méthodes présentées.

Il serait donc intéressant, avant d'établir une méthode de planification de trajectoires, d'identifier les contraintes physiques des véhicules sous-marins non-holonomes (de type « torpille-civile ») afin de définir les classes de trajectoires réalisables par de tels engins. Ceci fait l'objet du début du deuxième chapitre.

Chapitre II : Modélisation et commande du véhicule

II.1. Introduction

Afin de pouvoir construire une trajectoire compatible avec les capacités de déplacement d'un véhicule non-holonyme de type « torpille civile », il nous faut identifier les contraintes physiques de cette catégorie d'AUV. Dans ce chapitre, nous nous proposons de les déterminer à partir du modèle dynamique du véhicule et à partir des relations hydrodynamiques et hydrostatiques qui régissent le déplacement et la stabilité de ce dernier dans le plan vertical.

En outre, ce chapitre présente la commande *en mode glissant* utilisée pour piloter le véhicule autonome sous-marin *Taipan* dans le plan vertical. Un modèle dynamique approché du véhicule est présenté et sert de support à la mise en place de la loi de commande.

II.2. Modélisation du véhicule sous-marin

II.2.1. Modèle dynamique

Les véhicules sous-marins sont des systèmes non-linéaires. Leur dynamique peut être modélisée par l'équation [AUC81][FOS94].

$$M_h(\mathbf{h})\dot{\mathbf{h}} + C_h(\mathbf{n}, \mathbf{h})\dot{\mathbf{h}} + D_h(\mathbf{n}, \mathbf{h})\dot{\mathbf{h}} + g_h(\mathbf{h}) = \mathbf{t}_h \quad (\text{Eq 4})$$

où $\mathbf{h} = [x, y, z, \mathbf{f}, \mathbf{q}, \mathbf{y}]^T$ est le vecteur d'état, représentant la position et l'orientation du véhicule dans le repère terrestre fixe, $\mathbf{n} = [u, v, w, p, q, r]^T$ est le vecteur qui rassemble les vitesses linéaires et angulaires dans le repère lié au véhicule et \mathbf{t}_h est le vecteur des forces et des moments appliqués au véhicule. Nous supposons que les vitesses linéaires et angulaires sont faibles et qu'aucun phénomène non hydrodynamique ne se produit.

II.2.2. Espace de travail

La symétrie de forme d'un sous-marin par rapport à son plan vertical implique que les évolutions dans le plan vertical ne puissent induire aucune force hydrodynamique dans le plan horizontal, ni aucun couple autour de l'axe longitudinal. Une variation de l'angle d'assiette n'entraîne donc aucune variation de l'angle de cap ni de l'angle de gîte. Autrement dit, les mouvements dans le plan vertical ne conduisent à aucun couplage dans le plan latéral ou autour de l'axe longitudinal. Il en va tout autrement pour les évolutions dans le plan latéral qui induisent un angle de gîte et une tendance à cabrer [AUC81] et qui compliquent considérablement l'étude du mouvement des sous-marins. Pour ces raisons et par soucis de

simplicité, notre étude se limitera pour l'instant à des déplacements dans le plan vertical du sous-marin. Nous supposerons également que la symétrie de répartition des masses internes est respectée et donc qu'il n'existe pas de roulis ou de tangage statique.

Le repère habituellement associé aux véhicules sous-marins est défini par trois axes x , y et z . L'axe z est dirigé vers le fond, l'axe x est orienté de la poupe (arrière) à la proue (avant) tandis que l'axe y forme un repère direct avec x et z . Dans notre étude, nous travaillons uniquement dans le plan xOz .

II.2.3. Configuration du véhicule *Taipan*

Nous disposons d'un véhicule de type « torpille civile » équipé d'un gouvernail à l'arrière et de deux paires de barres de plongées situées à l'avant et à l'arrière (Figure 9). Ces dernières, également appelées gouvernes, permettent de contrôler l'angle d'assiette du véhicule et son immersion, tandis que le gouvernail permet de contrôler le cap suivi. Le véhicule possède à l'arrière un unique propulseur qui n'est pas orientable et ne lui permet pas de reculer. Cette configuration matérielle est très fréquente pour les véhicules autonomes sous-marins.

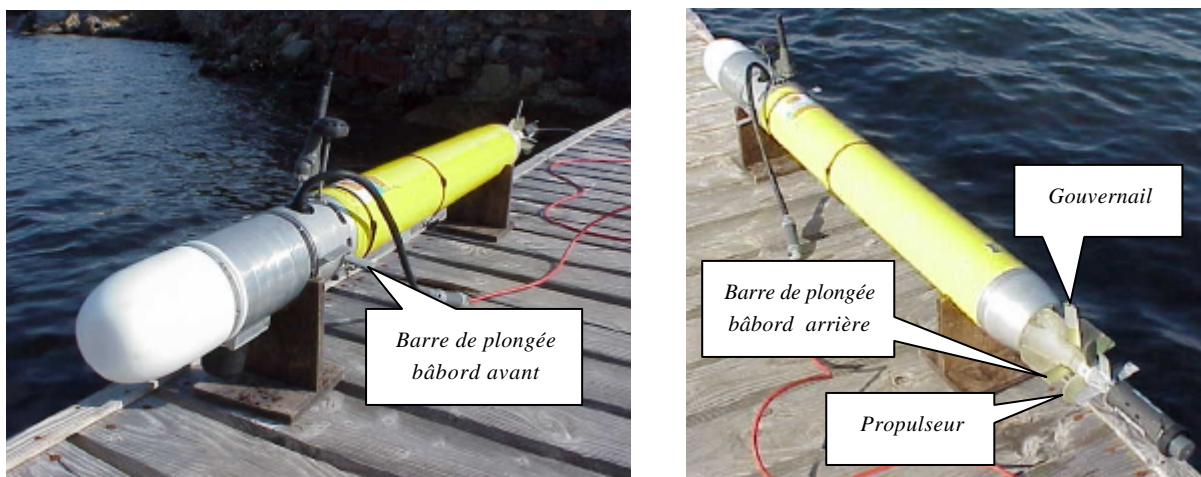


Figure 9 - Le véhicule autonome sous-marin sous-actionné *Taipan*

II.2.4. Contraintes physiques retenues

Les véhicules équipés d'un seul propulseur non orientable font partie des véhicules sous-actionnés. Ils n'ont d'autre moyen pour contrôler leur trajectoire que d'utiliser leur gouvernail et leurs barres de plongée. Ainsi, les déplacements verticaux ne peuvent se faire que s'ils sont associés à des déplacements horizontaux. De tels véhicules sont donc **non holonomes**. Cependant, contrairement à la robotique à roues, les conditions de glissement nul

et de dérapage nul ne sont jamais satisfaites lors des déplacements sous-marins et on ne peut établir de modèle cinématique pour ce type de véhicules. L'étude des mouvements ne peut se faire qu'à partir du modèle dynamique et à partir de considérations relatives à l'équilibre hydrostatique.

Si lors de la génération de trajectoires de suivi de fond, on ne peut, contrairement à la robotique terrestre, exploiter le modèle cinématique, il faut extraire du modèle dynamique les contraintes qui doivent être respectées par les trajectoires planifiées pour que ces dernières puissent être suivies par le véhicule. Les trajectoires obtenues en tenant compte de ces contraintes sont alors compatibles avec le modèle dynamique. Nous avons retenu deux contraintes principales : la limitation du rayon de giration et la limitation de l'angle d'assiette (également appelé angle de tangage).

II.2.4.a. Rayon de giration

L'étude de la courbe L/Rg (L est la longueur de référence du sous-marin et Rg est le rayon de giration) en fonction de l'angle de barre pour un sous-marin stable [AUC81] et pour des angles inférieurs à une valeur limite (proche de 30°) montre que cette fonction est bijective, croissante et impaire (Figure 10). On peut donc en déduire que :

Lors d'une giration, la valeur absolue du rayon de courbure de la trajectoire d'un sous-marin stable est minimale lorsque la valeur absolue de l'angle de barre $|\alpha|$ est maximale (avec le rayon de courbure et l'angle de barre de même signe).

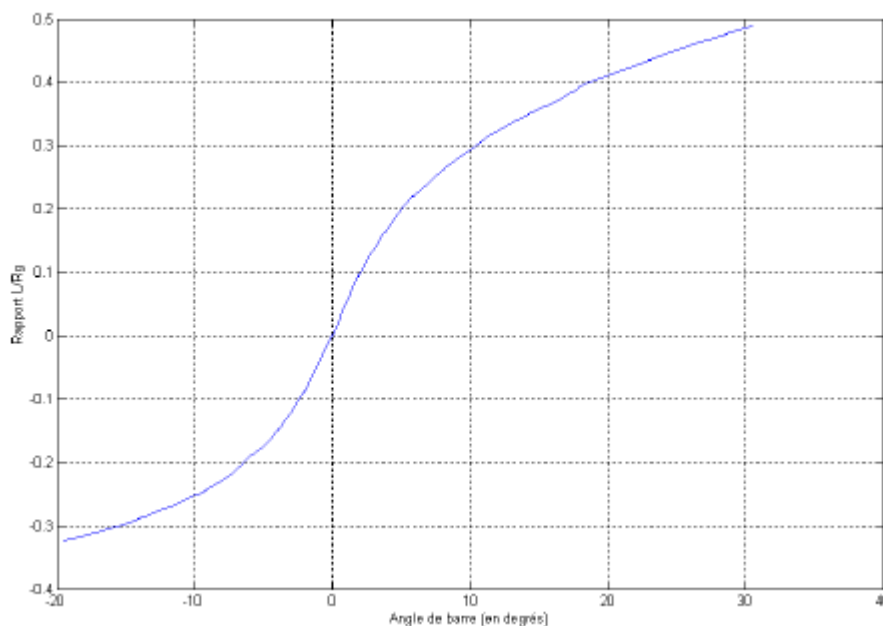


Figure 10 - Courbe L/R en fonction de l'angle de barre pour un sous-marin stable

Lorsque les barres de plongée (pour la giration verticale) ou le gouvernail (pour la giration horizontale) sont inclinées au maximum, le rayon de giration du véhicule est minimal. On le note r_{min} . Si on connaît le modèle dynamique du véhicule, on peut calculer r_{min} à partir des coefficients hydrodynamiques de ce modèle et de la vitesse de déplacement du véhicule [AUC81]. Dans le cas contraire, on peut mesurer r_{min} expérimentalement. Cette manœuvre est probablement la plus ancienne et la plus classique dans les processus d'identification des coefficients hydrodynamiques du modèle des véhicules marins ou sous-marins [FOS94]. Dans le cas de *Taipan*, r_{min} a été mesuré et est égal à 10 mètres.

Remarque : Ceci n'est valable que dans le plan horizontal. Dans le plan vertical, la validité de l'hypothèse n'est vérifiée que :

- ✓ lorsque la vitesse est supérieure à la vitesse critique en dessous de laquelle il y a inversion des barres de plongée (pour les barres arrières uniquement) [§I.6.2, AUC81]
- ✓ lorsque la vitesse est suffisamment grande pour que les forces de rappel hydrostatiques soient négligeables devant les forces hydrodynamiques.

II.2.4.b. Limitation de l'angle d'assiette

La sustentation d'un sous-marin est assurée par la poussée d'Archimède. Cette force hydrostatique s'exerce sur le centre de volume du sous-marin, tandis que le poids a son point d'application au centre de gravité du véhicule. La distance entre le centre de gravité et le centre de volume porte le nom de « distance métacentrique ». Lorsqu'elle n'est pas nulle, il existe un couple de rappel hydrostatique qui tend à ramener le véhicule dans sa position d'équilibre statique stable. Lorsque le véhicule évolue dans le plan vertical, le déplacement des barres de plongée au sein du fluide engendre des forces hydrodynamiques. Ces forces créent un couple autour de l'axe latéral (Oy) provoquant une augmentation ou une diminution l'angle d'assiette (Figure 11).

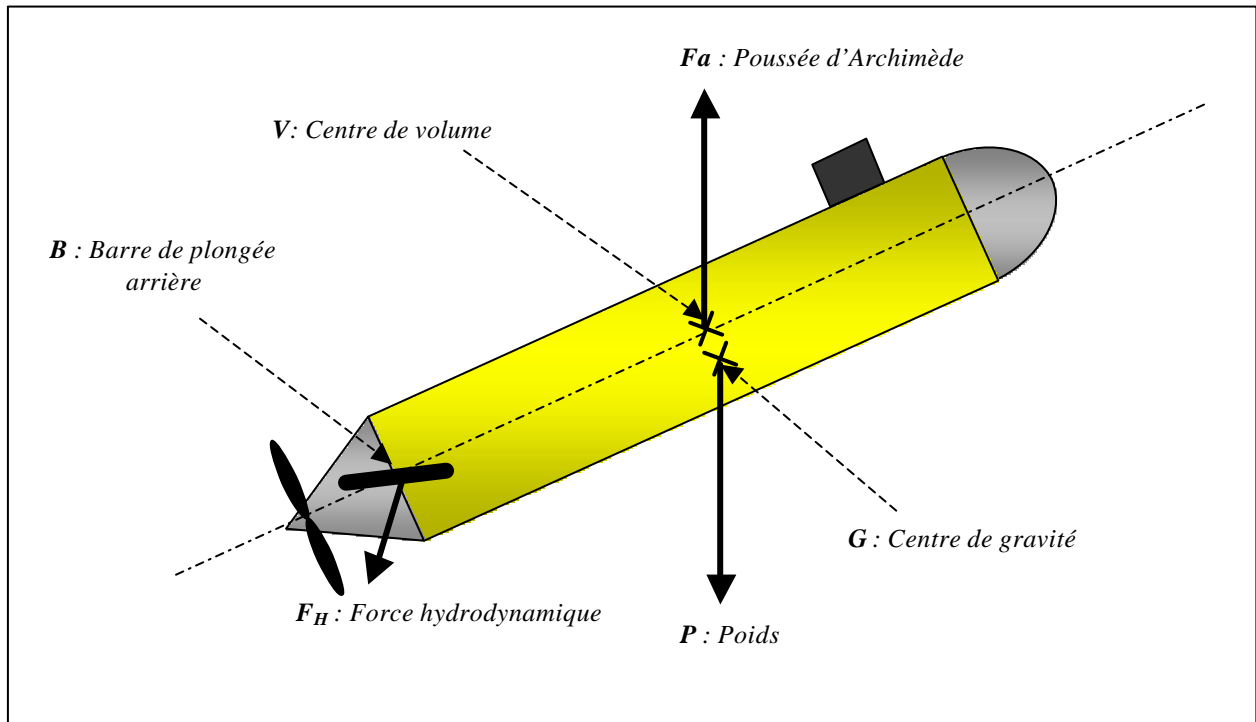


Figure 11 - Une partie des forces exercées sur le véhicule

Lorsque la distance métacentrique n'est pas négligeable, il existe des vitesses faibles et un angle d'assiette limite, pour lesquels le couple de rappel hydrostatique n'est plus négligeable par rapport au couple hydrodynamique exercé par les barres de plongée [AUC81]. A une vitesse donnée, lorsque l'angle d'assiette atteint la valeur q_{max} , ces deux couples s'équilibrent et l'attitude du véhicule se fige. Il existe donc, pour une vitesse donnée, un angle d'assiette maximal q_{max} , qui dépend de l'angle maximal d'inclinaison des barres de plongée, du poids du véhicule ainsi que de la distance métacentrique. La Figure 12 montre (en gris) les deux forces P et F_H qui créent au centre de volume respectivement le couple de rappel hydrostatique qui s'applique en G et le couple hydrodynamique des barres de plongée arrière qui s'applique en B . On cherche le moment du couple créé par chaque force par rapport au point V , centre de volume du véhicule. Les composantes radiales (en noir) des forces n'interviennent pas dans le calcul du moment. La poussée d'Archimède, s'appliquant au point V , n'intervient pas non plus et n'est donc pas représentée sur le schéma. On obtient les moments en multipliant les composantes orthoradiales (en rouge) des forces P et F_H respectivement par les distances VG et VB . L'angle d'assiette limite q_{max} est obtenu lorsque les couples exercés par les deux forces au point d'application V s'équilibrent.

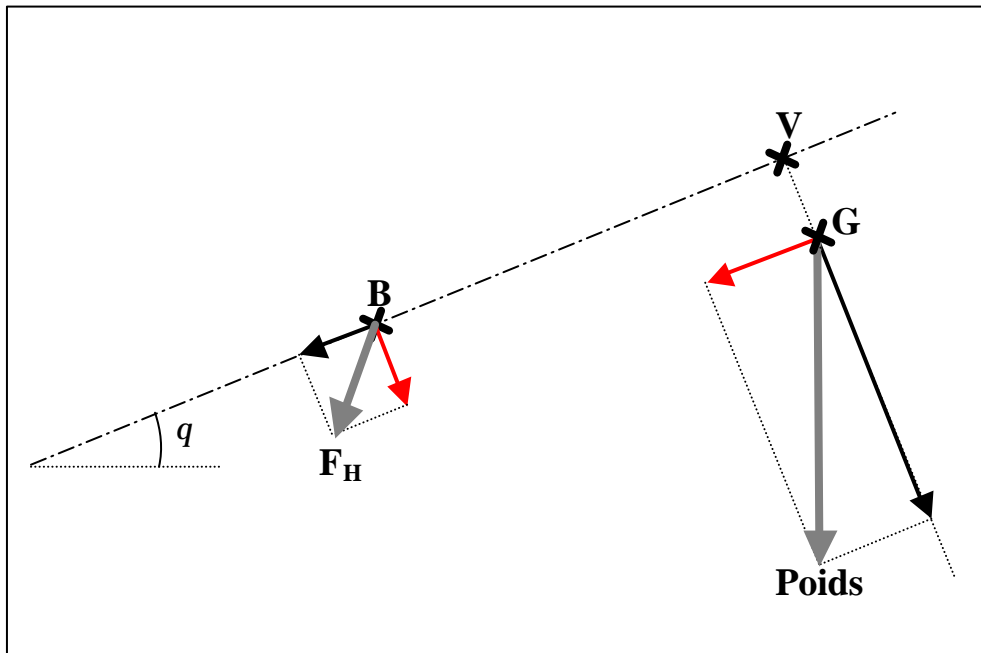


Figure 12 - Les forces créant un couple par rapport au centre de volume

Pour de nombreux AUV, il existe d'autres raisons à la limitation de l'angle d'assiette. En effet, selon le type de propulseur du véhicule, selon les contraintes imposées par les capteurs extéroceptifs ou proprioceptifs embarqués, ou pour des raisons de stabilité, l'angle d'assiette doit très souvent respecter des valeurs limites.

Dans le cas de Taipan, nous avons retenu la valeur $q_{max} = 30^\circ$. Cette limite angulaire imposée par les contraintes liées à l'utilisation des inclinomètres embarqués, mais cela n'enlève rien à la généralité de la méthode.

II.3. Commande du véhicule

II.3.1. Généralités

Comme nous l'avons vu au début de ce chapitre, les véhicules sous-marins sont des systèmes non linéaires. Leur modèle dynamique contient en effet de nombreux termes quadratiques ou trigonométriques. Etant donné l'amplitude des mouvements à accomplir, l'utilisation d'un modèle linéarisé pour l'élaboration de la loi de commande serait impossible. On pourrait toutefois envisager d'utiliser des techniques dérivées des asservissements linéaires, telles que l'interpolation du gain ou *gain-scheduling* [SLO91]. Cela consiste à sélectionner un certain nombre de points sur la plage totale de fonctionnement du véhicule. On calcule ensuite les modèles linéarisés correspondants, qui serviront par interpolation à déterminer les paramètres de la loi de commande entre les points de fonctionnement choisis.

Cette méthode très utilisée en aéronautique est lourde en temps de calcul. Elle est efficace si les variables interpolées varient « progressivement » et elle repose sur une connaissance théorique précise du modèle.

Dans le cas des véhicules sous-marins, de nombreux paramètres du modèle dynamique sont difficiles à connaître précisément (coefficients hydrodynamiques) et sont susceptibles de varier en fonction de paramètres environnementaux tels que les caractéristiques physico-chimiques de l'eau. En outre, les perturbations extérieures sont importantes lors des déplacements d'un véhicule sous-marin. Il peut s'agir des effets des courants marins, de la houle ou encore de matières flottantes telles que des algues, des méduses ou des objets dérivant qui heurtent le véhicule ou s'y accrochent. Afin de contrôler le véhicule sans pâtir des incertitudes du modèle et des perturbations environnementales, il est nécessaire d'utiliser une commande non linéaire de type robuste. Parmi celles existantes, la commande en mode glissant, encore appelée *sliding control*, a été fréquemment utilisée pour le pilotage des véhicules sous-marins [FOS94][CRI90]. Elle peut être utilisée aussi bien pour résoudre les problèmes de stabilisation (maintien du véhicule dans une attitude fixe) que pour les problèmes de suivi d'une trajectoire variant au cours du temps (tracking) [SLO91]. C'est cette dernière application que nous allons étudier à présent.

II.3.2. Commande en mode glissant

II.3.2.a. Définition du suivi de trajectoire

Le problème de suivi de trajectoire peut s'exprimer de la façon suivante [SLO91] :

Soit un système dynamique décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}=f(x,u,t) \\ y=h(x) \end{cases} \quad (\text{Eq 5})$$

où x est le vecteur d'état du système, u le vecteur de commande, t le temps, f et h des fonctions non linéaires et y le vecteur de sortie.

Et soit y_d , la trajectoire de sortie désirée.

Le suivi de trajectoire consiste à trouver une loi de commande pour le vecteur d'entrée u telle que, à partir d'un état initial quelconque, l'erreur de suivi $y(t)-y_d(t)$ tende vers zéro, tout en maintenant le vecteur d'état x borné. Par cette dernière condition, on entend en particulier que x demeure à l'intérieur du domaine de validité du modèle dynamique.

Le suivi parfait ou suivi asymptotique (erreur de suivi nulle en permanence) est impossible pour les systèmes à déphasage non minimal tels que les véhicules sous-marins non holonomes [SLO91]. Ceci est dû aux dépassements lors des changements de profondeur. Pour ce type de système, seul un suivi à erreur bornée est envisageable. Nous verrons plus tard que cela n'est pas gênant, compte tenu de la loi de commande que nous appliquerons et dont la nature induit une erreur non nécessairement nulle, mais bornée.

II.3.2.b. Principe

Le principe de la commande en mode glissant repose sur le fait qu'il est plus facile de commander un système du premier ordre qu'un système d'ordre plus élevé, qu'il soit linéaire ou non. Pour parvenir à ce résultat, on introduit une surface de glissement qui permet de remplacer un système d'ordre n par un système d'ordre 1. Examinons comment est définie cette surface de glissement

II.3.2.c. Surface de glissement

Soit le système non linéaire d'ordre n suivant :

$$x^{(n)} = f(x) + b(x)u \quad (\text{Eq 6})$$

où \mathbf{x} est le vecteur d'état, où u est le vecteur de commande et où les fonctions $f(x)$ et $b(x)$ ne sont pas connues avec précision.

On souhaite faire suivre à \mathbf{x} la trajectoire définie par le vecteur d'état variable dans le temps $\mathbf{x}_d(t)$. Pour cela, on pose le vecteur d'erreur de suivi :

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_d \quad (\text{Eq 7})$$

puis l'on introduit une surface de glissement définie par l'équation [SLO91]:

$$\mathbf{s}(x,t) = \left(\frac{d}{dt} + \mathbf{I} \right)^{n-1} \tilde{\mathbf{x}} = 0 \quad (\text{Eq 8})$$

avec \mathbf{I} une constante strictement positive et n l'ordre du système étudié.

Posé de cette façon, le problème du suivi de trajectoire ($\mathbf{x} = \mathbf{x}_d$) équivaut à demeurer sur la surface de glissement au cours du temps. En effet, $\tilde{\mathbf{x}}(t) = 0$ est la seule solution de l'équation $\mathbf{s}(x,t) = 0$. Ainsi, le problème de suivi d'un vecteur de dimension n est remplacé par un problème du premier ordre qui consiste à stabiliser \mathbf{s} . Pour le résoudre et assurer ainsi $\mathbf{s}(x,t) = 0$, on choisit une loi de commande u telle que, à l'extérieur de la surface de glissement $S(t)$, on ait :

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} \mathbf{s}^2 \leq -h|\mathbf{s}| \quad \text{ou} \quad \mathbf{s}\dot{\mathbf{s}} \leq -h|\mathbf{s}| \quad (\text{Eq 9})$$

où h est une constante strictement positive.

Cette équation (Eq 9), également appelée condition de glissement, assure que l'état du système converge vers la surface de glissement et y demeure. Dans le cas $n=2$ par exemple, la surface de glissement est une droite et l'on peut représenter graphiquement l'évolution temporelle de l'état d'un système lorsque celui-ci est initialement hors de la surface de glissement (Figure 13). On appelle « mode glissant », ou « régime glissant », le comportement du système une fois qu'il se trouve sur la surface de glissement.

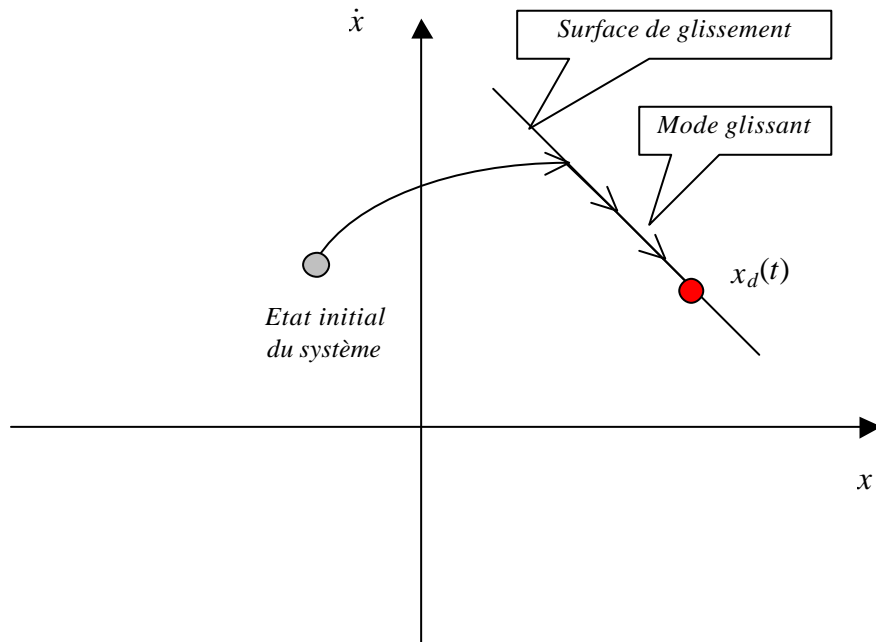


Figure 13 – Convergence de l'état d'un système vers la surface de glissement

Notons que l'équation de glissement (Eq 9) ne définit pas simplement un lieu mais conditionne aussi la dynamique du système une fois que ce dernier a rejoint la surface de glissement. On remarquera enfin que les bornes de s donnent accès directement aux bornes du vecteur d'erreur de suivi $\tilde{x}(t)$, ce qui permet de quantifier la qualité du suivi [SLO91]. On a :

$$|\mathbf{s}(t)| \leq \Phi \Rightarrow |\tilde{x}^{(i)}(t)| \leq \frac{(2I)^i}{I^{n-1}} \Phi, \quad \forall i \in [0; n-1] \quad (\text{Eq 10})$$

II.3.2.d. Détermination de la loi de commande

L'équation (Eq 8) contient le terme $\tilde{x}^{(n-1)}$. Il suffit de dériver $s(x,t)$ une fois pour faire apparaître $\tilde{x}^{(n)}$ et donc le vecteur de commande u (Eq 6). En effet, en posant $s(x,t)=0$, on obtient, l'expression du vecteur de commande à appliquer pour demeurer sur la surface de glissement. Ce vecteur dépend de la fonction f ainsi que des dérivées successives de x_d et de \tilde{x} .

Le modèle dynamique n'étant pas précisément connu, on ne dispose que d'une approximation \hat{f} de la fonction f . Le vecteur de commande obtenu précédemment est donc noté \hat{u} et bien qu'il constitue la meilleure approximation de la commande à appliquer, il ne suffit pas à contrôler le système. Afin de faire converger le système vers la surface de glissement en dépit des incertitudes du modèle et des perturbations extérieures, on ajoute au vecteur \hat{u} un terme qui permette de satisfaire la condition de glissement (Eq 9). Ainsi, selon la position du système par rapport à la surface de glissement, le vecteur de commande impose au système de fortes impulsions chargées de le ramener vers celle-ci. On pose :

$$u = \hat{u} - k \operatorname{sgn}(s) \quad (\text{Eq 11})$$

où sgn est la fonction « signe » et vaut 1 si $\sigma > 0$, -1 si $\sigma < 0$. La constante strictement positive k est choisie en fonction des bornes des incertitudes des paramètres du modèle dynamique de manière à ce que la condition de glissement (Eq 9) soit toujours vérifiée [SLO91].

On le voit, le contrôleur robuste obtenu est composé d'une partie nominale similaire à un retour d'état classique et de termes additionnels destinés à traiter les erreurs de modélisation ainsi que les perturbations extérieures. Cependant, les réponses des actionneurs n'étant pas instantanées, le système ne demeure pas exactement sur la surface de glissement et oscille de part et d'autre de cette dernière. Ce phénomène est appelé « *chattering* » (claquement) car il est associé à une activité très intense des actionneurs. Outre des désavantages énergétiques évidents, cette hyper-activité a pour conséquence d'exciter des modes de fonctionnement de haute-fréquence qui ont été négligés lors de la modélisation dynamique. Pour éviter cela, on définit une zone autour de la surface de glissement, à l'intérieur de laquelle une condition moins stricte que la condition de glissement (Eq 9) est appliquée. Ainsi, le terme $\operatorname{sgn}(s)$ est souvent remplacé par un terme à variation plus douce, tel qu'une fonction linéaire ou la fonction $\tanh(\cdot)$. La disparition du « *chattering* » qui s'ensuit se fait au prix d'une augmentation de l'erreur de suivi \tilde{x} . A l'extérieur de la zone définie autour

de la surface de glissement, on continue à appliquer la condition de glissement et donc la loi de commande définie par (Eq 11). Ceci permet d'assurer la convergence du système vers la zone qui entoure la surface de glissement.

II.3.3. Cas du véhicule *Taipan*

II.3.3.a. Equations du mouvement

Les équations du mouvement d'un sous-marin de type torpille, par rapport à des axes qui lui sont liés, sont celles décrivant classiquement le mouvement d'un solide indéformable à 6 degrés de liberté. Cependant, en plaçant le repère véhicule au centre de gravité et en négligeant certains termes d'inertie très faibles, les équations générales se réduisent aux expressions suivantes :

$$\begin{aligned}
 m(\dot{U} - RV + QW) &= X \\
 m(\dot{V} - PW + RU) &= Y \\
 m(\dot{W} - QU + PV) &= Z \\
 I_x \dot{P} - (I_y - I_z)QR - I_{zx}(PQ + \dot{R}) &= L \\
 I_y \dot{Q} - (I_z - I_x)RP + I_{zx}(P^2 - R^2) &= M \\
 I_z \dot{R} - (I_x - I_y)PQ + I_{zx}(RQ - \dot{P}) &= N
 \end{aligned} \tag{Eq 12}$$

où X , Y , Z et L , M , N représentent les forces et moments extérieurs appliqués au véhicule, où m et I représentent respectivement sa masse et sa matrice d'inertie et où U, V, W et P, Q, R représentent les vitesses linéaires et angulaires du véhicule dans le repère mobile lié à ce dernier.

Afin de simplifier les calculs, on se propose, dans un premier temps, d'étudier le modèle dynamique autour d'une trajectoire rectiligne horizontale à vitesse constante.

II.3.3.b. Modèle approché

Sous l'hypothèse de petits mouvements à vitesse constante autour d'une trajectoire rectiligne horizontale, les équations ci-dessus (Eq 12) se simplifient et deviennent :

$$\begin{aligned}
m\dot{U} &= 0 \\
m(\dot{V} + RU) &= Y \\
m(\dot{W} - QU) &= Z \\
I_x \dot{P} &= L \\
I_y \dot{Q} &= M \\
I_z \dot{R} &= N
\end{aligned} \tag{Eq 13}$$

Les forces et moments extérieurs appliqués au sous-marin possèdent une composante hydrodynamique, une composante hydrostatique et une composante liée aux perturbations extérieures. Pour simplifier le problème tout en restant suffisamment proche de la réalité (vérifié par l'expérience), on admet que les efforts hydrodynamiques ne dépendent que de la vitesse V_s , de l'incidence et de la dérive du sous-marin, des vitesses angulaires P, Q, R , des dérivées premières par rapport au temps de ces grandeurs à l'instant considéré et de l'orientation des gouvernes. Les efforts hydrodynamiques sont alors exprimés par des développements limités au deuxième ordre.

Considérons le cas du moment autour de l'axe O_y , par exemple. La composante hydrodynamique de ce moment s'exprime par :

$$M_H = U \frac{\partial M}{\partial U} + \dots + P \frac{\partial M}{\partial P} + \dots + \dot{U} \frac{\partial M}{\partial \dot{U}} + \dots + \dot{P} \frac{\partial M}{\partial \dot{P}} + \dots + \dot{U} \frac{\partial M}{\partial \ddot{U}} + \dots + \dot{P} \frac{\partial M}{\partial \ddot{P}} + \dots + UV \frac{\partial M}{\partial U \partial V} + \dots \tag{Eq 14}$$

Si l'on considère des petits mouvements du sous-marin autour d'une trajectoire rectiligne, on remarque que :

- ✓ Les termes $V/V_s, W/V_s, \dot{V}/V_s, \dot{W}/V_s, P, Q, R, \dot{P}, \dot{Q}, \dot{R}$ sont petits
- ✓ La vitesse U est constante et égale à V_s
- ✓ Les produits V^2, VW, VP, PR, \dots sont négligeables

En utilisant de nouvelles notations telles que les suivantes pour le moment hydrodynamique autour de O_y :

$$M_V = \frac{\partial M}{\partial V}; \dots M_{VR} = \frac{\partial^2 M}{\partial V \partial R}; \text{ etc...} \tag{Eq 15}$$

et en supprimant certains termes que la théorie montre négligeables, les forces et moments hydrodynamiques peuvent s'exprimer ainsi :

$$\begin{aligned}
X_H &= X_U \dot{U} \\
Y_H &= Y_V \dot{V} + Y_R \dot{R} + Y_{\dot{V}} \dot{\dot{V}} + Y_{\alpha} \dot{\alpha} \\
Z_H &= Z_W \dot{W} + Z_Q \dot{Q} + Z_{\dot{W}} \dot{\dot{W}} + Z_{\beta} \dot{\beta} \\
L_H &= L_V \dot{V} + L_P \dot{P} + L_R \dot{R} + L_{\dot{V}} \dot{\dot{V}} + L_{\dot{P}} \dot{\dot{P}} + L_{\dot{R}} \dot{\dot{R}} \\
M_H &= M_W \dot{W} + M_Q \dot{Q} + M_{\dot{Q}} \dot{\dot{Q}} + M_{\beta} \dot{\beta} \\
N_H &= N_V \dot{V} + N_R \dot{R} + N_{\dot{R}} \dot{\dot{R}} + N_{\alpha} \dot{\alpha}
\end{aligned} \tag{Eq 16}$$

où α est l'angle de gouvernail et β l'angle des barres de plongée arrière.

A ces forces et moments hydrodynamiques, il convient d'ajouter les forces et moments hydrostatiques, liés au volume d'eau déplacé (principe d'Archimède). Pour un sous-marin parfaitement pesé, les forces hydrostatiques sont nulles (flottabilité nulle), et les moments de rappel hydrostatique tendent à ramener le véhicule dans une position où son angle de tangage et son angle de roulis sont nuls. On a :

$$\begin{aligned}
X_G &= Y_G = Z_G = 0 \\
L_G &= mga\phi \\
M_G &= mga\theta \\
N_G &= 0
\end{aligned} \tag{Eq 17}$$

où m représente la masse du sous-marin, g la gravité, a la distance métacentrique (distance du centre de gravité au centre de volume), ϕ l'angle de roulis et θ l'angle de tangage.

On aboutit finalement au système d'équations (Eq 18), qui décrit le mouvement d'un sous-marin évoluant à vitesse constante autour d'une trajectoire rectiligne et horizontale :

$$\begin{aligned}
m\dot{U} &= X_U \dot{U} = 0 \\
m(\dot{V} + RU) &= Y_V \dot{V} + Y_R \dot{R} + Y_{\dot{V}} \dot{\dot{V}} + Y_{\alpha} \dot{\alpha} = Y \\
m(\dot{W} - QU) &= Z_W \dot{W} + Z_Q \dot{Q} + Z_{\dot{W}} \dot{\dot{W}} + Z_{\beta} \dot{\beta} = Z \\
I_x \dot{P} &= L_V \dot{V} + L_P \dot{P} + L_R \dot{R} + L_{\dot{V}} \dot{\dot{V}} + L_{\dot{P}} \dot{\dot{P}} + L_{\dot{R}} \dot{\dot{R}} - mga\phi = L \\
I_y \dot{Q} &= M_W \dot{W} + M_Q \dot{Q} + M_{\dot{Q}} \dot{\dot{Q}} + M_{\beta} \dot{\beta} - mga\theta = M \\
I_z \dot{R} &= N_V \dot{V} + N_R \dot{R} + N_{\dot{R}} \dot{\dot{R}} + N_{\alpha} \dot{\alpha} = N
\end{aligned} \tag{Eq 18}$$

II.3.3.c. Modèle d'évolution de Taipan dans le plan vertical

Dans ce qui suit, nous supposons que la commande en cap du véhicule est assurée (voir détails en annexe) et que le véhicule suit un cap constant. Nous ne nous intéresserons plus qu'à la commande dans le plan vertical. Ainsi, la vitesse de déplacement latéral V et la vitesse angulaire de lacet R seront nulles. La vitesse angulaire de roulis P sera, elle aussi, supposée nulle et puisque l'on navigue à angle de tangage faible, nous considérerons que $U \approx V_s$.

Les variables d'état que nous retiendrons pour modéliser le système seront donc la vitesse linéaire W selon l'axe z du repère lié au véhicule, la vitesse angulaire de tangage Q dans ce même repère, ainsi que la profondeur d'immersion Z et l'angle de tangage θ du véhicule dans le repère terrestre fixe. Sous ces conditions, le modèle de plongée linéarisé s'écrit ainsi:

$$\begin{aligned}\dot{W} &= \frac{C_{Zw}}{(2k_{\Delta} - C_{Z\dot{w}})L} V_s W + \frac{(C_{Zq} + 2k_{\Delta})}{(2k_{\Delta} - C_{Z\dot{w}})} V_s Q + \frac{C_{Z\beta}}{(2k_{\Delta} - C_{Z\dot{w}})L} V_s^2 \beta \\ \dot{Q} &= \frac{C_{Mw}}{(2k_{iy} - C_{M\dot{q}})L^2} V_s W + \frac{C_{Mq}}{(2k_{iy} - C_{M\dot{q}})L} V_s Q + \frac{C_{M\beta}}{(2k_{iy} - C_{M\dot{q}})L^2} V_s^2 \beta - \frac{2k_{\Delta} \gamma \theta V_s^2}{(2k_{iy} - C_{M\dot{q}})L^2} \\ \dot{\theta} &= Q \\ \dot{Z} &= W - V_s \theta\end{aligned} \quad (\text{Eq 19})$$

On remarquera que ce modèle dépend de la vitesse de déplacement V_s de l'engin et devra donc être recalculé à chaque changement de vitesse.

II.3.3.d. Commande en mode glissant

Les modèles linéarisés décrivant le mouvement en cap ou en immersion peuvent être mis sous la forme générale :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{Eq 20})$$

Ce modèle linéarisé étant approximatif, nous allons utiliser une commande robuste en mode glissant. On définit comme suit la surface de glissement $\sigma(x)$:

$$\sigma(x) = s^t x = 0 \quad (\text{Eq 21})$$

La stabilité sur la surface de glissement est assurée si la condition de glissement (voir (Eq 9) du paragraphe II.3.2.c) est vérifiée, ce qui, avec $\eta > 0$, peut s'écrire :

$$\dot{\mathbf{s}}(x) = -\mathbf{h} \operatorname{sgn}(\mathbf{s}(x)) \quad (\text{Eq 22})$$

car :

$$\mathbf{s}(x) \dot{\mathbf{s}}(x) = -\mathbf{h} \mathbf{s}(x) \operatorname{sgn}(\mathbf{s}(x)) = -\mathbf{h} |\mathbf{s}(x)| \quad (\text{Eq 23})$$

En dérivant $\sigma(x)$ (Eq 21), on fait apparaître \dot{x} que l'on peut remplacer par $Ax + Bu$ d'après (Eq 20). En remplaçant $\dot{\mathbf{s}}(x)$ dans l'équation de glissement (Eq 22), on obtient :

$$\mathbf{s}^t (Ax + Bu) = -\eta \operatorname{sgn}(\sigma(x)) \quad (\text{Eq 24})$$

De l'équation précédente, on peut extraire u et on obtient la commande à appliquer :

$$\mathbf{u} = -(\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \mathbf{s}^t \mathbf{A} x - (\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \eta \operatorname{sgn}(\sigma(x)) \quad (\text{Eq 25})$$

Cette commande peut également s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K} x + \mathbf{K}_s \eta \operatorname{sgn}(\sigma(x)) \quad (\text{Eq 26})$$

avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= (\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \mathbf{s}^t \mathbf{A} \\ \mathbf{K}_s &= -(\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \end{aligned} \quad (\text{Eq 27})$$

On retrouve bien le retour d'état linéaire et le terme de commutation non linéaire décrits dans le paragraphe II.3.2.d.

II.3.3.e. Dynamique du système sur la surface de glissement

Pour déterminer les paramètres s de la surface de glissement, on conçoit le retour d'état linéaire de telle sorte que le système possède une dynamique donnée sur la surface de glissement. Lorsque l'on se trouve sur la surface de glissement la commande u se résume à la partie linéaire $-\mathbf{K}x$ puisque $\sigma(x)=0$. Le système est donc régi par l'équation suivante:

$$\dot{x} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}(\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \mathbf{s}^t \mathbf{A}) x = (\mathbf{A} - \mathbf{B} \mathbf{K}) x = \mathbf{A}_c x \quad (\text{Eq 28})$$

On cherche le gain \mathbf{K} qui place les valeurs propres de \mathbf{A}_c à des valeurs désirées correspondant à une dynamique désirée plus ou moins grande :

$$\det(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}_c) = 0 \quad (\text{Eq 29})$$

L'une des valeurs propres de la matrice dynamique A_c du système bouclé doit être nulle, ce qui est le cas lorsque l'on utilise les modèles linéarisés de cap et d'immersion (dernière colonne). La matrice A_c étant alors connue, on obtient s en écrivant que s est le vecteur propre à droite de A_c^t qui correspond à la valeur propre nulle :

$$A_c^t s = \lambda_3 s = 0 \quad (\text{Eq 30})$$

II.3.3.f. Diminution du « chattering »

Nous avons vu précédemment (§II.3.2.d) qu'il était possible de diminuer le « chattering », c'est-à-dire les battements rapides et incessants des actionneurs (barres de plongée). Dans le cas de Taipan, la commutation de signe $\text{sgn}(\sigma(x))$ de l'équation (Eq 26) est remplacée par $\tanh(\sigma(x))$. D'autre part, si le gain η est choisi suffisamment grand, alors le système sera régi par la dynamique sur la surface de glissement (elle-même dépendante des coefficients s^t choisis), et ce malgré les erreurs de modélisation, les termes non linéaires négligés et les perturbations. Un terme supplémentaire ϕ est utilisé pour définir la largeur de la bande de commutation (Figure 14).

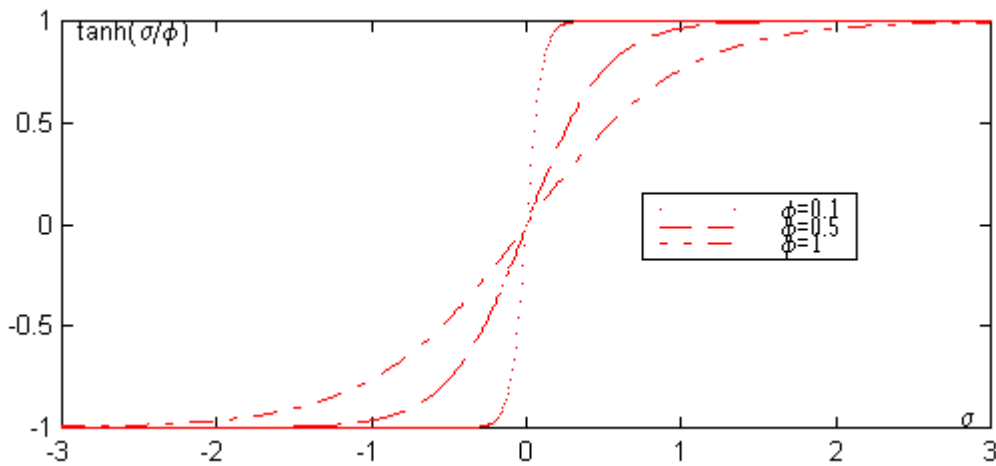


Figure 14- Effet de ϕ sur la commutation

II.3.3.g. Détermination de la loi de commande en immersion

La loi de commande en immersion s'applique à β , l'angle d'inclinaison des barres de plongée arrière. On choisit la surface de glissement suivante :

$$s = s_1 w + s_2 q + s_3 (\mathbf{q} - \mathbf{q}_d) + s_4 (z - z_d) \quad (\text{Eq 31})$$

Pour une vitesse V_s donnée, le modèle d'évolution dans le plan horizontal peut être écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{W} \\ \dot{Q} \\ \dot{\theta} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W \\ Q \\ \theta \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \beta \quad (\text{Eq 32})$$

En notant $K = [k_1 \ k_2 \ k_3 \ 0]$ le gain du retour d'état, la matrice A_c du système bouclé s'écrit :

$$A_c = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1 k_1 & a_{12} - b_1 k_2 & -b_1 k_3 & 0 \\ a_{21} - b_2 k_1 & a_{22} - b_2 k_2 & a_{23} - b_2 k_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 33})$$

En développant $\det(\lambda I - A_c) = 0$, on aboutit à un système de 3 équations (on a une valeur propre nulle) qui permettent de calculer k_1 , k_2 et k_3 pour λ_1 , λ_2 , λ_3 données et $\lambda_4 = 0$:

$$\begin{aligned} & [b_1 \lambda^3 + (a_{12} b_2 - b_1 a_{22}) \lambda^2 - a_{23} b_1 \lambda] k_1 \\ & + [b_2 \lambda^3 + (a_{21} b_1 - b_2 a_{11}) \lambda^2] k_2 \\ & + [b_2 \lambda^2 + (a_{21} b_1 - b_2 a_{11}) \lambda] k_3 \\ & = -\lambda^4 + (a_{22} + a_{11}) \lambda^3 - (a_{11} a_{22} - a_{23} - a_{12} a_{21}) \lambda^2 - a_{11} a_{23} \lambda \\ & \text{pour } \lambda = \lambda_1, \lambda_2, \text{ et } \lambda_3 \end{aligned} \quad (\text{Eq 34})$$

Une fois K déterminé, la matrice A_c est connue. On obtient les paramètres s de la surface de glissement en résolvant $A_c^t s = 0$, soit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} - b_1 k_1 & a_{21} - b_2 k_1 & 0 & 1 \\ a_{12} - b_1 k_2 & a_{22} - b_2 k_2 & 1 & 0 \\ -b_1 k_3 & a_{23} - b_2 k_3 & 0 & a_{43} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ s_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 35})$$

Pour cela, on pose $s_1 = 1$, et on résout le système de 3 équations pour obtenir s_2, s_3, s_4 . On normalise ensuite les s_i . La loi de commande finale est donc :

$$\mathbf{b} = k_1 \mathbf{w} + k_2 \mathbf{q} + k_3 \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{h} \tanh[(s_1 \mathbf{w} + s_2 \mathbf{q} + s_3 (\dot{\mathbf{q}} - \dot{\mathbf{q}}_d) + s_4 (z - z_d)) / \mathbf{f}] \quad (\text{Eq 36})$$

En pratique, w n'est pas mesurable parce que le véhicule n'est pas équipé d'un loch Doppler. On considérera donc w comme nul, ce qui revient à supprimer les termes $k_1 w$ et $s_1 w$ de la loi de commande. Ceci est possible sur le véhicule autonome sous-marin *Taipan* car dans le cas particulier de ce véhicule, la suppression de ces deux termes n'entraîne pas d'instabilité (les pôles restent à partie réelle négative). Dans le cas de la commande d'un autre véhicule, il conviendra de vérifier que cette dernière condition est vérifiée avant de procéder à ce type de simplification.

II.3.3.h. Expérimentations

La Figure 15 montre le comportement en plongée de *Taipan* lors d'un essai en milieu naturel en 1999. *Taipan* effectue d'abord un palier à 2m puis remonte à 1m. La vitesse est d'environ 1.2 m/s. Seules les gouvernes arrière sont commandées, les gouvernes avant restant à zéro. On observe que l'écart par rapport à la profondeur de consigne est inférieur à 15 cm.

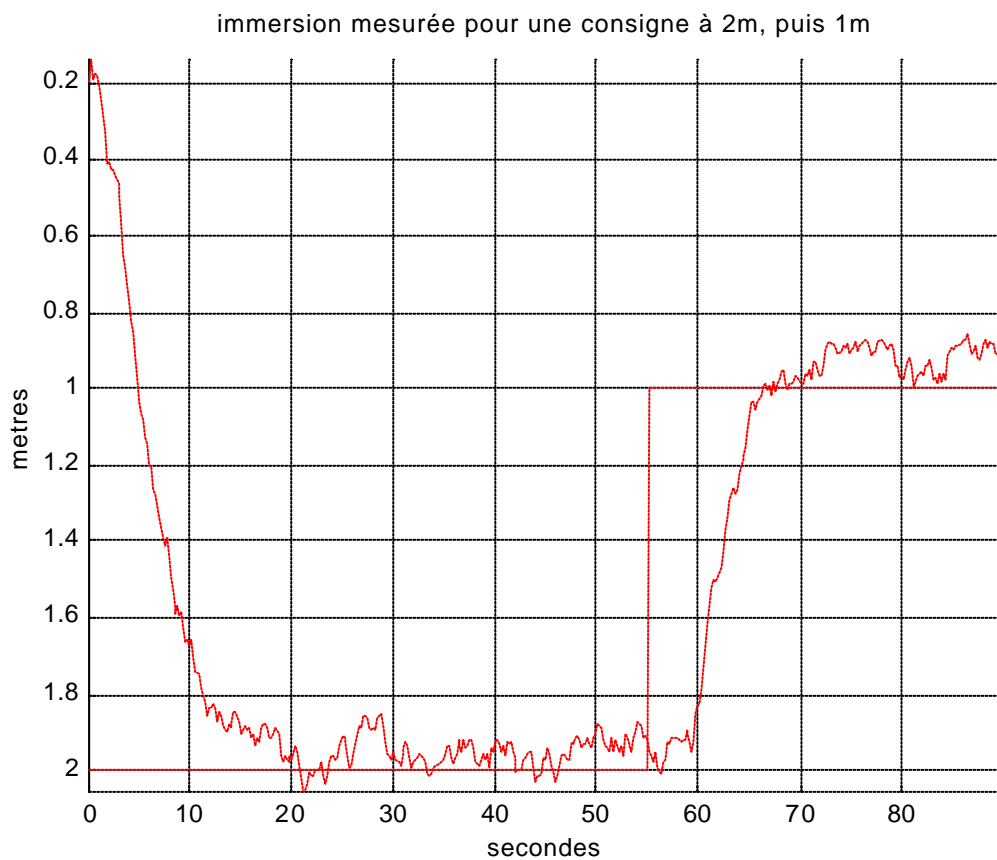


Figure 15 - Essai de la commande de *Taipan* dans le plan vertical

II.3.4. Commande en mode glissant améliorée

Malgré l'utilisation d'une loi de commande visant à réduire le « chattering », l'activité des barres de plongée lors des expérimentations reste importante et diminue l'autonomie du véhicule. Ceci est dû en partie à l'imprécision du modèle et notamment au fait que l'on utilise un modèle linéarisé. Afin de réduire l'activité des barres de plongée, il conviendrait de prendre en compte certains termes non linéaires connus du modèle dynamique. Ainsi, dans l'équation (Eq 24), on pourrait remplacer le terme linéaire Ax par un modèle non linéaire $f(X)$ plus complet comme cela est expliqué dans le paragraphe II.3.2.d. En particulier, on pourrait laisser les forces hydrostatiques, simples à modéliser, sous leur forme non linéaire d'origine. Une telle modification augmenterait le coût en temps de calcul mais diminuerait l'activité des barres de plongée dans la mesure où le modèle utilisé serait plus précis.

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons analysé les caractéristiques du véhicule sous-marin sous-actionné *Taipan*. Nous avons identifié deux contraintes physiques majeures. L'une concerne le rayon de giration du véhicule, l'autre son angle de tangage maximal. Nous avons également étudié et simplifié le modèle dynamique du véhicule afin d'établir une loi de commande adaptée. A présent, nous devons définir une méthode qui permette au véhicule de planifier ses trajectoires de suivi de fond.

Dans le chapitre suivant, nous présentons en premier lieu une méthode de navigation permettant, à partir d'une carte des fonds marins, de planifier des trajectoires compatibles avec les possibilités de déplacement des véhicules sous-actionnés de type « torpille civile ». Une seconde méthode, dérivée de la première est ensuite présentée. Elle permet la navigation du véhicule en environnement inconnu mais au relief régulier. Enfin, une troisième méthode vient compléter les précédentes en permettant au véhicule de détecter puis d'éviter les falaises sous-marines.

Chapitre III : Planification de trajectoires

III.1. Introduction

Comme nous avons pu le constater lors de notre étude bibliographique (Chapitre I), l'acquisition de données bathymétriques en vue de l'établissement d'une carte des fonds marins est un sujet qui a été largement traité.

Nous supposerons donc dans la première partie de ce chapitre que l'on dispose d'un relevé bathymétrique précis de la zone où le véhicule évolue. Notre objectif sera donc de construire, entre deux points de la carte, une trajectoire qui soit compatible avec les capacités de déplacement du véhicule considéré. Afin de définir une méthode de génération de trajectoires adaptée à cette problématique, nous examinerons pourquoi il est légitime de transformer les contraintes physiques du chapitre II en contraintes géométriques. Nous verrons également comment donner ou non aux trajectoires obtenues une continuité à l'ordre 2 en utilisant deux types de fonctions d'interpolation : les splines cubiques semi-forcées ou les polynômes de Hermite [CRE01a] [CRE01b].

III.2. Mise en équation des contraintes

III.2.1. Prise en compte de la dynamique

Le problème de la planification de trajectoires en tenant compte de la dynamique d'un système est appelé « *the kinodynamic motion planning problem* » [MCI00]. Dans un article consacré à l'étude du mouvement d'un robot de type anguille nommé « The REEL Eel », Kenneth MacIsaac (Université de Pennsylvanie) explique qu'il a été prouvé que la trajectoire optimale pour un véhicule à cinématique plane pourvu de contraintes sur le rayon de courbure est constituée d'une série d'arcs de cercles et de segments de droite. Ainsi, pour ce robot, les trajectoires sont planifiées à l'aide d'arcs de cercle de rayon le rayon de courbure minimal connectés directement à des droites tangentes.

Le fait que la dérive joue un rôle central dans la génération de mouvements constitue la différence essentielle avec les systèmes mobiles à roues étudiés traditionnellement. Une trajectoire cinématique peut servir de base à un robot mobile de type « dynamique » (c'est-à-dire dépourvu de modèle cinématique), mais les termes dynamiques du second ordre vont conduire à des erreurs d'état. Ceci a conduit les auteurs [MCI00] à ajouter un intégrateur dans le contrôleur. Etant donné la difficulté du problème et l'impossibilité d'intégrer analytiquement les modèles dynamiques complexes, aucun algorithme de planification de mouvement incluant la totalité de la dynamique d'un robot ne fonctionne à ce jour.

Pour la planification de trajectoires, nous allons donc nous inspirer des méthodes existantes, adaptées aux contraintes physiques que nous venons de définir. Pour cela, il sera nécessaire de transformer les contraintes physiques liées au robot, en contraintes géométriques sur la trajectoire.

III.2.2. Limitation de l'angle d'assiette

Si l'on note $z=f(x)$ la trajectoire planifiée, la limitation de l'angle d'assiette du véhicule correspond à la limitation de la pente de sa trajectoire. Ainsi, cette dernière devra en tout point vérifier l'inéquation suivante (Eq 37).

$$-\tan(\mathbf{q}_{\max}) \leq \frac{\partial f(x)}{\partial x} \leq \tan(\mathbf{q}_{\max}) \quad (\text{Eq 37})$$

III.2.3. Limitation du rayon de courbure

L'inéquation (Eq 38) correspond à la limitation du rayon de courbure pour une trajectoire de la forme $z=f(x)$.

$$\frac{(1+(f'(x))^2)^{\frac{3}{2}}}{f''(x)} \geq r_{\min} \quad (\text{Eq 38})$$

III.3. Méthode de suivi de fond en environnement connu

Nous avons supposé dans l'introduction que le véhicule étudié disposait d'un profil bathymétrique échantillonné. En outre, les trajectoires planifiées de suivi de fond doivent vérifier les deux contraintes géométriques que nous venons de définir. La plupart du temps, la régularité du profil de fond est telle que ce dernier vérifie ces contraintes et que la trajectoire à planifier ne consiste qu'en une interpolation, décalée vers le haut, des échantillons bathymétriques. Parfois, cependant, le strict suivi du profil de fond n'est pas possible au regard des contraintes physiques retenues. On doit alors déterminer la trajectoire compatible dont l'allure est la plus proche possible du profil de fond. Pour construire ces trajectoires satisfaisantes, nous faisons subir aux données bathymétriques brutes trois traitements

successifs : le franchissement des sommets, le traitement des creux, puis une interpolation polynomiale assurant ou non la continuité de la dérivée seconde.

III.3.1. Franchissement des sommets

Lorsque le profil bathymétrique autour d'un sommet viole les contraintes physiques du véhicule, le strict suivi du profil est impossible et le franchissement doit alors être anticipé. Pour déterminer la trajectoire à suivre, on utilise les contraintes géométriques établies précédemment (Eq 37) et (Eq 38). Pour cela, on procède en deux étapes :

- ✓ On fait passer par le sommet à franchir un arc de cercle, de rayon égal au rayon de courbure minimal autorisé, r_{min} .
- ✓ Lorsque les pentes des tangentes situées de part et d'autre de l'arc de cercle atteignent les valeurs $-q_{max}$ et $+q_{max}$, on prolonge l'arc de cercle par des droites. Ces deux droites ont pour pente respectivement $-q_{max}$ et $+q_{max}$ (Figure 16).

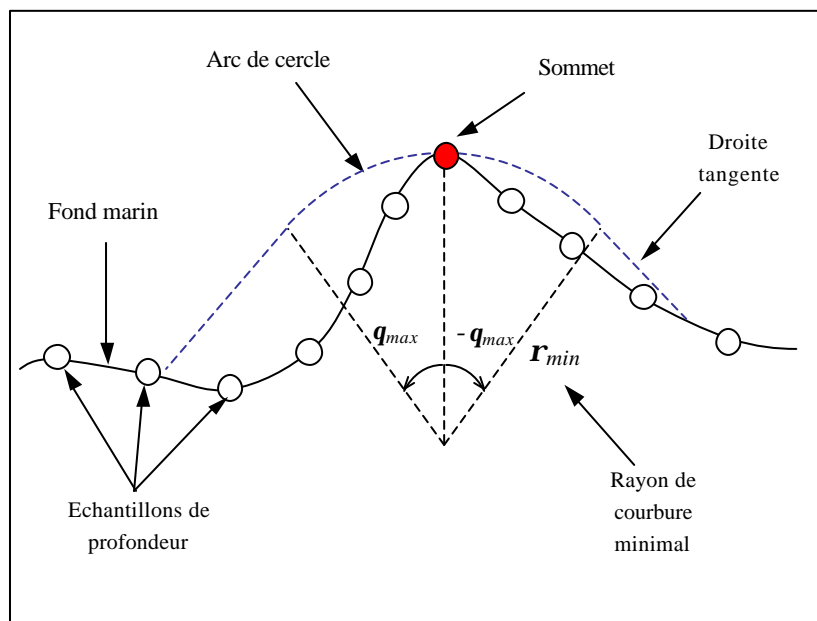


Figure 16 - Franchissement d'un sommet

La courbe ainsi obtenue, définit alors les points les plus bas accessibles depuis le sommet sélectionné. Tous les échantillons de profondeur situés plus bas que la courbe doivent donc être déplacés jusqu'à celle-ci (Figure 17). On définit ainsi un nouveau profil de fond dont le franchissement des sommets est possible.

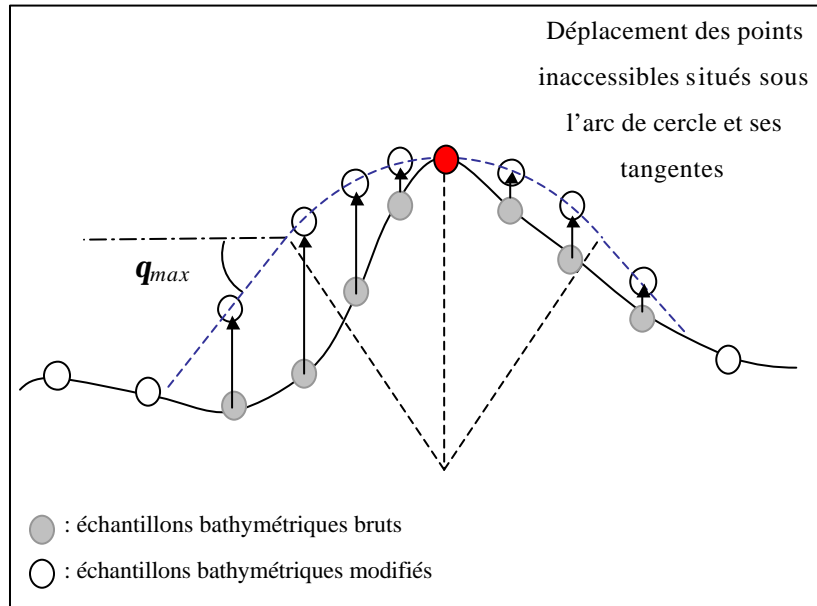


Figure 17 – Déplacement des points inaccessibles

Il faut appliquer ce traitement à tous les sommets du profil bathymétrique. Cependant, on remarque que lors du traitement d'un sommet, la zone inaccessible qui l'entoure peut contenir des sommets intermédiaires. Puisqu'ils sont inaccessibles, ces derniers disparaîtront lors du traitement. On a donc intérêt à commencer par traiter les plus hauts sommets, c'est-à-dire ceux de plus faible profondeur. On diminue ainsi le nombre de calculs. Ce traitement effectué, la contrainte d'angle d'assiette est satisfaite sur tout le profil. La contrainte de rayon de courbure est satisfaite autour des sommets, mais pas dans les creux de la courbe. A ces endroits, le rayon de courbure minimum n'est pas toujours respecté. Il est alors nécessaire d'appliquer le second traitement détaillé ci-dessous.

III.3.2. Rayon de courbure dans les creux

Dans chaque creux de la courbe, on ajuste un cercle de rayon égal à r_{min} , la valeur minimale du rayon de courbure. On entend par «ajuster» le fait de placer le cercle tel qu'il soit tangent à la courbe en deux points. Les échantillons de profondeur situés sous le bord inférieur du cercle ne sont pas accessibles au robot et sont déplacés jusqu'au cercle (Figure 18).

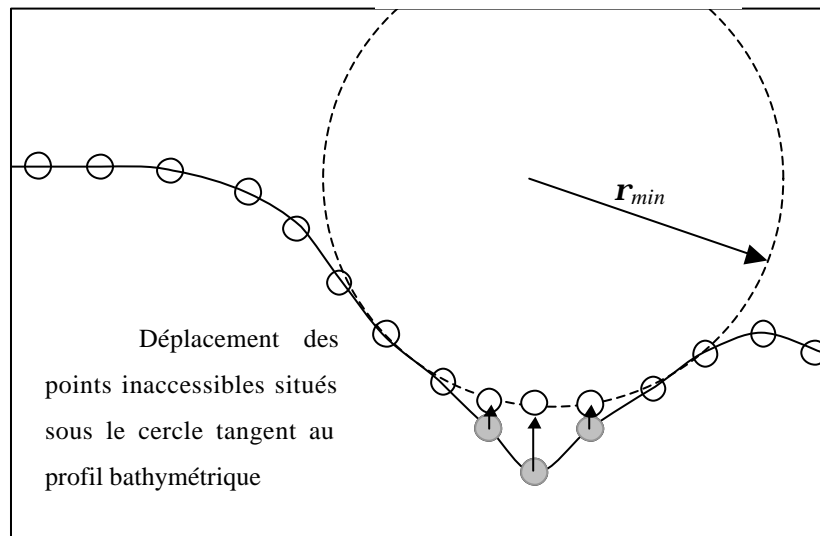


Figure 18 - Traitement d'un creux

III.3.3. Interpolation du profil bathymétrique

Une fois les données bathymétriques brutes traitées, il faut les interpoler afin de générer une trajectoire continue qui servira à commander le véhicule. Les fonctions polynomiales d'interpolation se prêtent parfaitement à ce type de problème.

III.3.3.a. Continuité de la dérivée seconde

Lors des déplacements d'un robot, la continuité de la dérivée seconde de la trajectoire est souvent requise. Dans le cas des véhicules à roues, elle est indispensable pour des raisons cinématiques. Dans le cas des robots articulés, elle est souhaitée pour éviter les à-coups (gigue) ou pour épargner les actionneurs, mais cette condition n'est pas indispensable d'un point de vue théorique (les lois de commande de type « bang-bang » en sont l'exemple) [KHA99]. Pour les systèmes de pilotage automatique d'avion, là encore, la continuité de la dérivée seconde de la trajectoire n'est respectée que pour garantir le confort des passagers. Pour des systèmes à déphasage non minimal, une discontinuité de la dérivée seconde nécessiterait une variation brutale de l'orientation des volets, provoquant une brève et inconfortable perte d'altitude. Pour les drones, ou avions automatisés sans passager, les discontinuités de dérivée seconde de la trajectoire sont fréquentes. Puisqu'il s'agit là encore de systèmes à déphasage non minimal, on observe nécessairement, lors des changements d'altitude, un écart local (dépassement) entre la trajectoire de consigne et la trajectoire

réellement suivie. Dans le cas des véhicules sous-marins, la nature hydrostatique de la sustentation [AUC81] diminue l'ampleur de ce type de dépassements par rapport aux aéronefs, dont la sustentation est aérodynamique.

Pour les véhicules sous-marins, la continuité de la dérivée seconde de la trajectoire n'est pas requise, hormis si le matériel embarqué l'exige.

III.3.3.b. Splines cubiques semi-forcées

Les jonctions entre les arcs de cercle et les droites donnent lieu à des discontinuités de la dérivée seconde de la trajectoire. Si l'on souhaite assurer la continuité de celle-ci, les fonctions polynomiales utilisées doivent être de classe C^2 , c'est-à-dire continues à dérivées première et seconde continues.

Parmi l'ensemble des fonctions polynomiales d'interpolation, nous avons retenu les *splines cubiques* en raison de leur régularité et de la simplicité de leur calcul. La courbe d'interpolation est réalisée par morceaux, chacun d'eux étant déterminé par un polynôme de degré 3. Les coefficients de chaque polynôme dépendent de la position des quatre points d'interpolation les plus proches et ils sont choisis de sorte que la courbe respecte les trois conditions suivantes :

- ✓ passage de la courbe par chaque point d'interpolation
- ✓ continuité de la courbe en ces points à l'ordre 1 (continuité de la dérivée première)
- ✓ continuité de la courbe en ces points à l'ordre 2 (continuité de la dérivée seconde).

Lors de la détermination des coefficients des splines, il faut fixer des conditions aux limites afin d'éviter de se trouver confronté à un système d'équation sous-déterminé. Nous avons imposé à la dérivée de la courbe une valeur initiale égale au tangage initial du véhicule. La valeur finale de la dérivée est, quant à elle, laissée libre, c'est-à-dire égale à zéro. On parle alors de « *splines cubiques semi-forcées* ». La résolution du système d'équations qui permet de déterminer les coefficients des splines est classique. Elle est détaillée dans [AHL67].

III.3.3.c. Polynômes d'interpolation de Hermite

Les splines cubiques présentent l'inconvénient d'engendrer des dépassements de profondeur (Figure 19). Ainsi, la courbe d'interpolation peut présenter une profondeur maximale dépassant celle du profil bathymétrique d'origine. Dans le cas du suivi de fond à faible distance, cela peut être dommageable pour le véhicule.

Pour cette raison, lorsque la continuité de la dérivée seconde n'est pas requise, on préférera utiliser les fonctions d'interpolation de Hermite. Ces dernières ne sont continues qu'à l'ordre 1, mais présentent l'avantage d'éviter les dépassements de profondeur (Figure 19).

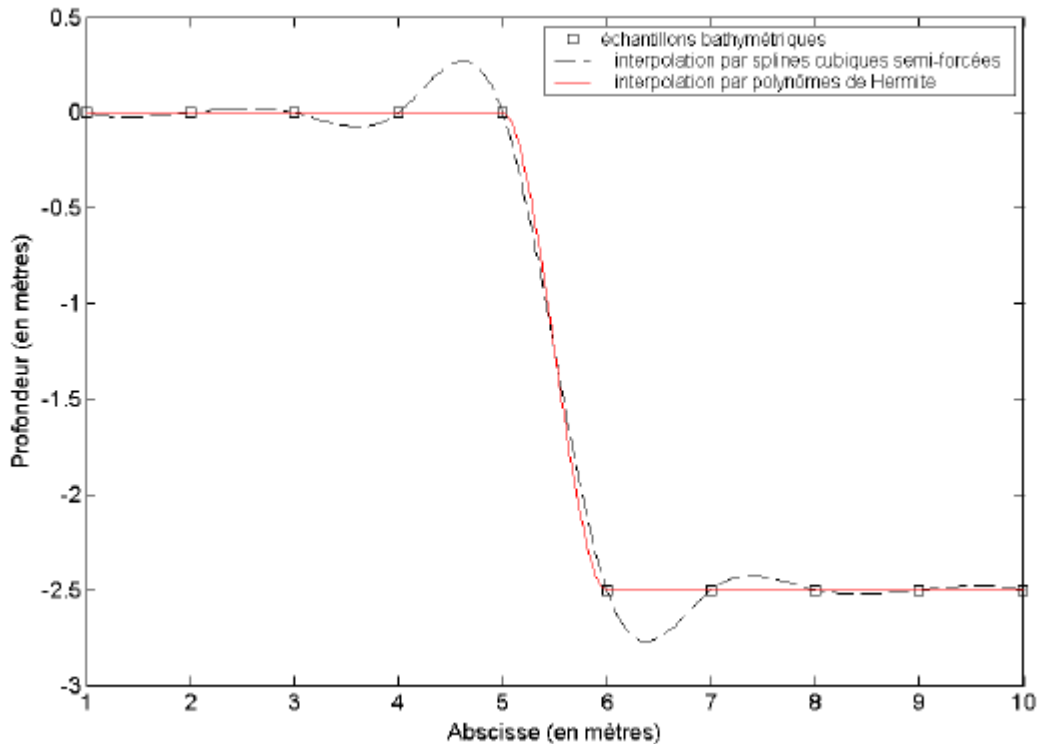


Figure 19 - Comparaison des splines cubiques et des polynômes de Hermite

III.3.4. Consigne de distance

Une fois le traitement du profil bathymétrique accompli et l'interpolation terminée, il ne reste plus qu'à translater la trajectoire obtenue vers le haut afin d'obtenir la distance désirée entre le véhicule et le fond.

III.3.5. Limites

La méthode de suivi de fond que nous venons de définir tient compte des deux principales contraintes physiques d'un véhicule sous-marin de type « torpille civile ». Il existe d'autres contraintes moins importantes dont nous n'avons pas tenu compte, notamment lors de mouvements dans le plan horizontal. Cependant, compte tenu des incertitudes du modèle dynamique, compte tenu de la difficulté à positionner précisément un véhicule sous-marin et compte tenu de la difficulté à générer une loi de commande qui permette de suivre

précisément la trajectoire planifiée, l'approximation choisie paraît parfaitement suffisante. Les simulations et les expérimentations (chapitre IV) permettront de vérifier ou non la légitimité du choix des contraintes retenues. Une prise en compte plus poussée des contraintes physiques du véhicule pour la génération de trajectoires n'aurait guère de sens, au vu des incertitudes évoquées ci-dessus. Une erreur de positionnement absolu de l'ordre de la dizaine de mètres est courante en robotique sous-marine. C'est plutôt localement qu'il faut rechercher la précision de positionnement, afin d'améliorer et de quantifier la qualité du suivi de fond. C'est ce que nous allons étudier à présent.

III.4. Méthode de suivi de fond en environnement inconnu

III.4.1. Nécessité de la méthode

Le paragraphe précédent a été consacré à l'étude d'une méthode de génération de trajectoires de suivi de fond basée sur l'utilisation d'une carte embarquée (environnement connu). Cette technique suppose que l'on dispose d'une carte de l'environnement de navigation qui soit suffisamment précise et qui soit à jour (épaves, volcans sous-marins, structures industrielles...). Nous avons vu que cette méthode suppose également que le véhicule puisse se positionner précisément sur cette carte. Il existe de nombreuses méthodes de positionnement. Elles peuvent être relatives, c'est-à-dire que le positionnement se fait par rapport à la carte [STR99] ou absolue, c'est-à-dire que le positionnement se fait dans le repère absolu lié à l'environnement [BAC01c]. Dans tous les cas, cela nécessite la mise en œuvre de capteurs extéroceptifs coûteux et dont la consommation en énergie affecte l'autonomie du véhicule.

Pour pallier les inconvénients liés à la disponibilité de la carte et au positionnement, il est nécessaire d'adapter la méthode décrite précédemment à la génération de trajectoires locales de suivi de fond. Afin de déterminer les modifications à apporter à la méthode précédente, nous nous proposons de définir et de détailler le phénomène qui distingue la découverte progressive du fond de sa connaissance a priori. Il s'agit des « zones d'ombre ».

III.4.2. Zones d'ombre

III.4.2.a. définition

On dit qu'un dispositif de télédétection acoustique (sondeur, sonar à balayage, sonar latéral...) insonifie une zone du fond marin, lorsqu'il émet des ondes acoustiques en direction de cette zone. A l'instar des rayons lumineux, ces ondes peuvent rencontrer des obstacles qui empêchent l'insonification de toute la zone. Les endroits où les ondes acoustiques ne parviennent pas sont appelés « zones d'ombre » (Figure 20).

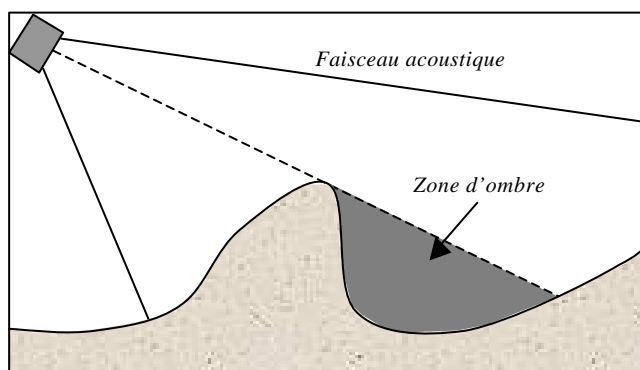


Figure 20 - Zone d'ombre

Dans le cas de l'imagerie par sonar latéral, ce phénomène peut être exploité avantageusement pour améliorer la caractérisation des obstacles qui génèrent les zones d'ombre (identification de mines, de pipelines...). En revanche, dans le cas du suivi de fond, ce phénomène a pour conséquence la méconnaissance du relief marin dans les zones d'ombre. Afin de déterminer les limitations induites par ces dernières, nous nous proposons d'analyser leur construction et de comparer le résultat obtenu avec les zones inaccessibles calculées grâce à la méthode de suivi de fond en environnement connu.

III.4.2.b. Critère d'apparition d'une zone d'ombre

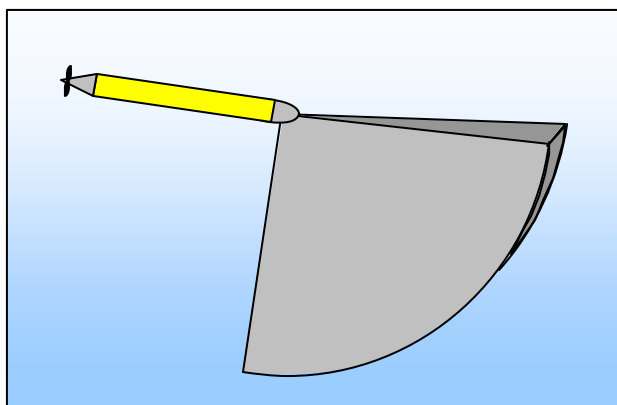


Figure 21 - Faisceau ultrasonique

On suppose que le véhicule étudié est équipé d'un système qui insonifie une tranche verticale de faible largeur (1 ou 2 degrés) et de grande ouverture (90 degrés). Ce type de faisceau acoustique est obtenu par exemple avec un sonar à balayage (Figure 21).

Dans ces conditions, il est aisé de constater (Figure 22) que les zones d'ombre débutent lorsque la droite tangente au profil de fond croise l'émetteur d'ondes acoustiques et lui passe

au-dessus. Cette droite tangente porte alors le nom de « rayon rasant » et la zone d'ombre prend fin là où ce rayon coupe le profil de fond.

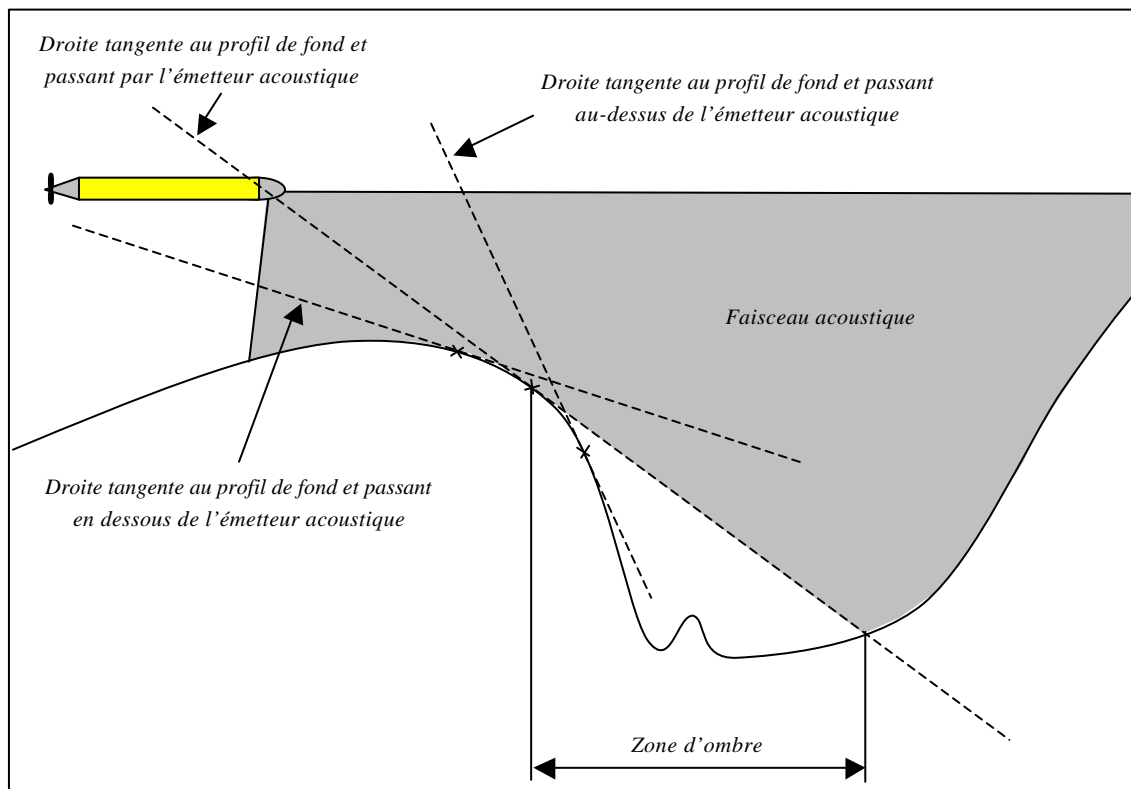


Figure 22 - Limites d'une zone d'ombre

III.4.2.c. Danger potentiel des zones d'ombre

Supposons que le véhicule se déplace sur une trajectoire planifiée construite au fur et à mesure en appliquant au profil de fond perçu la méthode décrite dans le chapitre précédent. La survenue d'une zone d'ombre se manifeste par un trou dans le profil de fond détecté, c'est-à-dire par l'absence de mesure de profondeur sur un certain intervalle. Dès lors deux situations sont envisageables :

- ✓ Si le rayon rasant marquant le début de la zone d'ombre a une pente supérieure ou égale à q_{max} , alors les profondeurs de cette zone d'ombre n'ont pas besoin d'être connues. En effet, compte tenu des contraintes physiques du véhicule, les points de cette zone ne seraient de toutes façons pas accessibles et la trajectoire de suivi de fond générée sera un segment de droite de pente q_{max} .
- ✓ Si le rayon rasant marquant le début de la zone d'ombre a une pente inférieure à q_{max} , alors des points de la zone d'ombre sont susceptibles de nécessiter un suivi de fond

adapté, c'est-à-dire un calcul de trajectoire les prenant en compte. Quoi qu'il en soit, la profondeur de ces points est nécessairement inférieure à la profondeur du point de rasance où débute la zone d'ombre. Dans le cas contraire, ces points seraient détectés car il ne seraient pas dans la zone d'ombre. La stratégie de suivi de fond consiste à construire une trajectoire (méthode décrite précédemment en environnement connu) qui parte de la position actuelle du robot et qui aille jusqu'à la mesure de profondeur la plus éloignée (au-delà de la zone d'ombre). Cette dernière précaution permet de tenir compte des remontées de profil de fond. Le véhicule peut alors sans danger suivre cette trajectoire, jusqu'à ce qu'il se trouve au-dessus du point marquant le début de la zone d'ombre. Une fois, ce point atteint, la visibilité du fond s'est améliorée et la zone d'ombre n'en est plus une. Une nouvelle trajectoire peut alors être calculée, qui poursuit la précédente.

III.4.3. Algorithme

En l'absence de zone d'ombre, la méthode en environnement inconnu consiste à appliquer la méthode de suivi en environnement connu aux échantillons de profondeur relevés au cours du déplacement du véhicule. Chaque fois que le véhicule atteint l'extrémité d'une trajectoire planifiée, il a avancé et acquis de nouvelles données bathymétriques qui lui permettent de planifier une nouvelle trajectoire poursuivant la précédente.

Lorsqu'une zone d'ombre apparaît dans le profil de fond relevé par le véhicule (absence de mesure sur une portion du profil), la démarche suivante est adoptée :

- ✓ On détecte le début de la zone d'ombre (trou dans le profil de fond).
- ✓ On calcule une trajectoire de suivi de fond à partir de la position du véhicule, jusqu'à l'extrémité du profil de fond (prise en compte d'une éventuelle diminution des profondeur).
- ✓ Le véhicule parcourt la trajectoire ainsi planifiée, jusqu'à ce qu'il atteigne le début de la zone d'ombre.
- ✓ Dès lors, le véhicule, qui a acquis les informations bathymétriques de la zone d'ombre, les exploite pour calculer la nouvelle trajectoire qui vient continuer celle qu'il vient d'accomplir.

La trajectoire suivie par le véhicule en procédant de cette manière est théoriquement identique à celle que l'on aurait obtenue en appliquant la première méthode à un profil de

fond connu *a priori*. Les simulations (chapitre IV) permettront de vérifier la validité de cette méthode.

III.4.4. Adaptation de la méthode de suivi au véhicule Taipan

III.4.4.a. Dispositif bathymétrique

Dans le cas du véhicule *Taipan*, pour réaliser les acquisitions bathymétriques nécessaires à la méthode de suivi de fond inconnu, la solution technique la plus adaptée consiste à équiper le véhicule de deux sondeurs placés à l'avant et orientés comme l'indique la Figure 23.

Les raisons techniques de ce choix seront détaillées dans le chapitre IV. Elles reposent sur des considérations énergétiques, sur l'optimisation de la charge embarquée par le véhicule et sur les caractéristiques physiques des faisceaux de sondeurs.

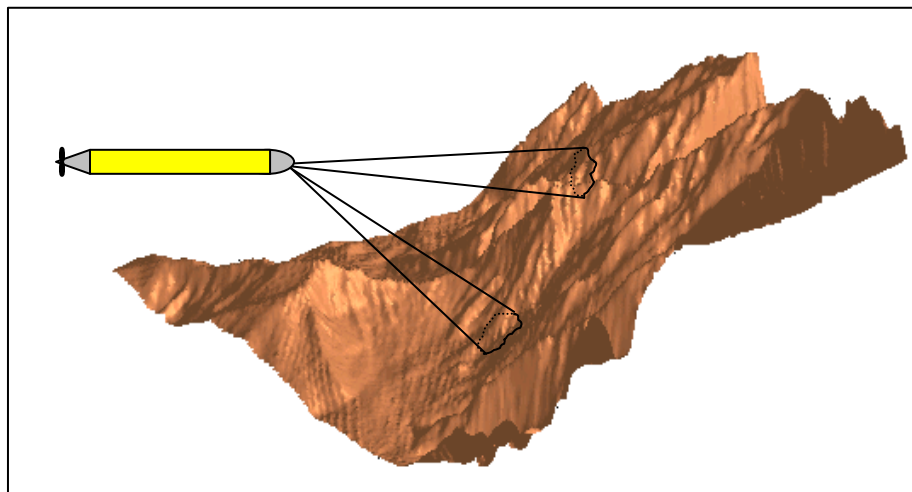


Figure 23 - Orientations des deux transducteurs reliés au sondeur

Afin de vérifier qu'ils permettent d'appliquer la méthode de suivi de fond inconnu, analysons les caractéristiques des faisceaux acoustiques obtenus avec ce dispositif.

III.4.4.b. Caractéristiques du faisceau acoustique

L'émetteur considéré est constitué d'un transducteur piézo-électrique oscillant placé à l'intérieur d'un cylindre de longueur théoriquement très supérieure à la longueur d'onde (Figure 24).

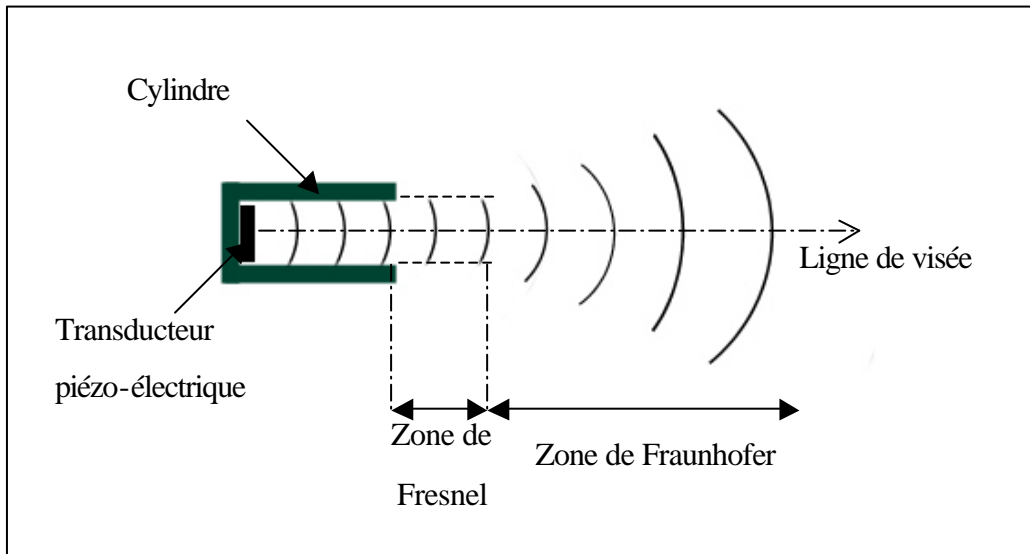


Figure 24- Dispositif d'émission d'ondes acoustiques

La modélisation du faisceau ultrasonique engendré par ce dispositif est différente selon la distance à laquelle on se trouve de l'émetteur (cylindrique).

On distingue deux zones (Figure 24) :

- La zone de Fresnel : c'est la zone la plus proche du dispositif d'émission pour laquelle $r < l/r_c$, où r est la distance entre le point considéré et l'orifice d'émission, l la longueur d'onde de l'onde acoustique émise, et r_c est le rayon du cylindre d'émission. Dans la zone de Fresnel, l'enveloppe de propagation du faisceau est cylindrique de rayon r . La longueur d'onde est donnée par la relation $l = c/f$, où c est la célérité du son dans l'eau de mer. Dans notre cas, $f = 200\text{kHz}$, $c \gg 1500\text{m.s}^{-1}$ et $l = 7.5\text{mm}$. Pour des cylindres émetteurs subaquatiques dont l'ordre de grandeur du rayon est le centimètre, la zone de Fresnel est donc très restreinte (sub-millimétrique). Etant donné les grandeurs à mesurer (plusieurs mètres ou décamètres), nous ne tiendrons pas compte de la zone de Fresnel.
- La zone de Fraunhofer : pour les distances supérieures à l/r_c , le faisceau acoustique est divergent. L'expression de la diffraction « à l'infini » ou diffraction de Fraunhofer est obtenue en appliquant le principe de Huygens-Fresnel à une onde diffractée par une ouverture circulaire. A fréquence d'émission fixe, l'amplitude A du faisceau dépend de la distance r et de l'angle q par rapport à la ligne de visée (Eq 39).

$$A(r, q) = \frac{A_o r_o}{r} \frac{J_1\left(\frac{2pr_c}{l} \sin q\right)}{\frac{2pr_c}{l} \sin q} \quad (\text{Eq 39})$$

où $J_1(\)$ est la fonction de Bessel du premier ordre, l est la longueur d'onde du signal sonore émis, r_c est le rayon du cylindre du dispositif d'émission et A_o est l'amplitude de la pression de propagation du faisceau le long de la ligne de visée à une distance r_o de l'émetteur.

La figure de diffraction présente une symétrie de révolution et est donc constituée d'anneaux. Le demi-angle au sommet du premier anneau de pression acoustique nulle correspond au premier zéro de la fonction de Bessel de l'équation (Eq 39). Cette fonction s'annule pour $\sin q = \frac{1.22l}{2r_c}$.

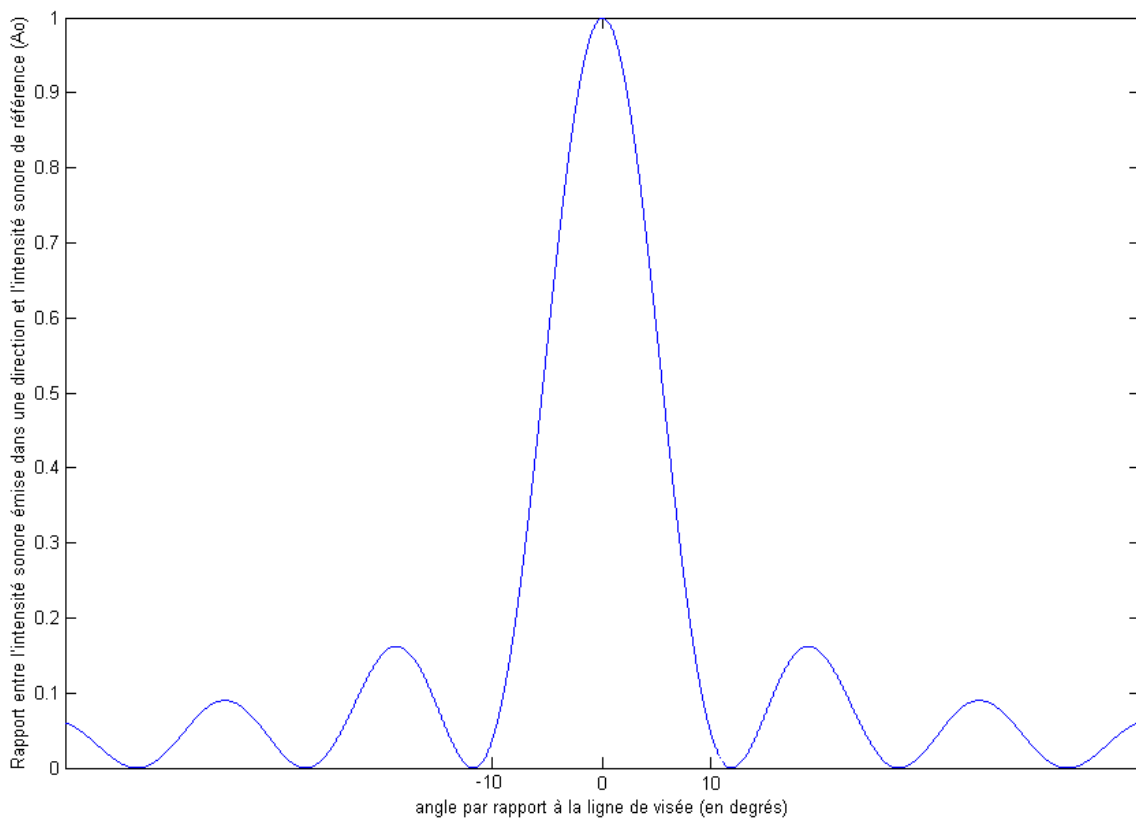


Figure 25 - Intensité acoustique en fonction de $\sin(q)$

L'amplitude de l'onde acoustique dans les autres anneaux décroît très rapidement (Figure 25), c'est pourquoi nous ne considérerons que le lobe primaire du faisceau. On note q_o l'angle au sommet de ce lobe (Eq 40).

$$q_o = 2 \sin^{-1} \left(\frac{0.61I}{r_c} \right) \quad (\text{Eq 40})$$

Dans le cas des transducteurs utilisés sur *Taipan*, on a $q_o = 22^\circ$.

III.4.5. Incertitudes de localisation

III.4.5.a. Erreurs de mesure bathymétrique : distance et angle

Nous venons de le voir, le faisceau de détection des sondeurs est un cône d'angle au sommet q_o , à l'intérieur duquel tout obstacle est détecté, sans que l'on puisse en connaître la position angulaire.

La mesure de la distance séparant le capteur de l'obstacle est elle aussi entachée d'incertitude. La précision de cette mesure dépend essentiellement de la connaissance de la vitesse de propagation du son dans l'eau. En effet, il s'agit de mesurer le temps de vol du son pour parcourir la distance (aller et retour) qui sépare le sondeur de l'obstacle, puis de diviser la valeur obtenue par deux fois la vitesse du son dans l'eau. Voisine de 1500m.s^{-1} , cette dernière augmente lorsque les paramètres suivants augmentent [GRA] :

- ✓ Température
- ✓ Salinité
- ✓ Pression

La température et la pression de l'eau varient avec la profondeur, le profil de vitesse du son dans l'eau en fonction de la profondeur est discontinu et non-linéaire. La température de l'eau varie par couches qui ne se mélangent pas à cause de la différence de densité. Elle peut être modifiée également par la présence de sources froides ou chaudes dont la différence de salinité augmente encore la faible miscibilité avec le reste de la masse d'eau. Le brassage mécanique des eaux par la houle et les courants marins augmentent encore la difficulté à modéliser correctement le profil de vitesse du son dans l'eau.

Compte tenu de la profondeur d'opération du véhicule (moins de 100 mètres) et en supposant que le véhicule navigue en Mer Méditerranée, nous considérerons que la vitesse de propagation du son dans l'environnement d'évolution du véhicule est connue à **4,8%** près autour d'une vitesse de référence de 1520m.s^{-1} l'été et de 1480m.s^{-1} l'hiver [GRA].

Ceci correspond à une gamme de variations conjointes de **5%** pour la salinité, de **6°C** pour la température et de **10 bars** pour la pression (variations de pression en immersion dans les 100 premiers mètres).

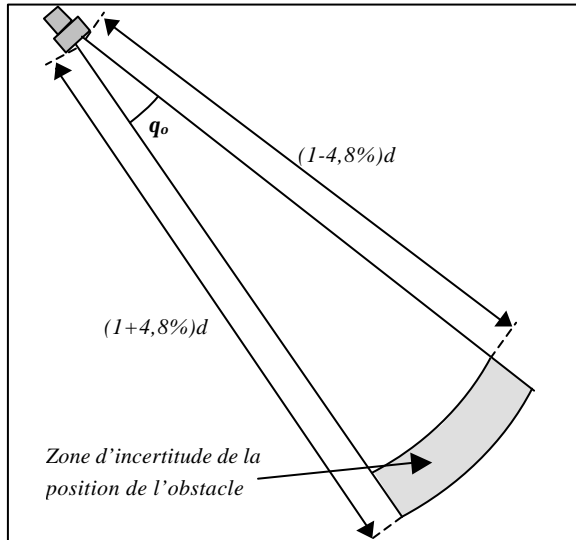


Figure 26 - Erreur de localisation de l'obstacle

Si l'on considère simultanément les incertitudes de position angulaire et de distance dans l'espace à 2 dimensions qui nous intéresse, on obtient la portion de faisceau à l'intérieur de laquelle un obstacle détecté est susceptible de se trouver. Il s'agit de la zone délimitée par deux arcs de cercle d'angle q_0 et dont les rayons sont respectivement $(1-4,8\%)d$ et $(1+4,8\%)d$, où d est la distance mesurée par le sondeur (Figure 26).

III.4.5.b. Erreurs de mesure bathymétrique : Echos multiples

Le phénomène des échos multiples est l'un des problèmes majeurs des systèmes d'écholocation, de télémétrie ou de communications sous-marines.

Il se produit la plupart du temps entre la surface et le fond marin, mais peut aussi intervenir dans une lame d'eau de densité différente qui fait office de guide d'onde. Ce phénomène aboutit à des mesures aberrantes. Cela se manifeste fréquemment par des mesures de distances égales à des multiples de la distance vraie.

Dans le cas des sondeurs grand-public que nous utilisons, ce problème est écarté. En effet, c'est le premier écho perçu qui est considéré comme valable. Les échos dus aux rebonds sur la surface après rebond sur le fond parviennent en effet plus tard et ne sont pas pris en compte. De plus, contrairement aux systèmes omnidirectionnels rencontrés dans certains modèles de modems acoustiques, le fait que l'émission des sondeurs soit unidirectionnelle limite considérablement les échos dus aux lames d'eau. Dans ce qui suit, nous ne tiendrons donc pas compte de ce phénomène. Les essais en mer (Chapitre IV) confirment la validité de cette hypothèse.

III.4.5.c. Erreur due à l'odométrie du véhicule

La seule information de positionnement absolu disponible sous la mer est le calcul de la profondeur par mesure de la pression. Les véhicules sous-marins disposent de ce type de capteur de pression, dont la précision dépend de la plage d'utilisation. Dans le cas des

véhicules de petits fonds, on obtient facilement des précisions de l'ordre de 0,01% (capteur de type *paroscientific*).

Pour le positionnement absolu en latitude et longitude, en revanche, on ne dispose d'aucun moyen extérieur et les déplacements du véhicule doivent être estimés à partir des informations délivrées par les capteurs d'attitude (inclinomètres, compas) et à partir d'une estimation de la vitesse (en fonction de la commande appliquée au propulseur ou en utilisant un loch Doppler). Plusieurs types de perturbations induisent des erreurs de positionnement :

- ✓ Les erreurs de mesure des capteurs proprioceptifs du véhicule (capteurs d'attitude)
- ✓ L'incertitude sur l'estimation de la vitesse du véhicule
- ✓ Les perturbations extérieures telles que le courant marin (cause la plus fréquente)

Puisque notre étude se limite au cas à deux dimensions (navigation dans un plan vertical), nous supposons que le courant marin est suffisamment faible pour que la dérive du véhicule soit négligeable entre deux planifications de trajectoire consécutives.

Dans le cas de Taipan, la précision des capteurs d'attitude est inférieure à 1°, et la vitesse est connue à 1% près. Si l'on considère que la distance séparant deux calculs de trajectoire consécutifs est toujours inférieure à 20 mètres (hypothèse réaliste), alors l'erreur d'estime sur la distance parcourue est inférieure à 20 cm. La variation latérale de position due à l'erreur angulaire est, quant à elle, inférieure à 35cm.

III.4.5.d. Compensation des données

Lors de la détection brute du fond marin, l'erreur verticale de localisation d'un impact peut dépasser 3,5 mètres pour un obstacle situé à 10 mètres devant le véhicule (ouverture angulaire de faisceau acoustique=22°). Une telle incertitude n'est évidemment pas acceptable pour l'accomplissement du suivi de fond et nous avons dû développer un algorithme permettant de traiter les données obtenues. Il repose sur le traitement groupé de plusieurs échantillons consécutifs en tenant compte des propriétés géométriques des faisceaux acoustiques et du fond marin. Le détail de cet algorithme est donné en annexe. Il permet d'atteindre une précision de localisation de l'ordre de 50 cm pour un obstacle situé à 10 mètres du véhicule.

III.4.6. Limites

Dans ce qui précède, nous avons supposé que le fond marin était «régulier», c'est-à-dire qu'il ne présentait pas de discontinuités importantes. La prise en compte des cas où le

véhicule se trouve confronté à un aplomb sous-marin (ou falaise sous-marine) nécessite un troisième sondeur orienté, cette fois-ci, vers le haut. La méthode que nous utilisons alors diffère complètement de celle qui vient d'être exposée et lui est complémentaire.

III.5. Méthode de détection et d'évitement des falaises

Le 17 juin 2000, le véhicule sous-marin autonome Autosub s'abîmait en mer dans le détroit de Sicile. Il resta bloqué sous le surplomb d'une falaise sous-marine pendant près d'un mois avant d'être récupéré. Les lignes qui suivent relatent le déroulement des opérations :

>>AUTOSUB RETURNS FROM ITS LONGEST MISSION YET

Mission 240 began much like a score of previous unescorted runs for Autosub. It was 0155 UTC on Saturday 17 June 2000. The task for this 22-hour mission was to study the physics of the overflow from the Eastern to the Western Mediterranean Sea in the Strait of Sicily. Dr David Smeed, the chief scientist, with a successful 170 km mission already under his belt, this time required the vehicle to follow the terrain at a height of 30 m. Autosub would be making measurements from two CTDs, upward and downward looking ADCPs and a nose-mounted turbulence probe.

Following launch, Autosub engineers on the RV Urania verified that the vehicle was working correctly and on track to the first waypoint. Urania then left the vehicle to do its job while it carried out a complementary CTD survey over the sill - all part of the new way of working made possible by autonomous vehicles. Urania was first to the rendezvous point - two hours early. At 0000 UTC on the 18th, Autosub should have arrived. It didn't. After two hours, the 'vehicle failed to rendezvous' procedure began with a local search using satellite, radio and acoustic navigation aids. With no contact obtained, the search was extended along the planned track of Autosub. At 0725 UTC on Monday 19th contact was made with two of the acoustic transponders on the vehicle - just in time to reach the SOC Director's desk before he read the note about the 'loss'. The acoustic navigation system showed that the vehicle was on the bottom, at a depth of about 340 m. An echo sounder survey revealed a steep 150 m high cliff rising from 450 m with a nearly perpendicular slope just about where Autosub seemed to be.

Back at the SOC Nick Millard was soon in touch with their insurance broker, underwriter and legal advisor. Through many contacts in the UK and Italy they soon established that the best option for recovering Autosub was a ROV. They were impressed by the interest shown by several organizations

in the job of recovering Autosub; in the end the job went to Sonsub using the Polar Prince equipped with two Innovator ROVs. Happily, the vessel was soon to leave the Black Sea, in transit to the North Sea via S the Strait of Sicily.

At 0930 on Thursday 6 July Nick Millard and Steve McPhail boarded Polar Prince at the Autosub site, having already confirmed that the vehicle was at the original location using an interrogator mounted on their 'water taxi'. Within two hours of launching the ROV Autosub was located - some 40m west of the estimated position. Not only was the cliff vertical - there was an overhang. Autosub was stuck beneath the overhang - with a damaged nose, but otherwise in good shape. It had been able to cope with the scarp, it had tried valiantly to deal with the vertical face of the cliff, but the overhang had been too much. For the ROV the recovery was a simple job - grab the bracket near the rudder - pull gently to drag Autosub clear of the overhang and then let it rise slowly by itself to the surface.

With the vehicle now back in the UK and all of the data downloaded from its 'black box' the task of assessing the details of the collision begins. SOC are grateful for the help given to them by colleagues in the UK and Italy - to the crews of Urania and Polar Prince, staff at the Centro Oceanologico Mediterraneo in Palermo, especially Salvo Cannata, Marco Berta and David, Ray Morgan and Giovanni Corbetta at Sonsub, their brokers Tyser & Co. and Leviathan, their underwriters. Russell Jones, Ian White and Nick Gaskell from Southampton reacted with impressive speed to help us with the formalities.

>>

Cette mésaventure illustre l'importance d'une détection efficace des falaises sous-marines lors de l'accomplissement du suivi de fond. Un véhicule sous-actionné non-holonyme ne peut pas éviter un aplomb sans avoir anticipé sa manœuvre. Pour cela, il faut, comme dans le cas du suivi de fond, tenir compte des capacités de mouvement du véhicule.

Nous nous proposons à présent d'étudier la manière la plus efficace (en termes de réactivité) d'éviter un aplomb. Cela suppose l'étude préalable d'une «trajectoire maximale d'évitement», ainsi que l'adjonction d'un dispositif acoustique de détection supplémentaire. Le faisceau de ce dernier sera décomposé en trois zones de perception qui permettront de classer les échos acoustiques reçus. Enfin, nous étudierons quel est l'angle d'inclinaison optimal pour le dispositif de détection de falaises [CRE02].

III.5.1. Hypothèses

III.5.1.a. Environnement

Nous supposons que la fonction mathématique qui relie la profondeur du fond marin à son abscisse est bijective. Cela signifie qu'à une abscisse ne correspond qu'une profondeur et que, par conséquent, les aplombs existent mais pas les surplombs. Nous supposons en outre qu'il n'y a pas d'obstacle flottant dans la zone d'opération. Pour cette partie de l'étude du suivi de fond, nous supposons que le fond est plat jusqu'à ce qu'un aplomb (falaise sous-marine) survienne.

III.5.1.b. Sondeur supplémentaire

Pour les raisons détaillées précédemment, le dispositif supplémentaire de détection de falaises est un sondeur mono-faisceau. Il est placé avec les deux autres sondeurs dans le nez de Taipan, et il est orienté vers le haut, formant avec l'axe longitudinal du véhicule un angle a (Figure 27). Nous verrons plus tard quels critères permettent de choisir cet angle (cf. III.5.6).

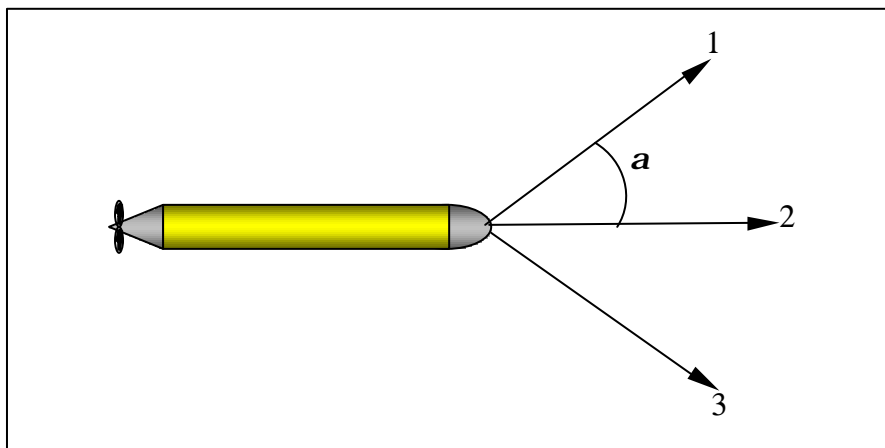


Figure 27 - Orientation des sondeurs

III.5.2. Trajectoire maximale d'évitement

III.5.2.a. Existence

L'étude de la courbe L/Rg (cf. §II.2.4.a et Figure 10) a permis de conclure que lorsque les barres de plongée sont inclinées au maximum, le rayon de giration du véhicule est minimal. En outre, les efforts hydrodynamiques augmentant lorsque la vitesse de déplacement dans le fluide augmente, l'efficacité des barres de plongée augmente, elle aussi, avec la vitesse. Ainsi, en inclinant les barres de plongée au maximum et en augmentant la vitesse du

véhicule, ce dernier va cabrer et décrire une trajectoire d'urgence, dite « trajectoire maximale d'évitement ».

III.5.2.b. Détermination

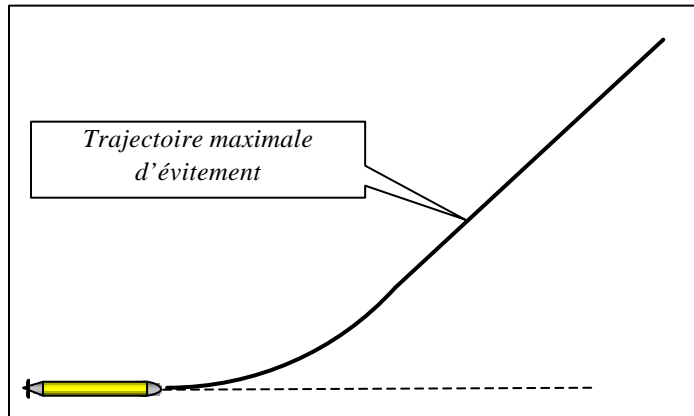


Figure 28 - Trajectoire maximale d'évitement

Le modèle dynamique du véhicule n'étant pas intégrable analytiquement, on ne peut obtenir directement l'expression de la trajectoire maximale d'évitement. On ne peut déterminer cette trajectoire que de deux façons :

- ✓ Soit par intégration numérique du modèle dynamique à vitesse maximale avec les gouvernes inclinées au maximum.
- ✓ Soit expérimentalement, si l'on dispose d'un système de positionnement ou de suivi du véhicule suffisamment précis (base ultracourte, système optique).

III.5.3. Zones de perception

Lorsqu'un sondeur perçoit un écho acoustique, cela signifie qu'un obstacle se trouve dans la direction vers laquelle le transducteur pointe. Lorsque ce cas se produit, il serait intéressant de déterminer le type d'obstacle auquel on est confronté. C'est plus précisément, la hauteur de l'obstacle qui nous intéresse dans le cas de l'évitement de falaises. Ainsi, il serait avantageux de pouvoir déterminer lorsqu'un écho est perçu, s'il correspond ou non à un sommet de falaise et si l'évitement sera ou non possible. Afin de classer les différents échos, nous allons définir trois zones de perception le long du faisceau acoustique du sondeur supérieur (noté 1 sur la Figure 27) : la zone A, appelée «Zone de Limite de Portée », la zone B, appelée «Zone Sure » et la zone C, appelée «Zone Dangereuse » (Figure 29). Nous verrons ensuite comment exploiter les échos perçus dans ces trois zones.

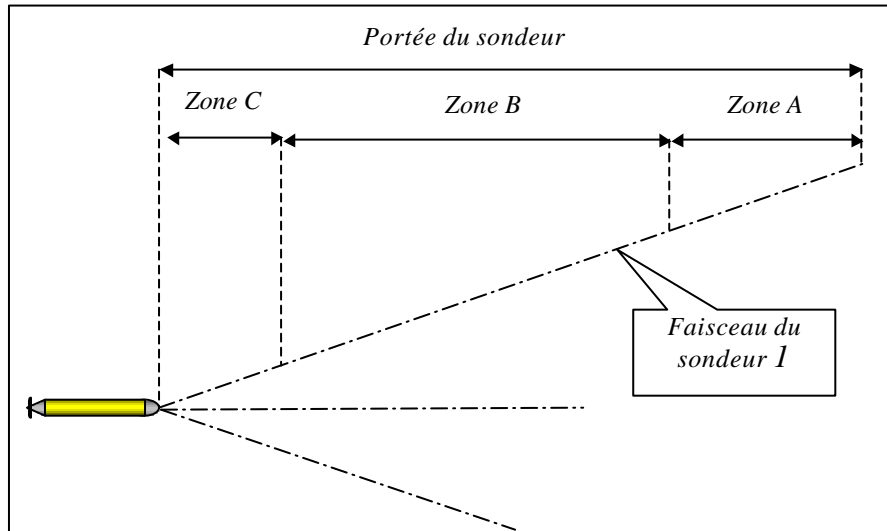


Figure 29 - Les trois zones de perception (A,B,C)

III.5.3.a. Zone de limite de portée

Cette zone, notée A, dépend de la portée du sondeur, de son orientation \mathbf{a} , de sa période d'échantillonnage T et de la vitesse v de déplacement du véhicule.

En haut de la Figure 30, on voit un véhicule qui s'approche d'une falaise sous-marine. A l'instant t , la falaise est hors de portée du sondeur et ne renvoie par conséquent aucun écho acoustique décelable.

En bas de la Figure 30, on a représenté le même véhicule, à l'instant $t+T$, où T représente la période d'échantillonnage du sondeur. Entre les instants t et $t+T$, le véhicule a avancé d'une distance égale à $v.T$, de sorte que le sondeur peut explorer plus loin et déceler la présence de la falaise.

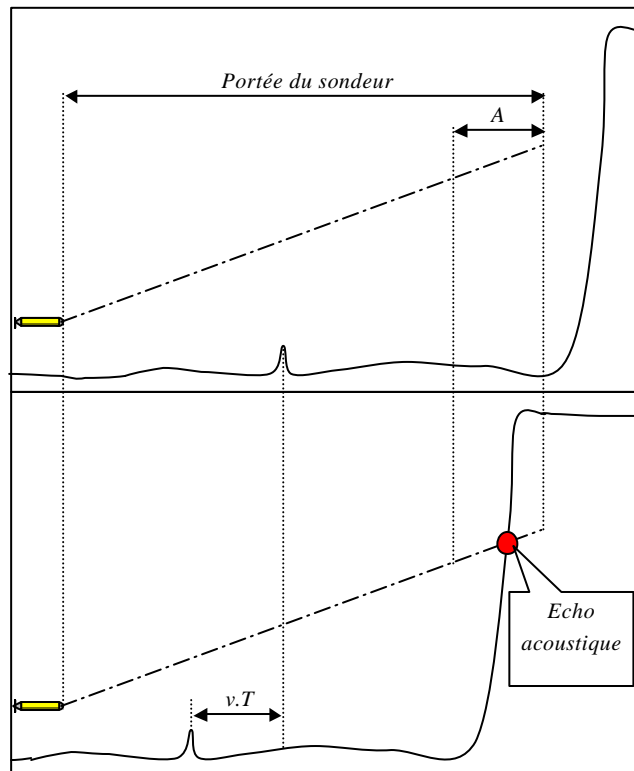


Figure 30 - Détection d'une falaise dans la «zone limite de portée». Positions du véhicule aux instants t et $t+T$

Comme le montre la figure, cet écho ne nous fournit aucune information concernant la hauteur totale de la falaise. De la même manière, tout écho perçu dans la «Zone de Limite de

Portée » correspondra à un obstacle de hauteur inconnue. La «Zone de Limite de Portée » est donc la portion de longueur $\frac{vT}{\cos\alpha}$ située à l'extrémité du faisceau acoustique supérieur.

III.5.3.b. Zone sure

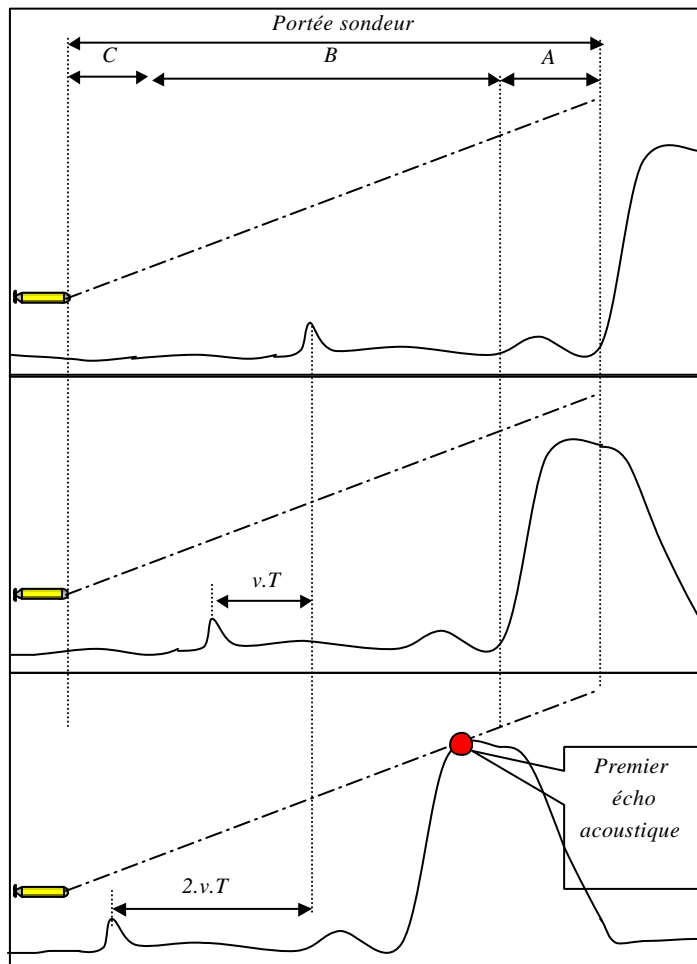


Figure 31 - Trois instants d'échantillonnage : t , $t+T$, $t+2T$.
Détection de sommet dans la «zone sure» (B).

La Figure 31 montre la position d'un véhicule sous-marin lors de trois instants d'échantillonnage consécutifs : t , $t+T$, $t+2T$.

Si le premier écho acoustique d'une falaise est reçu dans la partie du faisceau appelée « Zone Sure », on a la certitude que cet écho correspond au sommet de la falaise. En effet, nous avons vu précédemment qu'à cause de la période d'échantillonnage et de la portée des sondeurs, une falaise plus haute aurait été perçue dans la « Zone de Limite de Portée ».

III.5.3.c. Zone dangereuse

Cette zone correspond à la partie du faisceau acoustique située trop près de la « trajectoire maximale d'évitement » définie au paragraphe III.5.2. Notée C, cette zone commence au niveau du véhicule et s'arrête là où la distance entre le faisceau acoustique et la « trajectoire maximale d'évitement » devient supérieure à la « marge de sécurité » (Figure 32).

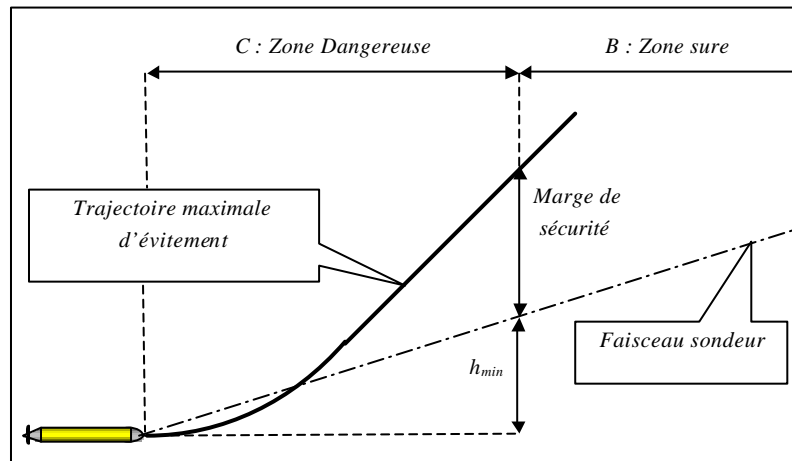


Figure 32 - La « zone dangereuse » (C)

Lorsqu'un obstacle est détecté dans cette zone du faisceau, le véhicule ne pourra pas l'éviter sans l'approcher à une distance inférieure à la « marge de sécurité ». Il sera alors susceptible d'entrer en collision avec l'obstacle. La « marge de sécurité » est choisie en fonction des différentes incertitudes du système (modèle dynamique, erreurs de positionnement, précision des sondeurs).

Puisque le véhicule n'a pas les capacités lui permettant d'éviter l'obstacle en toute sécurité, il doit stopper son propulseur et se laisser remonter à la surface sous l'effet de la poussée d'Archimède (due à une flottabilité naturelle positive du véhicule, au vidage des ballasts ou encore à un délestage mécanique). Une autre solution pourrait consister en une manœuvre d'évitement latéral (changement de cap ou remontée en spirale) mais supposerait l'installation de capteurs acoustiques supplémentaires.

Cependant, la détection d'obstacle dans la « Zone Dangereuse » est sensée ne jamais se produire. En effet, une manœuvre de précaution est accomplie dès que le sondeur horizontal (numéroté 2 sur la Figure 27) perçoit un écho dans la « Zone Dangereuse ». Ceci est décrit dans le paragraphe III.5.5.b.

III.5.4. A propos de la « Zone Sure »

III.5.4.a. Faisceau conique

Le véhicule navigue à une vitesse constante $v=1.8m.s^{-1}$ et ses trois sondeurs acquièrent des échantillons de distance à une fréquence d'échantillonnage $T=1s$. Ainsi, entre deux mesures de distance accomplies par le même transducteur, le véhicule s'est déplacé de $v \times T = 1.8 \times 1 = 1.8mètre$. Puisque le sondeur 1 (Figure 27, page 73) est orienté d'un angle α par rapport à l'axe longitudinal du véhicule, la variation verticale de la position de l'extrémité du

faisceau acoustique est théoriquement égale à $d=v.T.\tan(\mathbf{a})$. Ceci correspond à *65 centimètres* lorsque $\mathbf{a}=20^\circ$. Si l'on suppose que l'angle d'ouverture du faisceau acoustique est de l'ordre de 5° , la distance d n'a plus de signification (en termes de perception) dès lors que l'obstacle est situé à plus de *7.5 mètres* du véhicule. Ceci justifie le fait que l'on puisse considérer que le premier écho d'un obstacle perçu dans la « Zone Sure » corresponde au sommet de cet obstacle.

III.5.4.b. Hauteur maximale détectable

La hauteur maximale d'une falaise détectée dans la « Zone Sure » est notée h_{max} . Elle est donnée par (Eq 41).

$$h_{max}=MN+(range-v.T_e)\sin \mathbf{a} \quad (\text{Eq 41})$$

où MN est la « Marge de Navigation », qui correspond à la distance de consigne entre le véhicule et le fond pendant la navigation.

III.5.5. Algorithme

III.5.5.a. Obstacle détecté dans la « Zone Sure »

Tout obstacle détecté dans la « Zone Sure » est entièrement compatible avec les capacités de déplacement du véhicule. En effet, le sommet de cet obstacle est situé en dessous de la trajectoire maximale d'évitement (cf. §III.5.2). Ainsi, lorsqu'un écho d'obstacle est perçu dans la Zone Sure par le sondeur supérieur (noté 1 sur la Figure 27), la profondeur correspondante est répertoriée dans la carte locale embarquée que le véhicule crée à mesure qu'il se déplace. Une trajectoire d'évitement standard est alors calculée, en utilisant la méthode décrite au début de ce chapitre.

Lorsqu'un obstacle est détecté par le sondeur n°2 (horizontal) et n'est pas détecté par le sondeur n°1, on peut en déduire que le sommet de cet obstacle peut se trouver au-dessus du faisceau acoustique du sondeur n°2. La profondeur de cet obstacle est donc temporairement enregistrée dans la carte embarquée et sera mise à jour dès que le sondeur n°1 percevra l'écho du sommet de cet obstacle. Si la hauteur relative de cet obstacle, c'est-à-dire la différence entre la profondeur du véhicule et celle du sommet de l'obstacle, est supérieure à h_{min} , alors le sommet aura un écho dans la « Zone Sure ». Cet écho est alors simplement traité comme cela

est expliqué au début de ce paragraphe. Si, au contraire, la hauteur relative de l'obstacle est inférieure à h_{min} , le sommet n'aura pas d'écho dans la "Zone Sure". Dans ce cas, le processus décrit dans le paragraphe suivant va commencer lorsque l'obstacle approchera de la « Zone Dangereuse ».

III.5.5.b. Obstacle approchant de la « Zone Dangereuse »

Lorsqu'un obstacle approchant de la « Zone Dangereuse » est détecté par le sondeur horizontal (n°2) et n'est pas détecté par le sondeur supérieur (n°1), cela signifie que son altitude par rapport au véhicule est inférieure à h_{min} . Afin d'être certain que la distance entre l'A.U.V. et l'obstacle est supérieure à la marge de navigation MN (définie au §), la trajectoire du véhicule doit passer par un point situé à une distance $NM+h_{min}$ au-dessus de l'obstacle détecté. Ceci assure que la distance réelle d'évitement sera comprise entre MN et $NM+h_{min}$. Nous verrons plus tard, lors des simulations, qu'au cours du mouvement, la variation d'angle d'assiette va permettre de détecter le sommet recherché. La trajectoire sera alors recalculée et l'erreur de distance s'en verra réduite.

III.5.5.c. Echo perçu dans la "Zone Limite de Portée"

Un écho dans la "Zone limite de portée" peut signaler la présence d'une falaise sous-marine qui ne pourra être évitée étant donné les capacités de mouvement du véhicule. Afin de déterminer au plus tôt si le véhicule pourra ou non éviter la falaise, on fait varier l'angle d'assiette de sorte que le faisceau acoustique explore le haut de la falaise pour en trouver le sommet. On peut alors déterminer si l'évitement est possible. S'il ne l'est pas, le moteur est coupé ou un changement de cap dans le plan horizontal est envisagé (si des capteurs latéraux sont installés).

III.5.6. Détermination de l'angle d'inclinaison du transducteur

La valeur théorique de l'angle d'inclinaison α du sondeur supérieur en fonction de MN et h_{min} ne peut être connue précisément puisqu'elle dépend de la « trajectoire maximale d'évitement » (cf. §.III.5.2). Elle peut cependant être minorée en considérant un déplacement du véhicule satisfaisant aux contraintes physiques liées au rayon de giration minimal et à l'angle d'assiette maximal définis au paragraphe II.2.4.

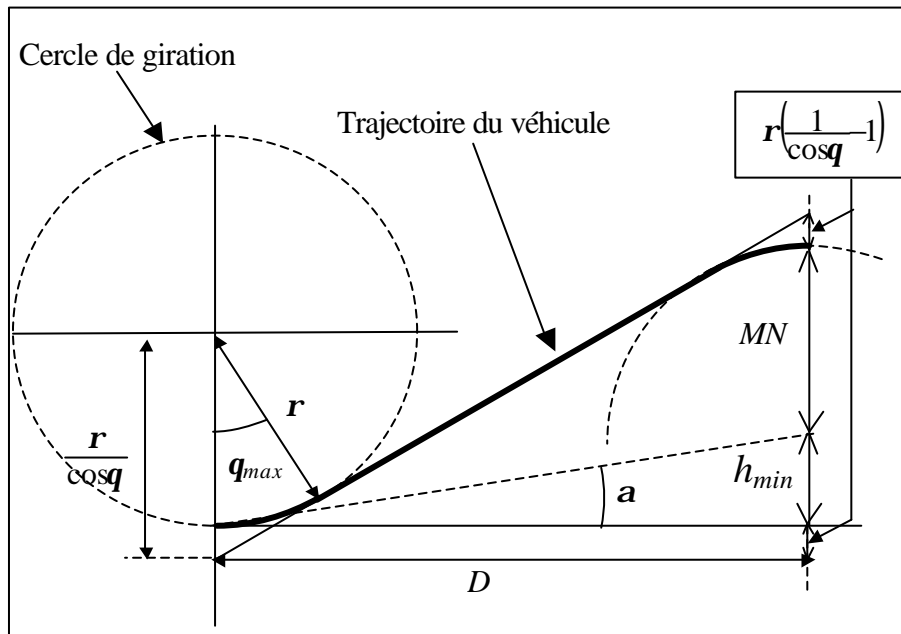


Figure 33 - Calcul de l'angle a_{min}

A partir de la Figure 33, on obtient l'équation (Eq 42) qui permet de déterminer la valeur minimale de l'angle d'inclinaison a pour le sondeur supérieur (Figure 34).

$$a_{min} = \arctan \left(\frac{h_{min} \tan q_{max}}{h_{min} + MN + 2r \left(\frac{1 - \cos q_{max}}{\cos q_{max}} \right)} \right) \quad (\text{Eq 42})$$

où r et q_{max} sont respectivement le rayon de giration minimal et l'angle d'assiette maximal du véhicule considéré. MN , h_{min} ont été définies précédemment et sont choisies en fonction du type de suivi de fond désiré.

Afin de tenir compte de l'angle d'ouverture du faisceau acoustique, il conviendra d'ajouter à a_{min} la valeur du demi-angle au sommet $q_o/2$ défini par (Eq 40). En effet, puisque nous avons supposé qu'il n'y avait pas de surplomb, les détections d'obstacles se feront nécessairement dans la partie inférieure du faisceau acoustique.

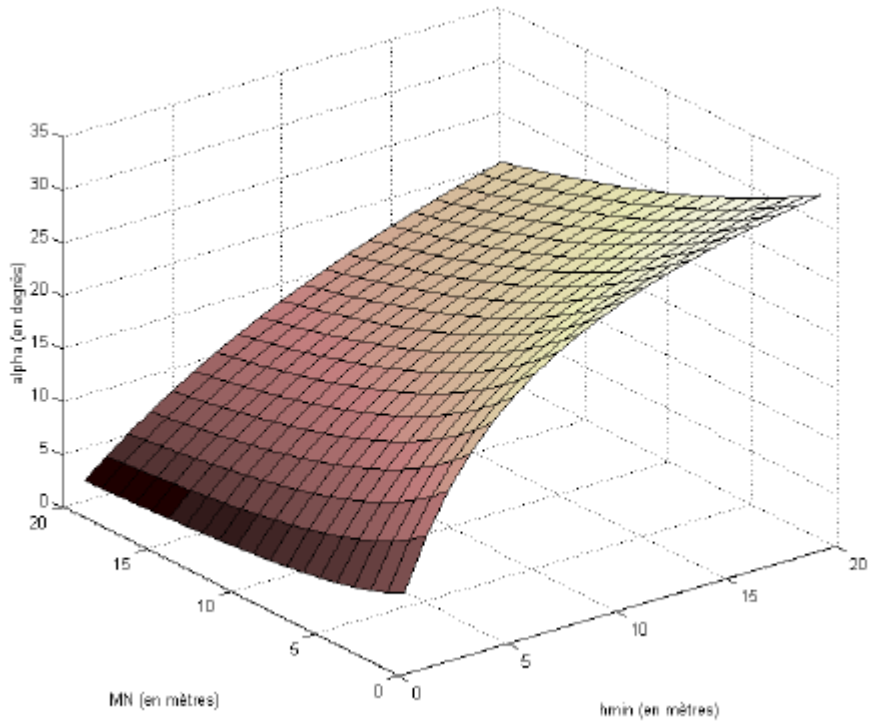


Figure 34- Courbe $\alpha=f(NM,h_{min})$

Le fait de diminuer h_{min} augmentera la précision du suivi de fond, mais diminuera aussi h_{max} , la hauteur maximale de détection des falaises marines (Eq 41)(Figure 35), augmentant ainsi le risque de voir la mission avorter.

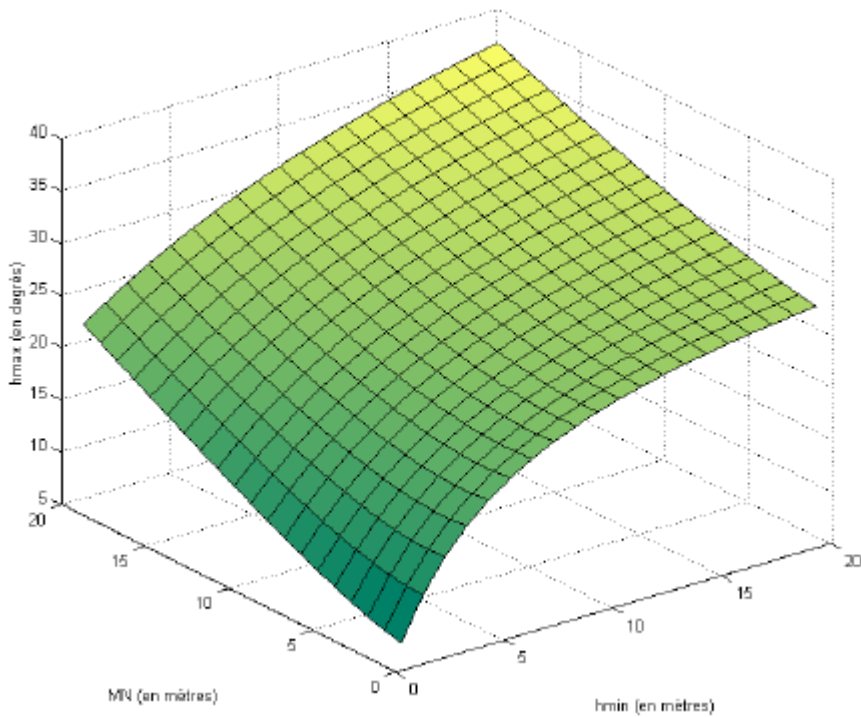


Figure 35- Courbe $h_{max}=g(NM,h_{min})$

La meilleure valeur de α dépend du type de suivi de fond désiré. Par exemple, le choix d'une grande valeur de α afin d'éviter les interruptions de missions se fera au détriment de la qualité du suivi de fond lorsque le véhicule naviguera près de petits monticules.

A l'inverse, si l'on sait à l'avance que le relief est régulier et ne comporte pas de falaise importante, il est préférable d'opter pour une faible valeur de l'angle α .

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une méthode de suivi de fond en environnement connu *a priori*. Les trajectoires planifiées tiennent compte des contraintes physiques de véhicules de type « torpille civile » tels que *Taipan*.

Nous avons également présenté une méthode de suivi de fond en environnement inconnu basée sur l'utilisation répétitive de la méthode de suivi de fond en environnement connu. Le renouvellement des calculs de trajectoires est dicté par la présence de zones d'ombre lors de la perception du fond marin, par l'absence de mesures dans le profil de fond et par la portée du sondeur inférieur.

L'adaptation de cette méthode sur le véhicule *Taipan* est compacte et économique. Les simulations (Chapitre IV) tenant compte à la fois des incertitudes odométriques et de la forme des faisceaux acoustiques permettront de comparer l'efficacité de cette méthode à celle utilisée en environnement connu *a priori*.

L'adjonction d'un sondeur supplémentaire sur le véhicule et la prise en compte d'une trajectoire d'évitement d'urgence prédéfinie permettent, nous l'avons vu, de détecter et d'éviter les falaises sous-marines dont la hauteur est comprise entre h_{min} et h_{max} .

Il n'existe pas de valeur optimale pour l'angle d'inclinaison de ce sondeur car le choix doit se faire en fonction du type de mission souhaité et du type de relief sous-marin susceptible d'être rencontré. La qualité de suivi de fond sera d'autant meilleure que la connaissance des caractéristiques du fond sera précise. Cependant, contrairement à la méthode de planification de trajectoire en environnement connu, la méthode d'évitement de falaises présentée ici, associée à la méthode de suivi de fond en environnement inconnu, présente l'avantage de ne nécessiter qu'une connaissance statistique du fond marin. En effet, aucune carte n'est nécessaire et seule la connaissance de la hauteur des plus grosses variations de profondeur est requise. Si aucune donnée n'est disponible, il est tout de même possible d'assurer la sécurité du véhicule (au détriment de la qualité du suivi de fond) en réglant

l'angle d'inclinaison du sondeur de sorte que h_{max} soit égal à la profondeur de navigation du véhicule.

Chapitre IV : Simulations et expérimentations

IV.1. Introduction

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus en simulation à partir de données bathymétriques réelles et artificielles. Les simulations tiennent compte du modèle de perception des capteurs présenté dans le chapitre III, ainsi que du comportement dynamique du véhicule autonome sous-marin *Taipan*. Nous détaillons les résultats obtenus par les méthodes de suivi de fond en environnement connu puis inconnu, ainsi que ceux obtenus avec la méthode prenant en compte les falaises sous-marines. Le suivi des trajectoires ainsi planifiées est simulé en appliquant la commande en mode glissant détaillée à la fin du deuxième chapitre. Des comparaisons entre les trajectoires obtenues par la méthode de suivi en environnement connu et celles obtenues par la méthode de suivi en environnement inconnu permettent de conclure quant à la validité de cette dernière. Enfin, la simulation du comportement du véhicule face à divers types de falaises sous-marines permet d'observer des trajectoires dont la théorie prévoit l'existence mais dont elle ne peut précisément prédire l'allure.

La deuxième partie du chapitre est consacrée à la validation expérimentale du dispositif acoustique de perception et des méthodes de suivi de fond. Nous commençons par expliquer pourquoi nous avons choisi les sondeurs comme dispositif bathymétrique. Pour cela, nous examinons les différents dispositifs acoustiques de mesure des profondeurs et des distances, puis nous justifions notre choix technique. Nous expliquons ensuite de quelle manière les sondeurs ont été implantés à bord du véhicule sous-marin autonome *Taipan*. Les résultats d'une première série d'essais, réalisés en milieu naturel dans l'Étang de Thau (Hérault), permettent de valider le fonctionnement de ce dispositif et d'établir une cartographie bathymétrique précise de la zone d'expérimentation.

A cette phase de vérification succèdent des expérimentations dont le but sera la validation de la méthode de suivi de fond en environnement inconnu et qui permettront de conclure sur son efficacité.

IV.2. Cadre des simulations

IV.2.1. Le simulateur

Les simulations ont été menées à l'aide du logiciel de calcul MATLAB, sur un ordinateur de type PC. La commande et les déplacements du véhicule ont été obtenus grâce au simulateur hydrodynamique de *Taipan*. Ce programme fonctionne sous environnement Matlab et utilise des fonctions en langage C. Il permet de simuler le comportement dynamique

du véhicule sous-marin Taipan en fonction de la commande appliquée, en prenant en compte les paramètres du modèle dynamique du véhicule. La validité de ce simulateur a été prouvée au cours des dernières années grâce à de nombreuses comparaisons avec des données réelles [VAG98].

IV.2.2. Variables d'état du système

Dans le simulateur, la position et l'attitude réelles du véhicule, ainsi que leurs dérivées premières sont connues en permanence. Ce sont les variables d'état du système ; elle servent à le caractériser et à calculer son évolution par intégration numérique du modèle dynamique. En revanche, pour planifier les trajectoires et générer la commande du véhicule, on utilise la position estimée du robot, obtenue directement ou par intégration des données fournies par des capteurs simulés. Ces données sont entachées d'erreur de la même manière que le sont celles obtenues durant les expérimentations en mer. Les mesures bruitées des capteurs sont simulées en ajoutant un bruit blanc aléatoire à la valeur théorique de la variable d'état concernée. Il s'agit de la profondeur d'immersion du véhicule et des angles et vitesses de roulis, de tangage et de lacet.

IV.2.3. Simulation des acquisitions bathymétriques

IV.2.3.a. Relevé bathymétrique réel

Pour simuler l'environnement dans lequel évolue le véhicule, nous avons utilisé deux cartes réelles des fonds marins. L'une est issue d'un relevé bathymétrique de la source de La Vise dans l'étang de Thau (Hérault, France) et l'autre représente une zone côtière méditerranéenne (Figure 36). Il s'agit de cartes dont les profondeurs varient entre 2 et 50 mètres. Lors des déplacements du véhicule, il est possible, à partir des variables d'état du système, de connaître la position du véhicule par rapport à la carte. Dès lors, à partir du modèle de capteur décrit dans le chapitre III et à partir des données de la carte, il est possible de simuler les acquisitions des sondeurs.

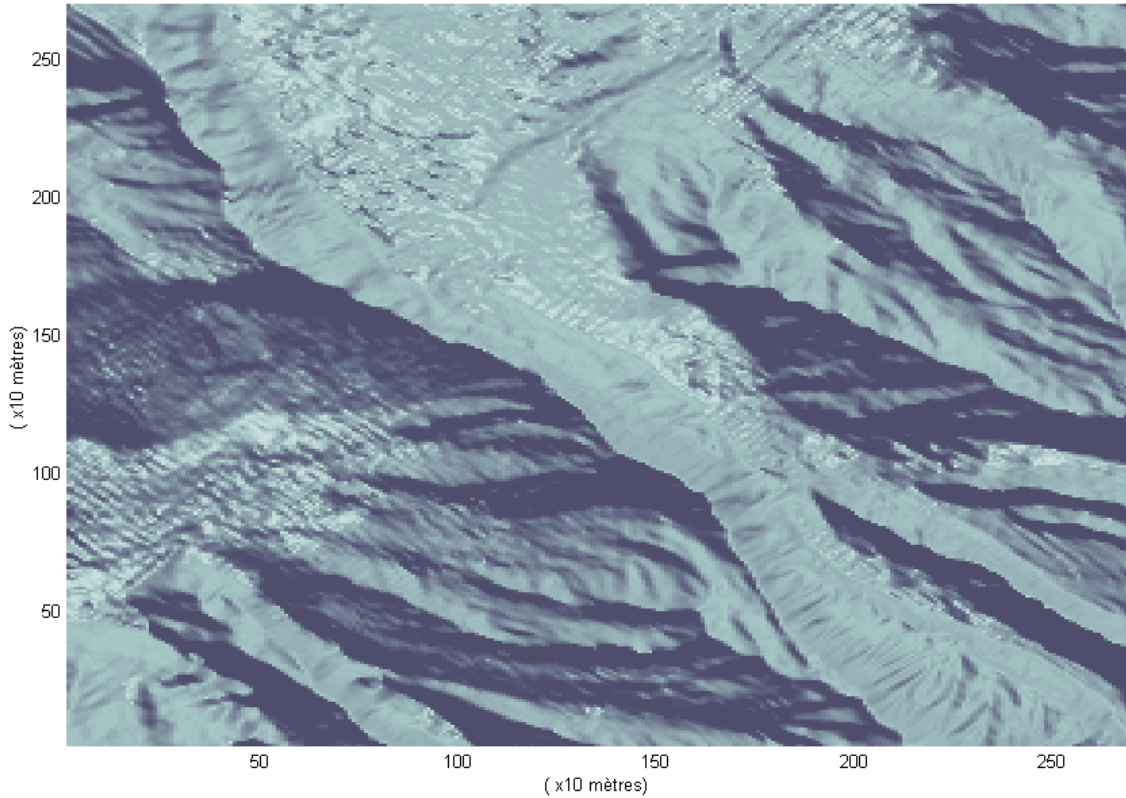


Figure 36 – Aperçu du relevé bathymétrique de la zone côtière

IV.2.3.b. Simulation du fonctionnement des sondeurs

Comme nous l'avons vu lors de l'étude des sondeurs (§ III.4.4.b), il est légitime de ne considérer que le lobe principal de leur faisceau d'émission et de modéliser ce dernier par un cône de demi-angle au sommet q_o :

$$q_o = \sin^{-1} \left(\frac{0.61I}{r_c} \right) \quad (\text{Eq 43})$$

où I est la longueur d'onde du signal sonore émis et r_c le rayon du cylindre du transducteur.

Pour simuler chaque acquisition de distance, nous utilisons les variables d'état du véhicule (non entachées d'erreur) pour déterminer la position et l'attitude de ce dernier par rapport à la carte. Nous calculons ensuite le cône d'émission du sondeur, et nous déterminons la surface d'intersection de ce cône avec la carte des fonds. Au sein de ce cône, le point de la carte dont la distance avec le sondeur est la plus courte correspond au premier écho perçu, donc à la distance mesurée.

La distance ainsi obtenue est ensuite affectée d'un bruit aléatoire dont l'amplitude maximale peut atteindre 4,8% de la distance, afin de tenir compte de l'incertitude de la vitesse de propagation du son dans l'eau de mer.

Enfin, la résolution des sondeurs utilisés (NAVMAN Plastimo Série 100) est prise en compte et l'on quantifie la distance à la dizaine de centimètres la plus proche.

IV.3. Méthode de suivi de fond en environnement connu

IV.3.1. Simulations sur données artificielles

Les simulations ont d'abord consisté à appliquer la méthode de génération de trajectoire à un profil de fond artificiel afin de vérifier le bon fonctionnement de l'algorithme. Puisque dans cette méthode on dispose d'une connaissance *a priori* des fonds marins, la simulation des acquisitions par les sondeurs n'est pas prise en compte. Les résultats obtenus montrent un bon fonctionnement de l'algorithme pour le traitement des sommets (Figure 37). En revanche, des problèmes de discontinuité de la dérivée première sont apparus lors du traitement de certains creux (Figure 38). Cette anomalie de fonctionnement est due à la méthode employée pour ajuster le cercle de rayon r_{min} dans le creux (cf. §III.3.2). Nous avons supprimé ce problème en sur-échantillonnant localement les données bathymétriques autour de la zone anormale (Figure 39).

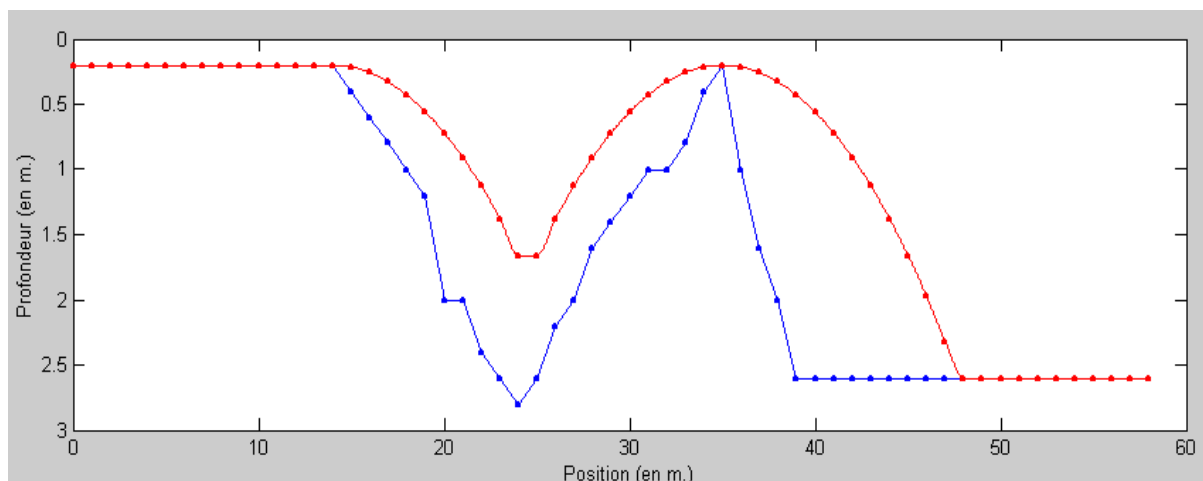


Figure 37 - Traitement de deux sommets proches

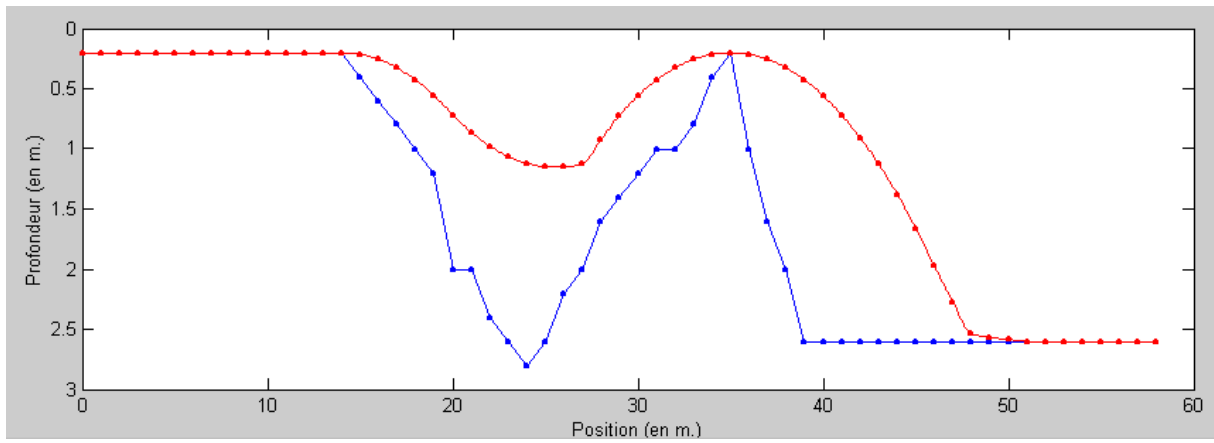


Figure 38 - Problème de continuité de la dérivée dans le traitement d'un creux

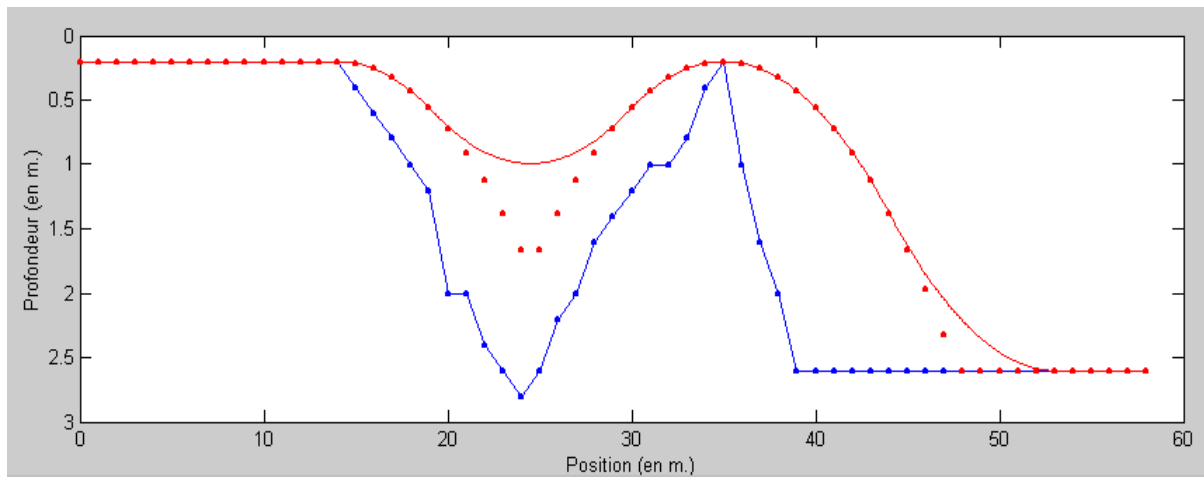


Figure 39 - Traitement des creux avec sur-échantillonnage local du profil

IV.3.2. Simulations sur données réelles

De nombreuses simulations ont été effectuées sur des données bathymétriques réelles en utilisant cette méthode de suivi de fond. La commande en mode glissant décrite dans le chapitre II est appliquée au véhicule dont les déplacements sont calculés par le simulateur hydrodynamique.

Ces simulations ont permis de montrer que l'algorithme de génération de trajectoire fonctionnait correctement (Figure 40) et que la commande en mode glissant permettait au véhicule de suivre de manière satisfaisante les trajectoires planifiées. En effet, l'écart observé entre la trajectoire parcourue par le véhicule et la trajectoire planifiée reste systématiquement inférieur à 40 cm (Figure 41). L'angle de tangage demeure inférieur à q_{max} , conformément à la théorie (Figure 42).

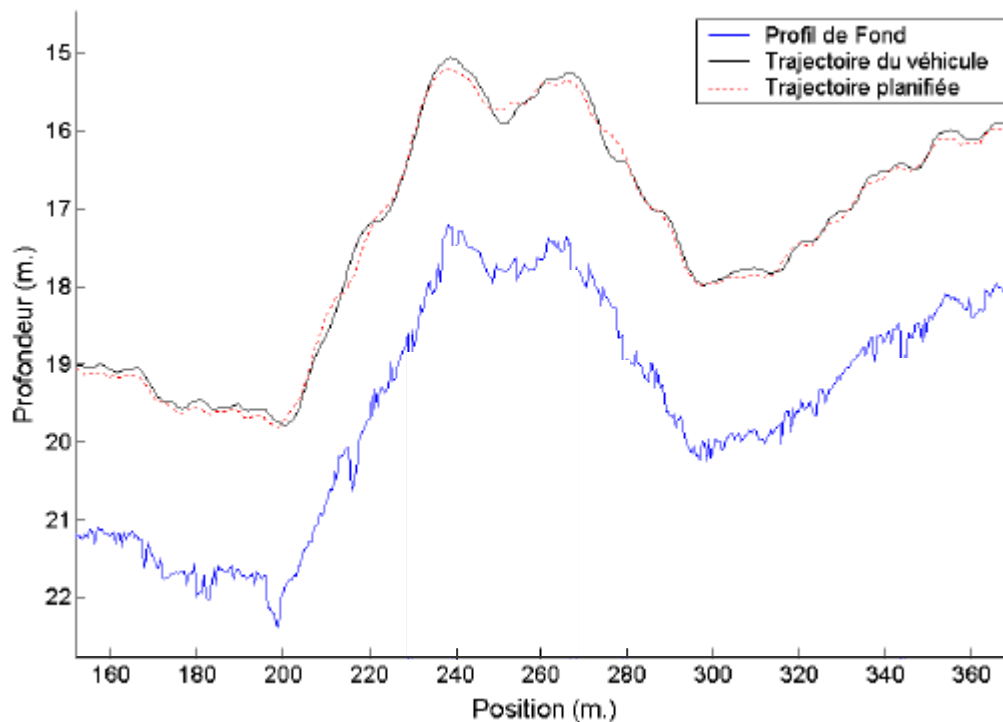


Figure 40 – Génération de trajectoire sur profil de fond réel

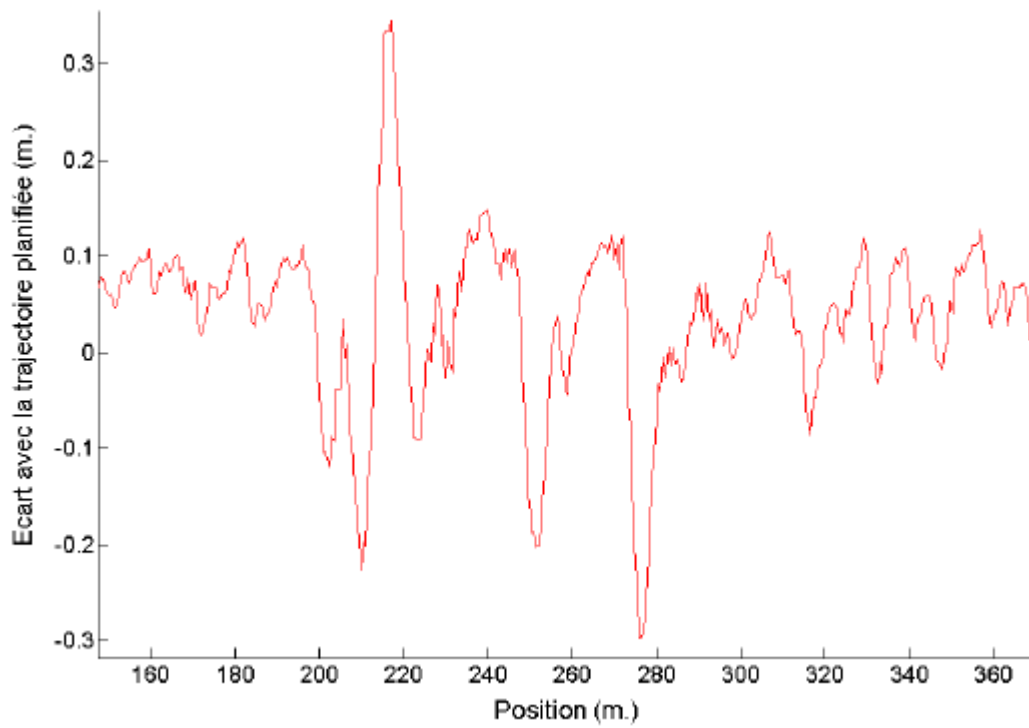


Figure 41 - Ecart entre la trajectoire suivie et la trajectoire planifiée

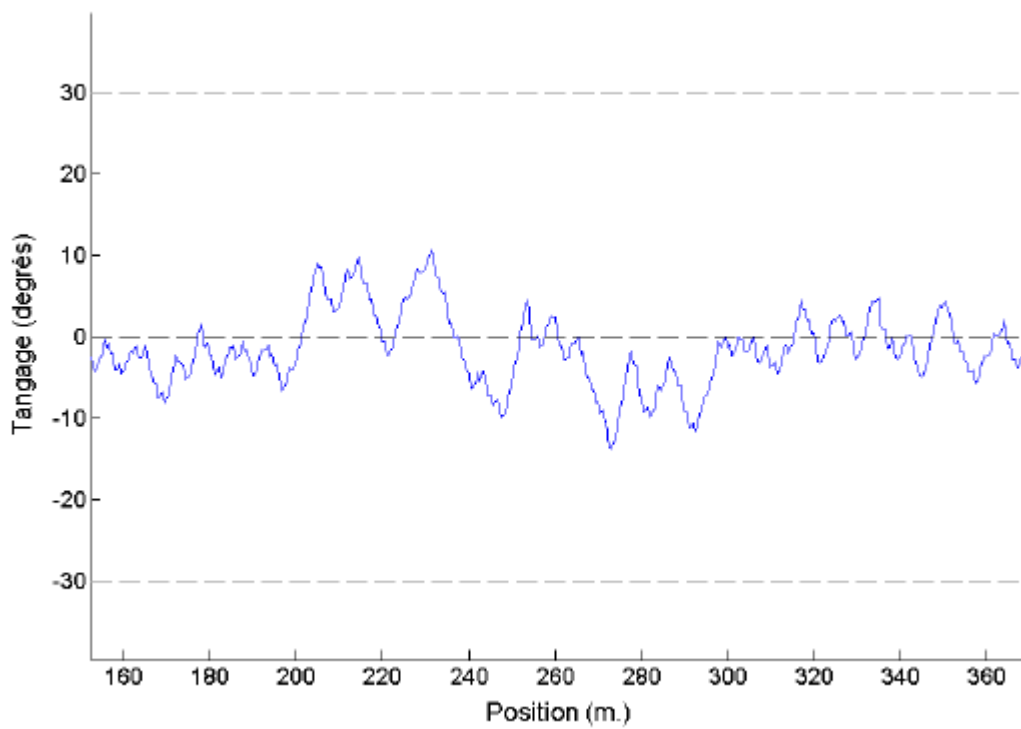


Figure 42 - Angle de tangage du véhicule le long de sa trajectoire

IV.4. Méthode de suivi de fond en environnement inconnu

L'objectif de cette série de simulations est de comparer les résultats obtenus en environnement inconnu à ceux obtenus précédemment. Ceci permet de vérifier que le nombre et la disposition des sondeurs n'affecte pas le fonctionnement de la méthode et que la génération progressive de la trajectoire (zones d'ombre) ne nuit pas à la qualité du suivi de fond. Durant les simulations, les données bathymétriques enregistrées par les sondeurs simulés ont été traitées de la manière décrite en annexes (voir chapitre III).

Afin d'estimer la qualité du suivi, nous avons calculé une trajectoire dite « idéale », construite avec la première méthode en utilisant la carte des fonds qui sert de référence pendant la simulation. Pour cela, on extrait de cette carte le profil bathymétrique réellement survolé par le véhicule lors de ses déplacements. On applique à l'ensemble ce profil, en une seule itération, l'algorithme de génération de trajectoire. On connaît alors la trajectoire idéale à suivre, compte tenu des limitations physiques du véhicule. Ce résultat est ensuite comparé à la trajectoire parcourue par le sous-marin lors des simulations.

Sur la Figure 43, par exemple, on visualise un parcours de 250 mètres au-dessus de la source de La Vise. Le profil de fond enregistré par les capteurs est représenté par des points bleus, la trajectoire idéale et celle suivie par le véhicule sont tracées respectivement en pointillés rouges et en trait continu noir. L'angle de tangage de *Taipan* reste compris entre q_{max} et $-q_{max}$ (Figure 44) avec de très légers dépassements liés à la commande. La comparaison de la trajectoire suivie par le véhicule avec celle, idéale, construite en utilisant la connaissance complète du profil de fond montre des écarts inférieurs à 70cm (Figure 45). Cette valeur est légèrement supérieure à celle obtenue lorsque nous avons évalué l'aptitude du véhicule à suivre une trajectoire prédéterminée (paragraphe précédent). Cette différence, prévue par la théorie, témoigne de l'incertitude de localisation des impacts des sondeurs.

Plusieurs séries de simulations ont été menées afin de tester si l'augmentation de la fréquence de calcul des portions de trajectoires pouvait améliorer la qualité du suivi. Les résultats obtenus alors n'ont pas été meilleurs et montrent qu'il n'est pas nécessaire de calculer une nouvelle portion de trajectoire locale avant d'avoir fini de parcourir la précédente. On assure dans ces conditions un coût minimal en temps de calcul pour la meilleure performance.

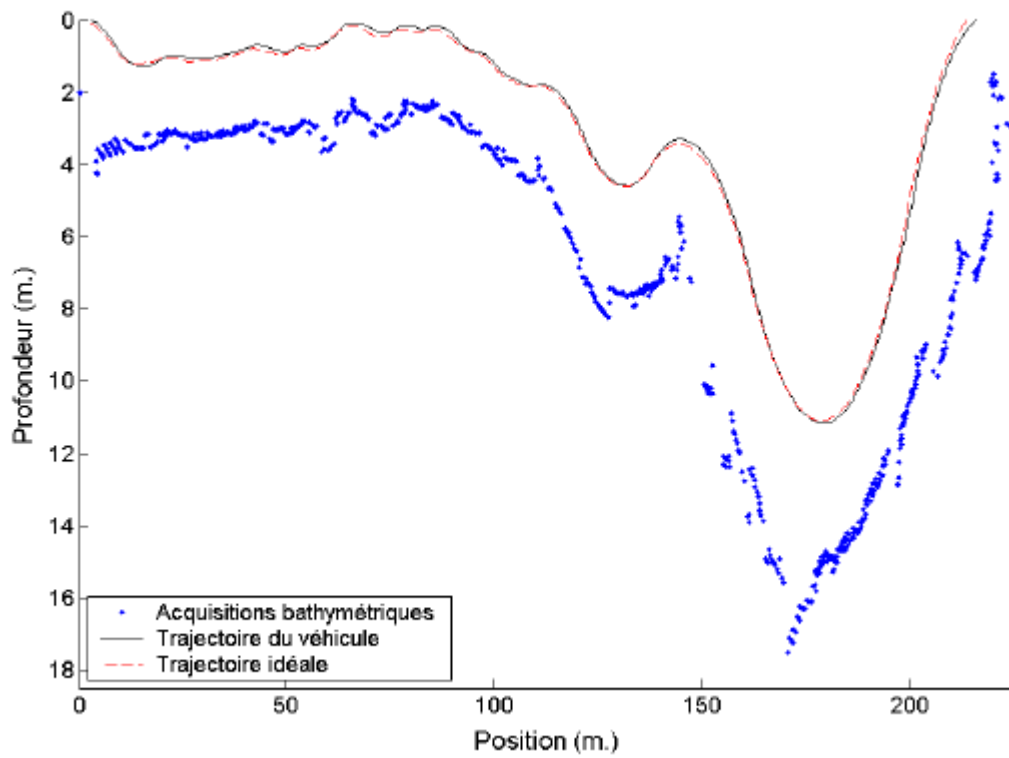


Figure 43 – Simulation d’une navigation au-dessus de la source de La Vise

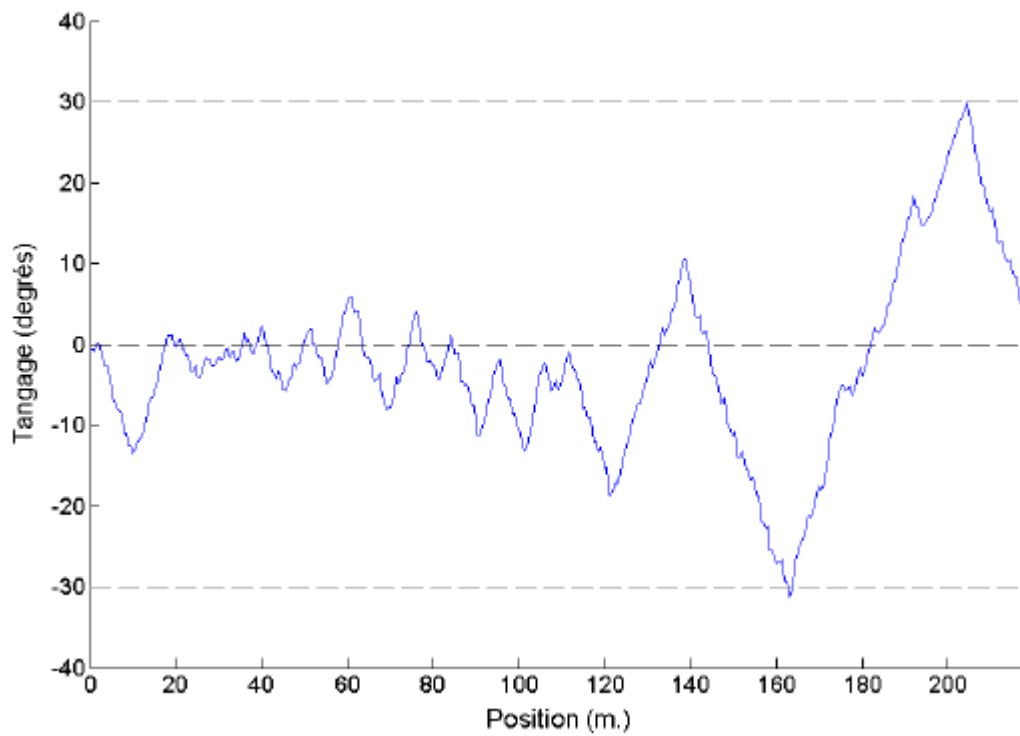


Figure 44 – Evolution de l’angle de tangage le long de la trajectoire précédente

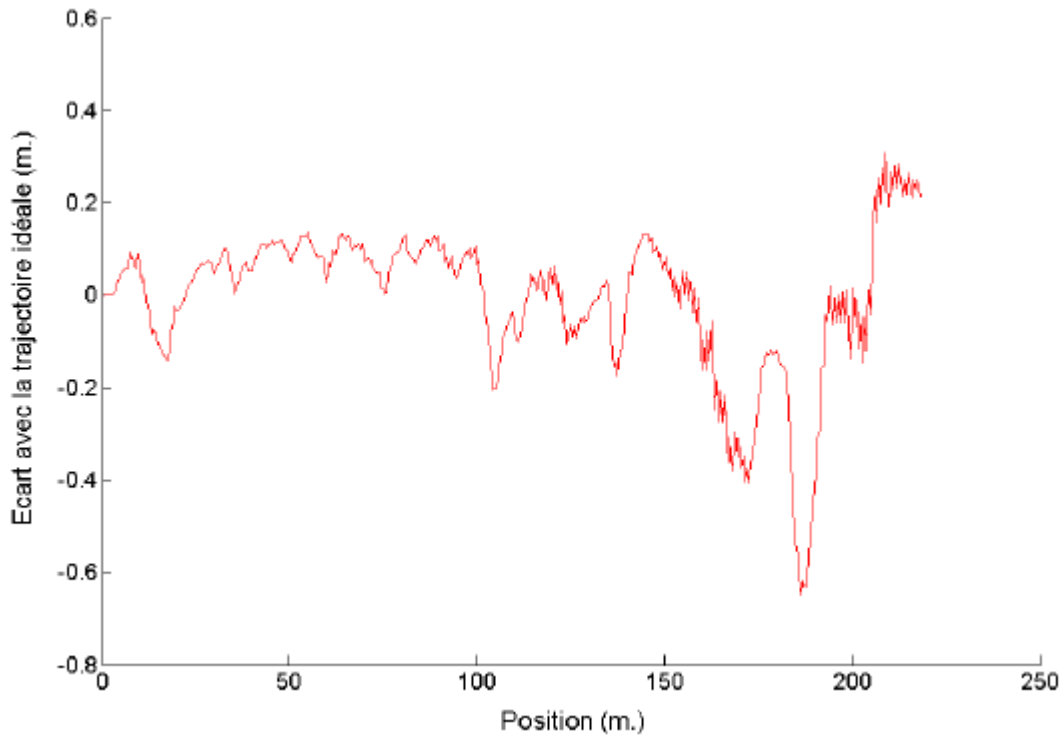


Figure 45 - Ecart entre la trajectoire suivie et la trajectoire idéale

IV.5. Méthode de détection des falaises

IV.5.1. Hauteur de falaise inférieure à h_{max}

Les simulations de la méthode de détection et d'évitement de falaises n'ont fait apparaître aucun dysfonctionnement de l'algorithme. Les obstacles détectés dans la « zone sure » (voir §III.5.3) sont évités avec une précision comparable à celle obtenue pour le suivi de fond sans falaise (Figure 46). Ainsi, la différence entre la trajectoire idéale et la trajectoire suivie est inférieure aux 70cm observés précédemment (Figure 47). L'angle de tangage du véhicule reste inférieur aux limites fixées (Figure 48). Les faibles dépassements observés sont, ici encore, dus à la loi de commande.

Plusieurs valeurs de α et MN ont également été testées en fonction du type de fond environnant. Les valeurs utilisées pour l'obtention des figures ci-dessous sont: $\alpha=20$ degrés et $MN=10$ mètres.

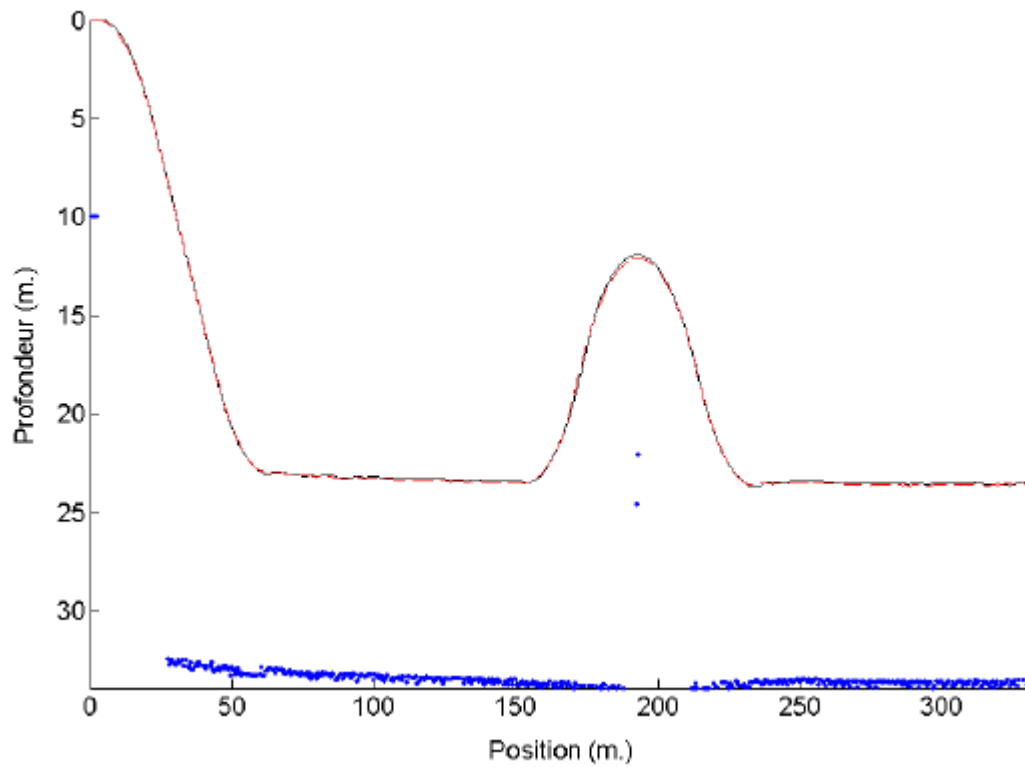


Figure 46- Evitement d'une falaise de hauteur comprise entre h_{min} et h_{max}

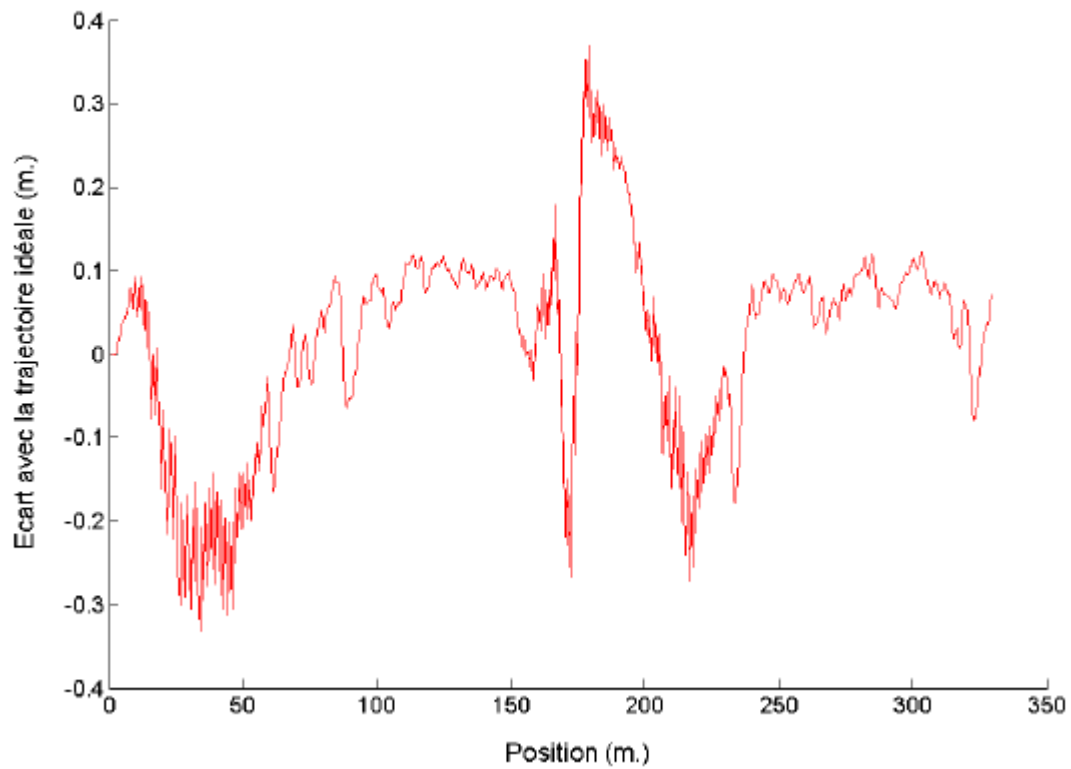


Figure 47- Ecart entre la trajectoire suivie et la trajectoire idéale

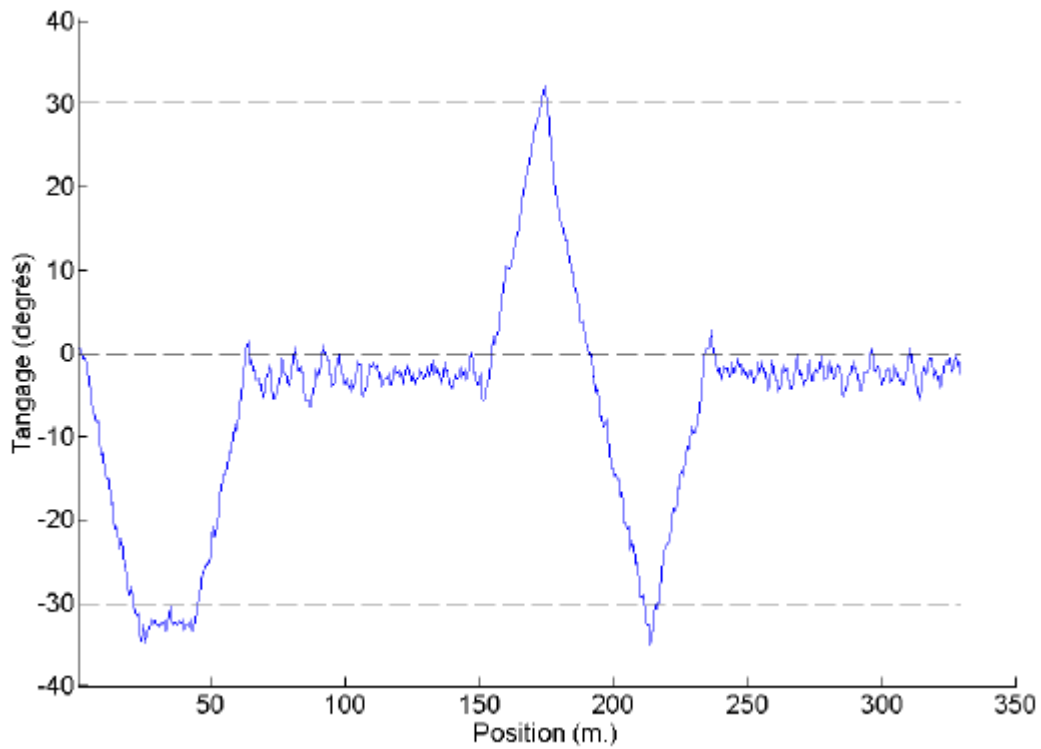


Figure 48 - Evolution de l'angle de tangage le long de la trajectoire précédente

IV.5.2. Hauteur de falaise supérieure à h_{max}

Lorsque les changements de profondeur excèdent h_{max} , la trajectoire du véhicule est différente de la trajectoire idéale (Figure 49, Figure 50). Cet effet, prédit par la théorie, est causé par la manœuvre décrite dans le paragraphe III.5.5.c. Le véhicule fait varier son angle de tangage afin de rechercher le sommet de la falaise. Une fois cette tâche accomplie, le véhicule rejoint sa trajectoire initiale. Une telle manœuvre n'est cependant pas supposée se produire et ne constitue qu'une solution d'évitement d'ultime recours.

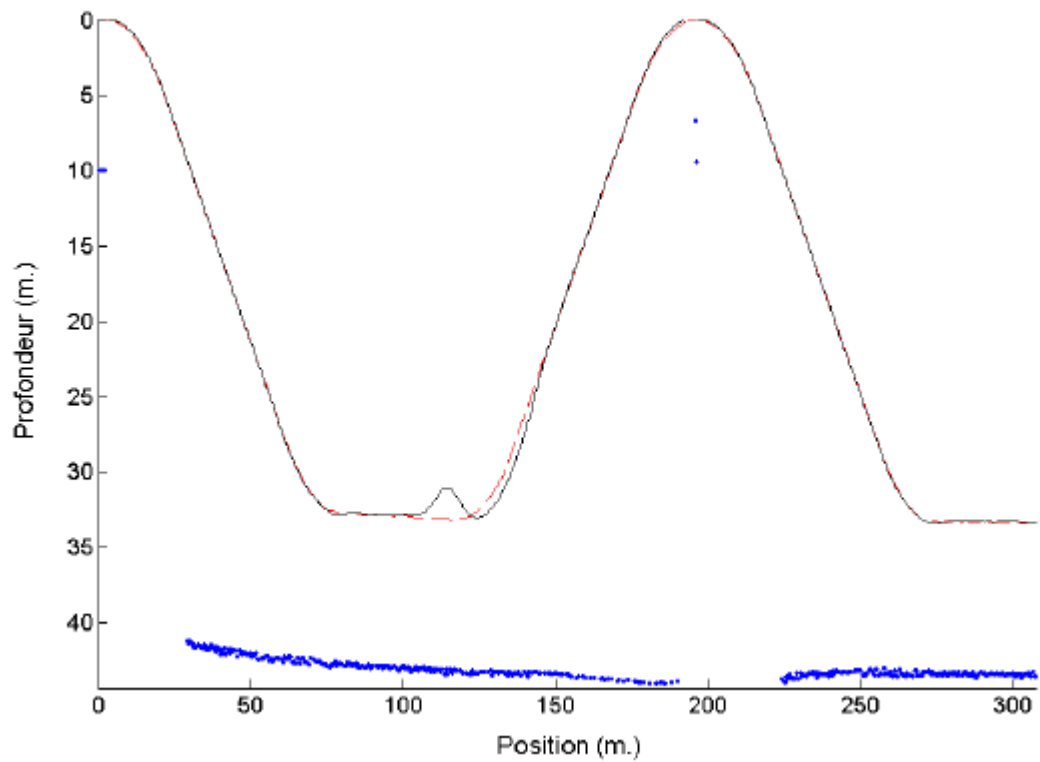


Figure 49 - Détection et évitement d'une falaise de hauteur supérieure à h_{max}

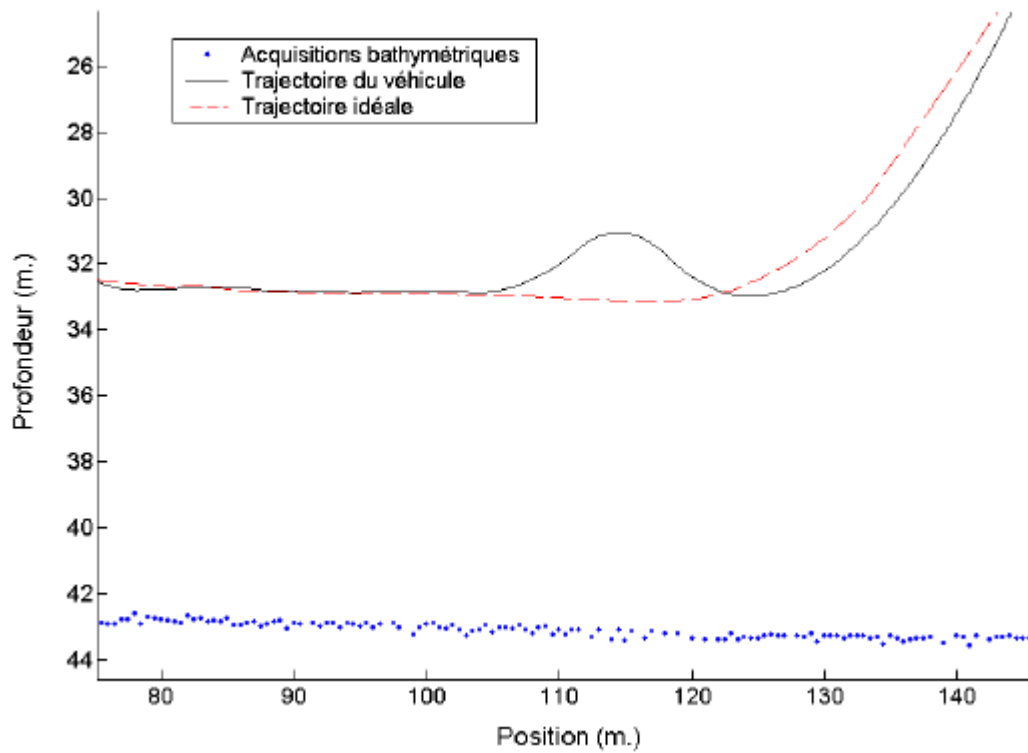


Figure 50- Agrandissement de la courbe précédente

IV.6. Conclusion des simulations

Les simulations des deux méthodes de suivi de fond ont permis de montrer la validité de la méthode de construction des trajectoires ainsi que l'aptitude du véhicule à suivre les trajectoires ainsi générées. L'algorithme de détection et d'évitement de falaise a lui aussi donné satisfaction et permet d'envisager les expérimentations en milieu naturel. Cette dernière phase de validation est nécessaire à double titre. D'abord, parce que les simulations des acquisitions bathymétriques ont été effectuées en prenant en compte le modèle acoustique théorique des sondeurs. Ensuite, parce que le simulateur hydrodynamique de Taipan n'est précis qu'à l'ordre 2 et qu'il importe de vérifier que le suivi des trajectoires planifiées est effectivement correct.

IV.7. Le véhicule Taipan

C'est à bord du véhicule autonome sous-marin *Taipan* que les expérimentations seront réalisées. Il s'agit d'une torpille de près de 2 mètres de longueur, équipée d'un propulseur arrière, d'un gouvernail vertical et de deux paires de barres de plongée (à l'avant et à l'arrière). Ce véhicule possède une autonomie de 20km et peut descendre jusqu'à 150 mètres de profondeur [VAG98][VAG00]. Afin de déterminer le dispositifs bathymétrique le mieux adapter à ce véhicule, nous nous proposons à présent d'examiner les différentes solutions techniques existantes.

IV.8. Choix du dispositif bathymétrique

IV.8.1. Dispositifs existants

IV.8.1.a. Sondeur mono-faisceau

Parmi tous les dispositifs bathymétriques automatiques existants, le sondeur mono-faisceau est probablement le plus simple. Il s'agit d'un dispositif électronique relié à un cristal piézo-électrique (quartz) situé au fond d'un cylindre borgne. L'interface avec le milieu extérieur est assuré par une membrane étanche semi-rigide qui transmet les vibrations du cristal. Le cylindre et le cristal forment le transducteur électroacoustique.

Lors de la phase d'émission, le cristal est excité électriquement (plusieurs centaines de volts) de façon brève (500ns) par une tension alternative de haute fréquence (50kHz ou 200kHz). L'énergie électrique est transformée en énergie mécanique par le cristal qui entre en résonance. Ce phénomène engendre une pression acoustique variable : l'onde acoustique émise. Cette dernière forme un faisceau acoustique conique et se propage dans l'eau à une vitesse voisine de $1500\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ [GRA] jusqu'à ce qu'elle rencontre le fond ou un obstacle quelconque. Une partie de l'onde est alors ré-émise et revient dans le cylindre émetteur où la pression acoustique fait vibrer à nouveau le cristal piézo-électrique. Ce dernier convertit l'énergie vibratoire mécanique en énergie électrique. La faible tension qui en résulte est traitée par un amplificateur dont le gain augmente avec le temps à partir de l'émission (Time Varying Gain) [CAI]. Le premier écho significatif reçu sera considéré comme étant l'écho du fond marin. Ceci permet d'éviter les échos dus aux chemins multiples ou courbes ou encore à la réverbération du signal sur la surface de la mer. En mesurant le «temps de vol», c'est-à-dire le temps écoulé entre l'émission de l'onde et la réception de l'écho, on en déduit la profondeur. Selon la puissance d'émission, la portée des sondeurs peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Le coût d'un appareil complet est proche de 300€

Certains sondeurs électroniques modernes analysent plus finement l'évolution temporelle de l'amplitude des échos reçus, ce qui permet par exemple de déterminer s'ils ont été renvoyés par un banc de poissons ou si le fond marin est herbeux, sableux ou rocheux.

IV.8.1.b. Sondeur à formation de voies

Ce type de sondeur, développé par la société *Interphase*, exploite la formation électronique de voies pour améliorer la directivité du transducteur. Seize pastilles piézo-électrique disposées en croix forment le dispositif d'émission-réception. Un traitement informatique basé sur l'introduction de déphasages sur les signaux émis ou reçus par les pastilles permet de simuler l'existence d'une antenne très directive et orientable. Ceci permet au sondeur d'émettre dans une direction privilégiée ou de distinguer, lors de la réception, la direction d'où proviennent les signaux. La sonde (transducteur électroacoustique) n'est guère plus encombrante (ci-contre à l'échelle 1/3) que celle d'un sondeur classique mono-faisceau. Selon son orientation, on obtient un balayage vertical (Figure 52) ou horizontal (Figure 53) de l'environnement.

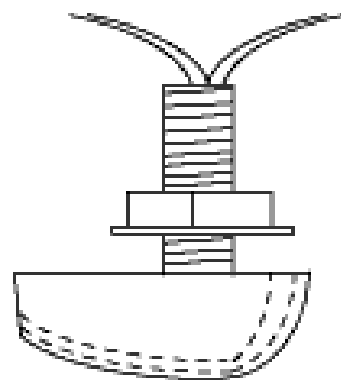


Figure 51 - Sonde Interphase

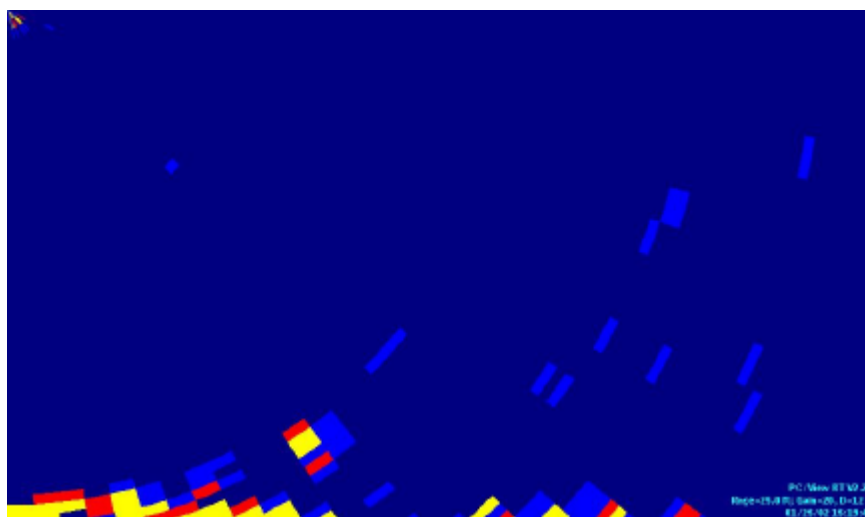


Figure 52 - Balayage vertical obtenu par formation de voies (Logiciel PCView)

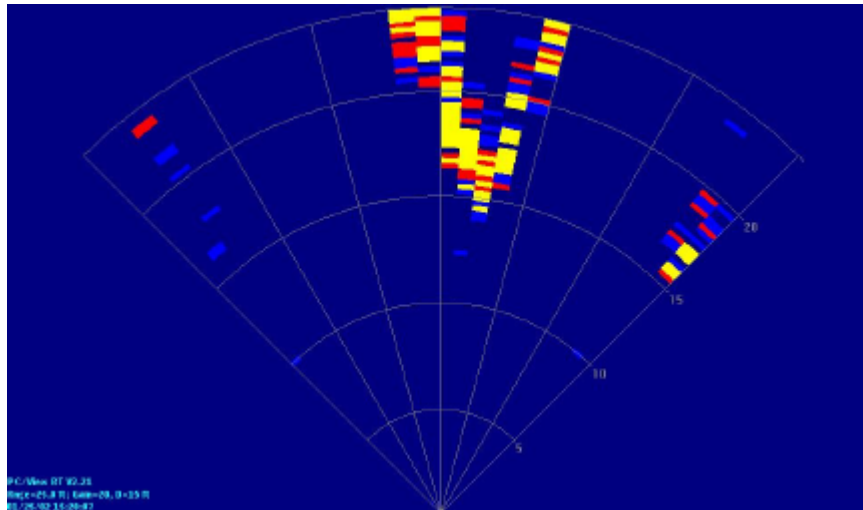


Figure 53 - Balayage horizontal obtenu par formation de voies (Logiciel PCView)

Ce sondeur est connecté au port parallèle du PC via une interface. Cependant, les données acquises par cet appareil ne sont pas exploitables par un A.U.V. En effet, ce système ne délivre pas les valeurs numériques des données bathymétriques acquises. Ces dernières ne sont à ce jour disponibles que sous forme d'images. En outre, il est impossible de synchroniser l'instant de prise d'image avec l'horloge utilisée pour la navigation du véhicule. Enfin, l'implantation du capteur sur le véhicule est rendue difficile par le fait que la sonde n'est pas conçue pour être immergée profondément. Pour protéger cette dernière, il serait nécessaire d'usiner une pièce de courbure particulière adaptée à la forme de la sonde et d'épaisseur constante le long de la courbure. Il n'est pour autant pas certain que le dispositif fonctionne correctement dans ces conditions, car les phénomènes de réfraction sonore au passage de la coque en plastique pourraient avoir des effets non négligeables sur l'acquisition des données. En effet, des déphasages dus à la coque de protection (nez du véhicule) pourraient affecter le processus de formation de voies. Le coût de ce dispositif est de 3 700€

IV.8.1.c. Sonar frontal à balayage

Dans un sonar frontal à balayage le dispositif d'émission/réception est mobile, ce qui permet de balayer l'environnement par tranches, au moyen d'un faisceau acoustique. Comme pour le sondeur à formation électronique de voies, on peut, en orientant l'antenne (le transducteur), opter pour un balayage vertical ou horizontal. Le sonar fournit une image de distances dans la tranche étudiée. Ce dispositif est souvent conçu pour pouvoir être synchronisé à l'émission et l'interfaçage avec un ordinateur est aisé (liaison série RS232 ou carte PC104). Outre son prix élevé (10 000€), le sonar frontal présente l'inconvénient de

consommer beaucoup d'énergie (60W en continu). Son encombrement le rend peu adapté à l'implantation sur les petits AUV tels que Taipan.

IV.8.2. Dispositif retenu

Afin de déterminer quel dispositif bathymétrique nous allons embarquer, examinons les critères de choix liés aux petits véhicules autonomes sous-marins.

IV.8.2.a. Contraintes liées au véhicule

Le principal critère pour les matériels embarqués à bord des véhicules autonomes sous-marins est la consommation énergétique. En effet, un véhicule comme Taipan (cf. Annexe 1) dispose d'une autonomie énergétique inférieure à 380Wh. La propulsion et le contrôle (gouvernail et barres de plongée) de Taipan consomment une puissance voisine de 100W lorsque la vitesse de déplacement est réglée à $1,8\text{m.s}^{-1}$ (vitesse normale). L'électronique embarquée (Radio 20W, Transputer 5W, GPS 5W, Inclinomètres, Gyromètres, Profondimètre) absorbe près de 40W. Ainsi, sans dispositif bathymétrique, l'autonomie du véhicule est approximativement de 2 heures. Le tableau suivant (Figure 54) présente l'autonomie du véhicule en fonction du type de capteur embarqué.

Type de capteur bathymétrique	Consommation supplémentaire	Autonomie (min.)	Autonomie (km.)	Prix
Aucun (Taipan seul)	-	163min.	17,6km.	-
Sondeur mono-faisceau	0,4W	162min.	17,5km. (-0.5%)	300€
Sondeur à formation de voies	10W	152min.	16,4km. (-7%)	3700€
Sonar frontal à balayage	60W	114min.	12,3km. (-30%)	10000€

Figure 54 - Autonomie de Taipan en fonction du type de capteur embarqué

On le voit, en terme d'autonomie, le sondeur mono-faisceau est le plus avantageux. De plus, il présente l'avantage d'être peu encombrant et très léger (230 grammes) ce qui est intéressant pour un petit AUV dont la capacité d'emport ne dépasse guère 2 ou 3kg. Le faible prix de ce type de capteur est également décisif pour des AUV dont le coût de fabrication total se situe entre 15 et 30 000€ (instrumentation incluse). Nous avons donc choisi d'utiliser des sondeurs mono-faisceaux à bord de Taipan.

IV.8.2.b. Fonctionnement simultané de plusieurs sondeurs

L'implantation de plusieurs sondeurs mono-faisceaux grand-public est impossible à bord du même véhicule. En effet, ces dispositifs ne sont pas synchronisables, et par conséquent, on ne peut contrôler les instants d'émissions. Un sondeur pourrait alors émettre pendant qu'un autre reçoit et fausser complètement les mesures. Les seuls moyens d'éviter ces interférences acoustiques sont :

- ✓ L'utilisation de sondeurs qui émettent chacun dans des bandes de fréquences différentes. Les produits grand-public sont disponibles en 50kHz et 200kHz, mais la capacité à détecter des petits objets est plus faible lorsque la fréquence diminue.
- ✓ La synchronisation des émissions de tous les sondeurs. Elle n'est possible que sur les sondeurs professionnels (Tritech) dont le prix (2.000€), le poids et l'encombrement rendent délicate l'utilisation à bord des petits véhicules sous-marins.

Afin d'éviter tout problème d'interférences acoustiques, nous avons choisi d'utiliser un seul sondeur mono-faisceau, relié à trois transducteurs électro-acoustiques (ou sondes) utilisés successivement grâce à un répartiteur à commutation rapide. Hormis la puissance absorbée par le répartiteur (0,01W), la consommation électrique reste la même. Seuls changent le débit d'informations (divisé par trois), le poids (deux sondes de 100g supplémentaires), et le prix (100€ supplémentaires).

IV.9. Implantation à bord du véhicule

IV.9.1. Sondeur utilisé

Nous avons choisi un sondeur mono-faisceau de type NAVMAN D100 distribué par la société Plastimo. La tension d'alimentation est de 12 Volts et la consommation électrique moyenne est de 15 milliampères (hors éclairage). La puissance de crête d'émission est de 50 Watts, ce qui confère au sondeur une portée de 130 mètres. Les ondes acoustiques émises ont une fréquence de 200kHz.

L'accord du circuit oscillant d'émission nécessite une sonde qui présente une impédance de 600Ω et une capacité de 1500pF. Nous avons choisi d'utiliser des transducteurs ultrasoniques Murata UT200BA8A car ils répondent à ces exigences et peuvent en outre supporter une puissance de crête de 140 Watts.

IV.9.2. Implantation des trois sondes

Les trois transducteurs ultrasoniques doivent être placés à l'avant de Taipan et orientés comme l'indique la Figure 55. Ces dispositifs n'étant pas conçus pour résister à des pressions supérieures à 2 bars, ils ne peuvent être en contact direct avec l'extérieur. En effet, la pression ambiante excède cette valeur dès que la profondeur d'immersion dépasse 10 mètres.

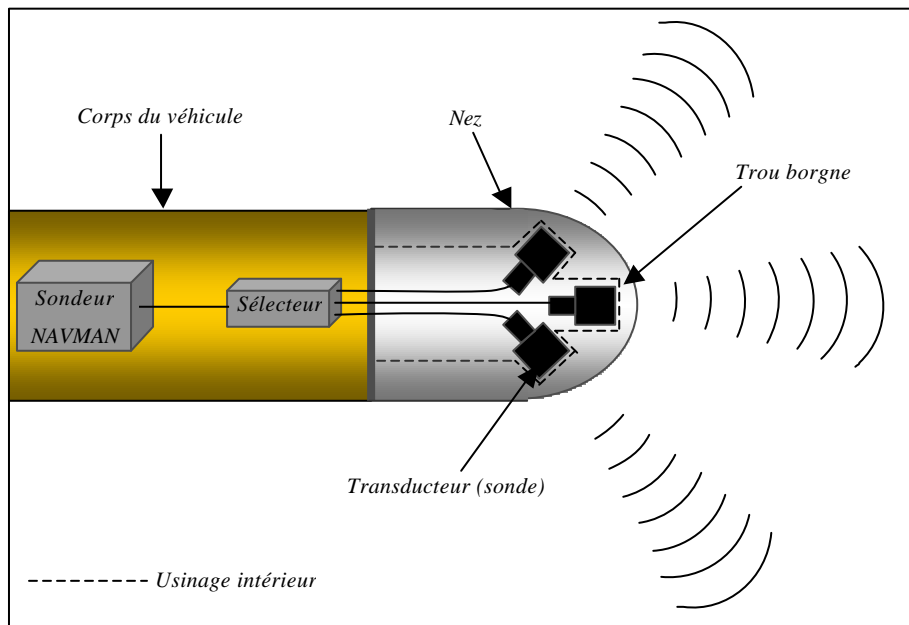


Figure 55 - Tête acoustique de Taipan

Pour protéger les transducteurs des effets de la pression, nous les avons placés à l'intérieur du nez du véhicule. Il s'agit d'une pièce monobloc creuse en poly-acétal (Hostaform). Nous y avons usiné trois trous borgnes à fond plat afin d'y coller les transducteurs (Figure 56). L'impédance acoustique du poly-acétal est suffisamment proche de celle de l'eau pour permettre aux ondes émises par les transducteurs de traverser la paroi du nez (20mm) sans être réfractées. Ainsi la forme et la direction du faisceau acoustique restent inchangées. Seule l'intensité du signal reçu est légèrement diminuée, mais cela n'affecte pas le fonctionnement du sondeur.

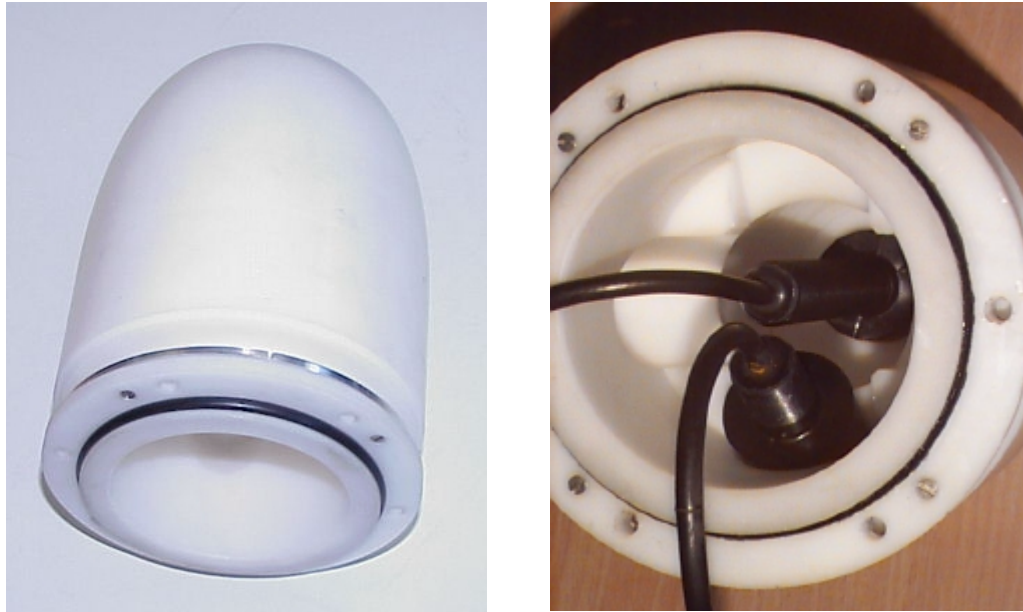


Figure 56- Nez du véhicule et implantation des deux premiers transducteurs

IV.9.3. Dispositif de sélection des transducteurs

L'émission simultanée étant impossible, nous avons choisi d'émettre successivement avec les trois transducteurs (cf. §IV.8.2.b). Pour cela un petit dispositif électronique est placé entre le sondeur et les trois transducteurs. Ce dispositif détecte les instants d'émission des signaux acoustiques et actionne des relais ultra-rapides afin de connecter un nouveau transducteur avant chaque nouvelle acquisition.

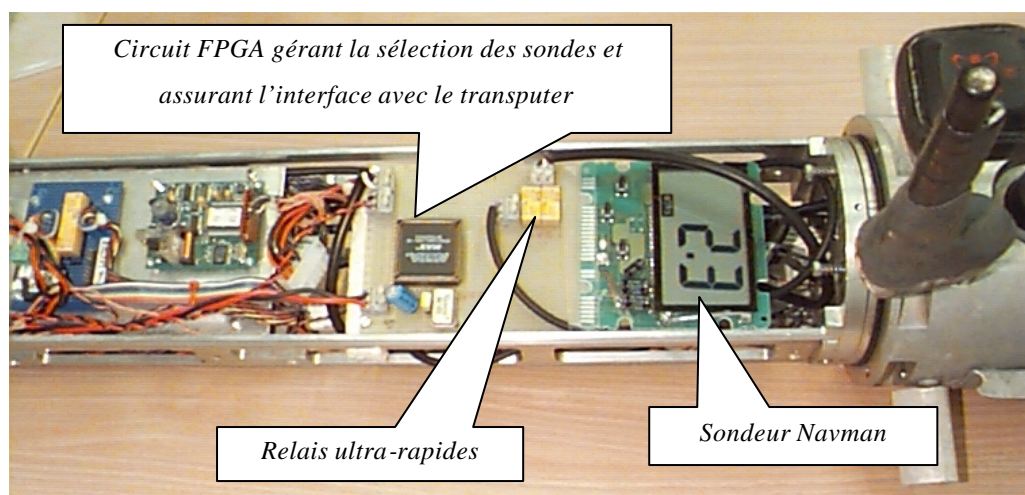


Figure 57 - Implantation électronique dans le véhicule Taipan

IV.10. Essais préalables

IV.10.1. Relevé de la bathymétrie de la zone d'expérimentation

IV.10.1.a. Dispositif

Afin de contrôler la validité des mesures enregistrées ultérieurement par Taipan, il est nécessaire d'établir préalablement un relevé bathymétrique précis de la zone d'opération.

Pour cela, nous avons parcouru cette dernière à bord d'un bateau équipé d'un récepteur GPS et d'un sondeur de même modèle que celui utilisé dans Taipan. Les données bathymétriques du sondeur ainsi que la position calculée par le récepteur GPS sont envoyées au format NMEA0183 (norme commune pour les instruments de navigation maritime) aux ports série de l'ordinateur via une liaison de type RS232.

La qualité du positionnement par le système GPS dépend du nombre de satellites captés par le récepteur (redondance d'information), et de la disposition (éparpillement) de ces derniers dans le ciel. En fonction de ces paramètres, le récepteur GPS est capable d'évaluer la précision du positionnement. Ainsi, la trame d'informations envoyée par le récepteur GPS à l'ordinateur contient un indice nommé HDOP (Horizontal Dilution Of Precision), dont la valeur informe sur la précision de la mesure de position. Lorsque celle-ci est optimale, HDOP vaut 1, puis plus l'indice augmente, plus la précision diminue. Depuis le 2 mai 2000, les Etats-Unis ont supprimé la dégradation volontaire des signaux *GPS*. Cette dégradation, également appelée « *Selective Availability* » réservait aux militaires des précisions de positionnement 10 fois plus élevées que celles accessibles au public. Elle n'est rétablie que temporairement et très localement (zones de conflit). Lors des essais, le récepteur GPS a capté en permanence au moins 7 satellites et son indice de dilution horizontale de précision (HDOP) est toujours resté égal à 1. La précision du positionnement était donc inférieure à 4 mètres.

IV.10.1.b. Acquisition des données

Les premiers essais se sont déroulés dans la Crique de Balaruc, à l'Est de l'Étang de Thau, entre les villages de Balaruc-les-bains et Bouzigues. Cet étang présente une grande régularité des profondeurs (entre 4 et 10 mètres), sauf à l'endroit où se trouve la source de La Vise. Il s'agit d'une source d'eau douce sous-marine qui jaillit à 23 mètres de profondeur à la base d'un cône renversé dont l'ouverture mesure plus de 110 mètres de diamètre (Figure 58). Préalablement au relevé bathymétrique, nous avons contrôlé la validité des mesures de profondeur au moyen d'une sonde à main (fil lesté) pour les profondeurs minimale et maximale de la zone d'expérimentation. Nous avons ensuite parcouru cette dernière et enregistré les profondeurs correspondantes (Figure 58). Les résultats obtenus sont placés dans une carte matricielle dont le pas d'échantillonnage est fixé à 3,7 mètres (soit 2 millièmes de mille nautique).

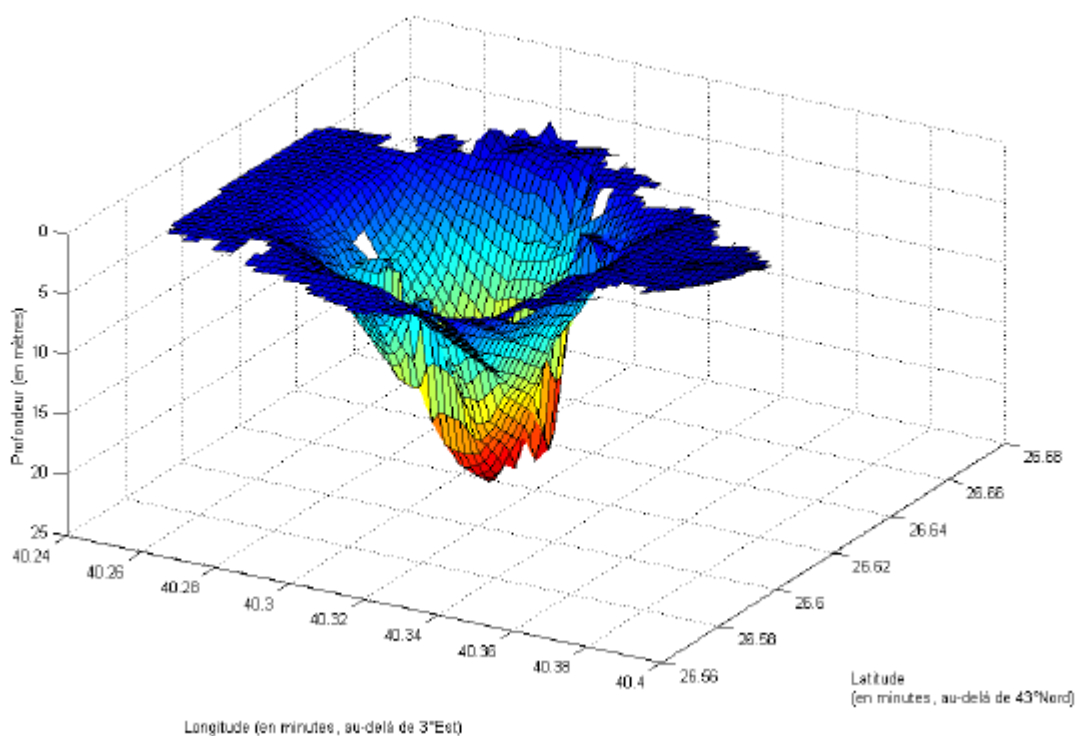


Figure 58 - Relevé bathymétrique de la source de La Vise

IV.10.2. Réponse angulaire du sondeur

Dans le paragraphe **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, nous avons détaillé les variations angulaires de l'amplitude de l'onde acoustique émise par un transducteur. D'après les dimensions des sondes Murata utilisées, et d'après la fréquence et la vitesse de

propagation de l'onde émise, l'équation (Eq 40) de la page 68 nous permet de calculer l'angle d'ouverture du faisceau angulaire. Ainsi, on a $q_0=22^\circ$.

Pour vérifier cette valeur, nous avons procédé à des acquisitions de distance avec un sondeur dont nous avons progressivement incliné la sonde. Nous avons accompli cet essai au-dessus d'un fond sédimentaire plat (sable et vase). On note q , l'angle entre la verticale et la ligne de visée de la sonde (Figure 59).

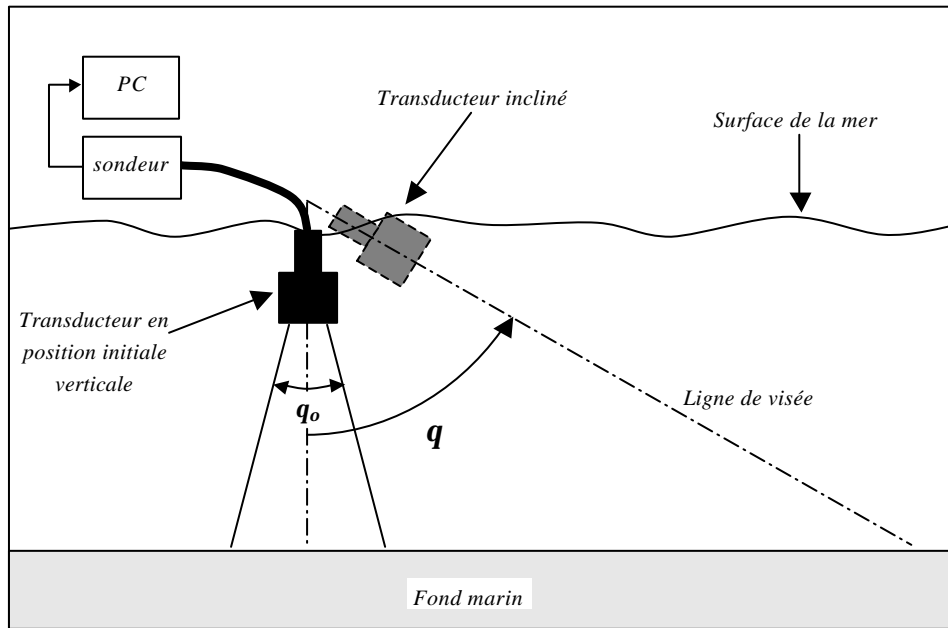


Figure 59 - Dispositif expérimental de mesure de la réponse angulaire du sondeur

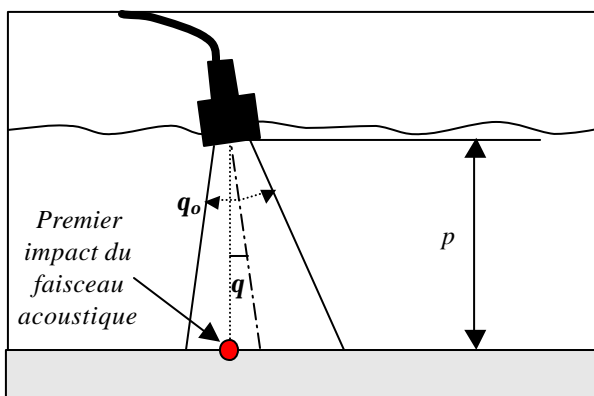


Figure 60 - Inclinaison inférieure à $q_0/2$

Lorsque q est inférieur à $q_0/2$, la distance mesurée ne varie pas. En effet, puisqu'elle correspond au premier écho reçu à l'intérieur du faisceau, cette mesure est égale à p , la profondeur du fond marin à l'aplomb du capteur (Figure 60).

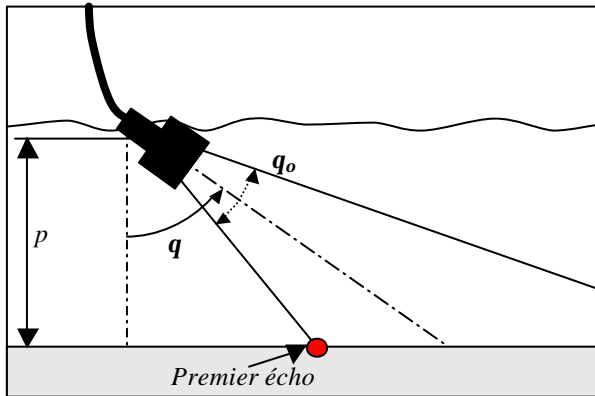


Figure 61- Inclinaison supérieure à $q_0/2$

Lorsque q est supérieur à $q_0/2$ et lorsque le fond marin présente une pente inférieure à $q - q_0/2$, la distance mesurée par le sondeur correspond à la distance d'impact du bord inférieur du faisceau (le plus court chemin) (Figure 61).

Avec les notations de la Figure 61, cette distance est donnée par l'équation (Eq 44).

$$d = \frac{p}{\cos\left(q - \frac{q_0}{2}\right)} \quad (\text{Eq 44})$$

Sur la Figure 62, nous avons tracé les valeurs théoriques et expérimentales des distances mesurées par le sondeur en fonction de l'angle d'inclinaison du transducteur. On remarque que la courbe est constante pour les angles inférieurs à 20° . Ceci correspond aux valeurs de q inférieures à $q_0/2$ ou proches de cette valeur. En effet, lorsque $q \approx q_0/2$, on a $\cos\left(q - \frac{q_0}{2}\right) \approx 1$.

L'écart relatif entre les deux courbes atteint parfois 16%. Ceci s'explique par les conditions de mer défavorables lors de l'essai, les vagues faisant varier l'angle d'inclinaison du transducteur.

En outre, la monotonie et la continuité de la fonction confirment l'absence d'influence des lobes secondaires. Dans le cas contraire, nous aurions en effet observé des zones discontinues de décroissance de la fonction.

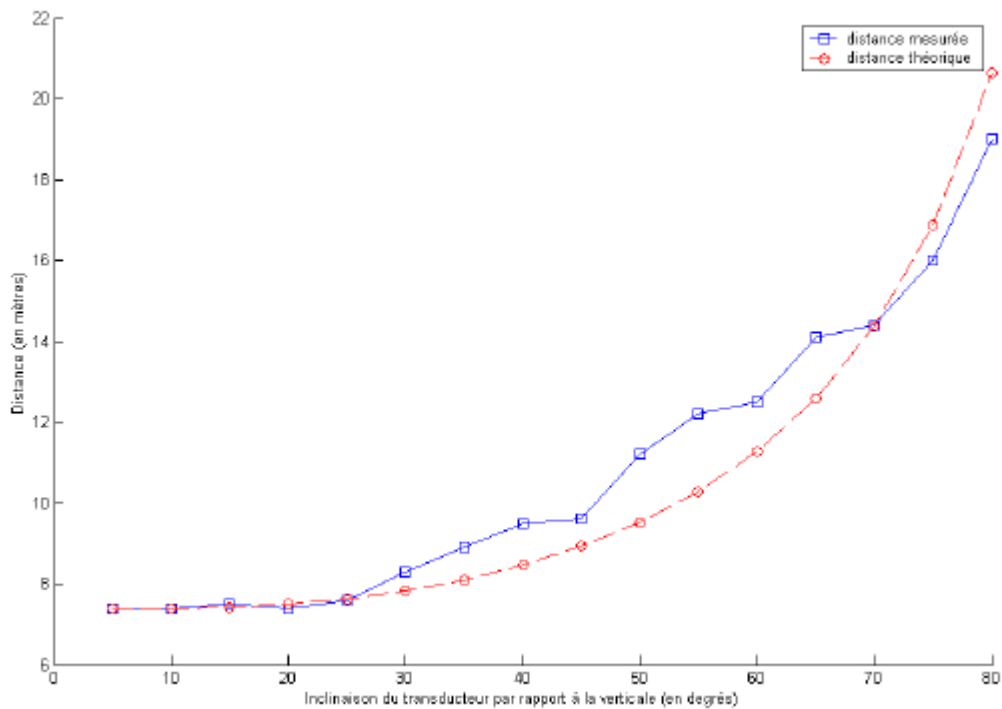


Figure 62 - Test d'acquisition de distances avec inclinaison du transducteur

IV.10.3. Expérimentations de la tête acoustique

Des relevés de profils de fond ont été réalisés avec la tête instrumentée en piscine puis dans l'étang de Thau (Hérault). Nous avons accompli un relevé bathymétrique avec la tête instrumentée dans la zone préalablement cartographiée. Durant le relevé, le trajet parcouru a été enregistré au moyen d'un GPS (Figure 64). Ainsi, nous avons pu comparer les mesures obtenues aux valeurs de référence de la carte (Figure 63).

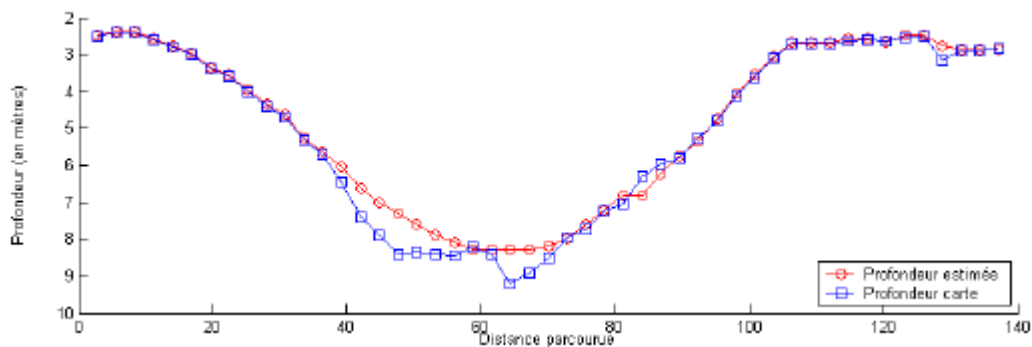


Figure 63 - Test de la tête instrumentée en milieu naturel (Source de La Vise)

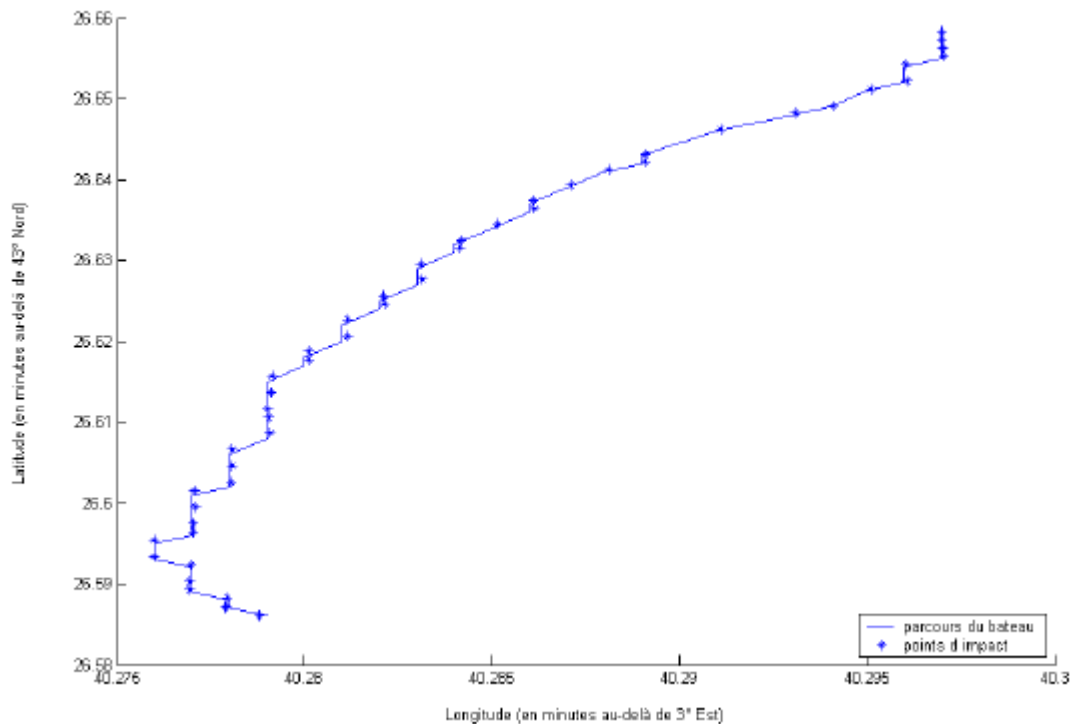


Figure 64 - Parcours d'acquisition

Les résultats obtenus prouvent que la directivité des faisceaux acoustiques n'est pas affectée par la traversée de la coque en matière poly-acétal. En piscine, nous avons cependant mesuré à l'oscilloscope une légère atténuation du signal acoustique. Ceci a pour unique conséquence une légère diminution de la portée du sondeur.

IV.11. Essai en milieu naturel en boucle ouverte

IV.11.1. Conditions de l'essai

Ce premier essai a été effectué dans l'étang de Thau près de la source de La Vise dans une mer assez agitée (30 à 40 cm de creux). Nous avons programmé le véhicule Taipan de manière à ce qu'il décrive une trajectoire rectiligne à profondeur constante (1 mètre). Durant son parcours, le véhicule a acquis des échantillons de profondeur grâce à deux sondeurs installés comme indiqué dans le paragraphe IV.9.2 (sondeur horizontal et sondeur incliné vers le bas). Les positions initiale et finale du véhicule ont été relevées par GPS. Ainsi, puisque le véhicule se déplace en ligne droite entre ces deux points, il est aisé de déterminer le profil bathymétrique réel grâce à la carte pré-établie (cf. § IV.10.1). On peut alors comparer ces données à celles enregistrées au cours de l'essai.

IV.11.2. Résultats

Sur la Figure 65, on observe les données bathymétriques recueillies par les deux sondes. On constate que le capteur 1 (sonde inclinée vers le bas) délivre beaucoup d'échantillons au début du parcours alors que le capteur 2 (sonde horizontale) fournit l'essentiel des échantillons de la fin du parcours. Ceci s'explique simplement par l'orientation de ces deux capteurs. Le capteur 2, horizontal, permet en effet d'explorer plus loin devant le véhicule alors que le profil de fond situé près du véhicule est perçu par la sonde inclinée vers le bas (capteur 1).

Les valeurs nulles représentées sur la figure correspondent à des absences de mesures. Elles ne seront pas prises en compte lors de l'application de l'algorithme de génération de trajectoires de suivi de fond.

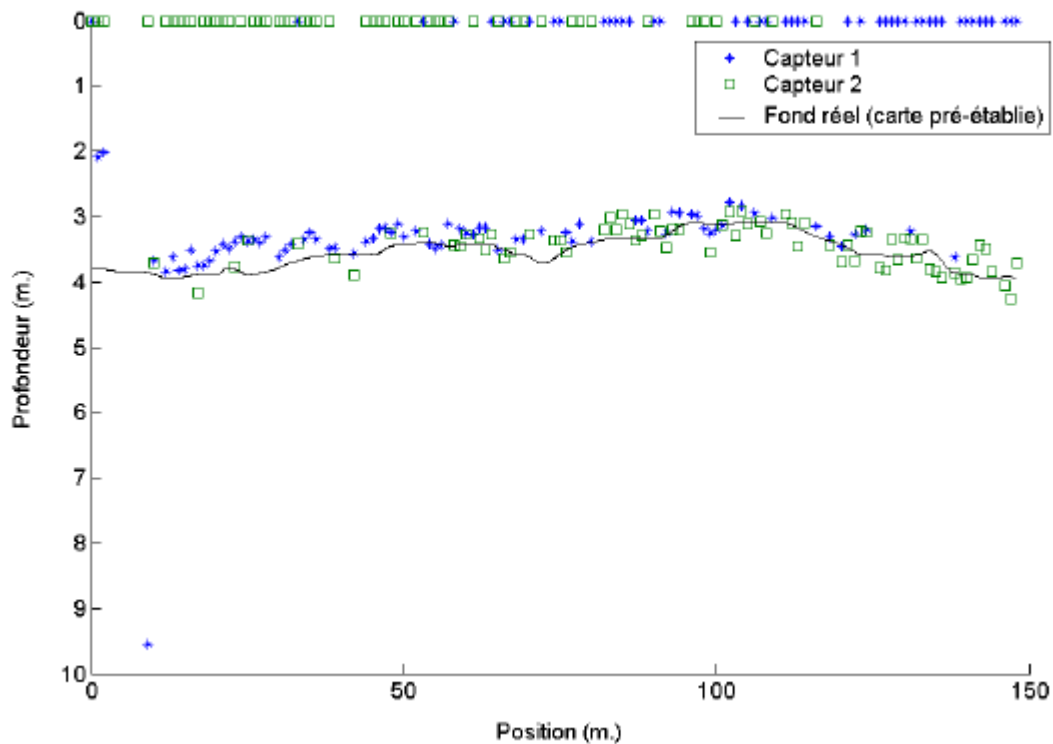


Figure 65 - Acquisitions bathymétriques lors du premier essai (navigation en boucle ouverte)

L'écart entre le profil bathymétrique relevé et les profondeurs correspondant au trajet réalisé sur la carte des fonds est inférieur à 50cm. La faible profondeur de la zone d'expérimentation (inférieure à 16 mètres) et les conditions météorologiques défavorables lors des essais ne permettent pas de conclure car les vagues perturbent la mesure de pression du véhicule qui permet à ce dernier de déterminer sa profondeur d'immersion. Pour pallier cet inconvénient il faudrait réaliser les essais par mer calme ou en utilisant un autre dispositif de

détermination de la profondeur d'immersion. Cependant, on peut noter que cette valeur n'excède pas les limites fixées de la précision théorique du dispositif.

En outre, cet essai prouve que le dispositif fonctionne correctement sans être affecté par les perturbations acoustiques du propulseur du véhicule et du *ping* (dispositif de sécurité fixé au véhicule et permettant de le localiser). Cette bonne aptitude à percevoir le fond marin nous permet de tester à présent l'algorithme de suivi de fond. Ce nouvel essai porte le nom d'essai en boucle fermée.

IV.12. Essai en milieu naturel en boucle fermée

IV.12.1. Conditions de l'essai

Comme précédemment, le véhicule *Taipan* navigue au-dessus de la source de La Vise et les acquisitions bathymétriques sont effectuées par deux sondes (cf. essai en boucle ouverte). Les informations de profondeur obtenues au cours du déplacement sont à présent utilisées pour générer la commande du véhicule afin qu'il suive le fond. La méthode utilisée pour générer les trajectoires est celle décrite dans le précédent chapitre. Deux essais de ce type ont été réalisés consécutivement dans une mer agitée (30 à 40 cm de creux). Comme lors de l'essai précédent, on a relevé par GPS les positions de départ et d'arrivée du véhicule afin de pouvoir comparer les données acquises avec celles de la carte de la zone (IV.10.1).

IV.12.2. Résultats

L'écart entre le profil bathymétrique relevé et les profondeurs de la carte des fonds est inférieur à 50cm pour les zones de faible pente et peut dépasser 1 mètre pour la zone où la pente est grande et où cône se rétrécit. L'erreur importante observée dans le rétrécissement du cône est due à la largeur du faisceau acoustique (comparable aux dimensions de la zone explorée) et à d'éventuels rebonds du signal acoustique.

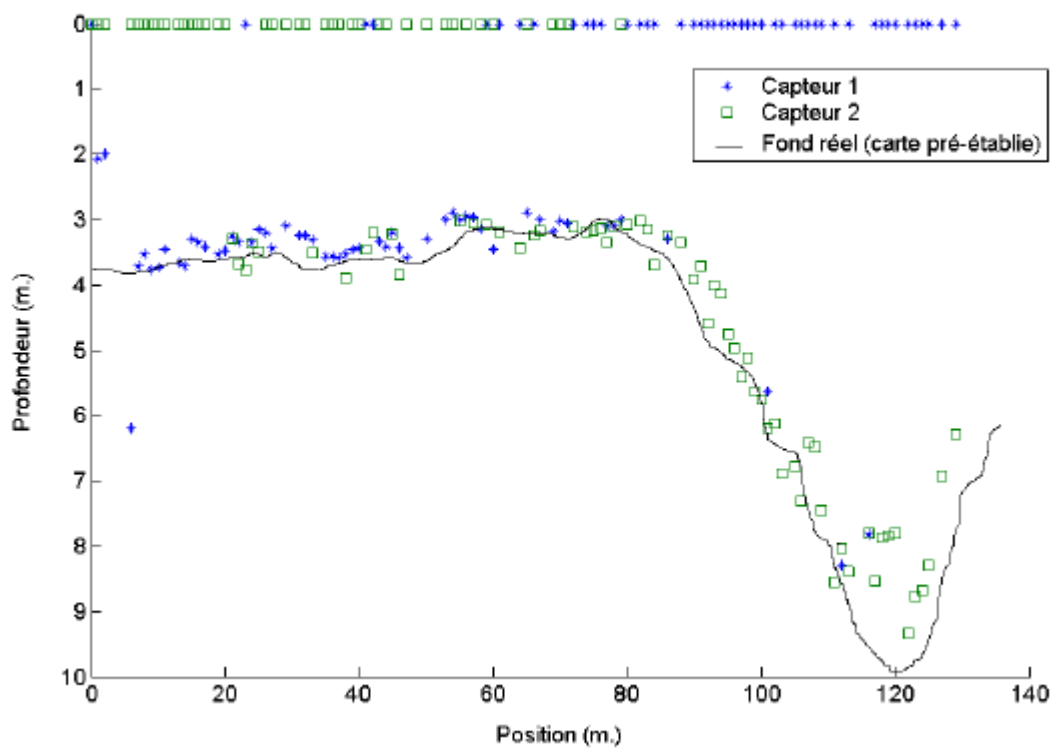


Figure 66 - Acquisitions bathymétriques lors du deuxième essai (boucle fermée)

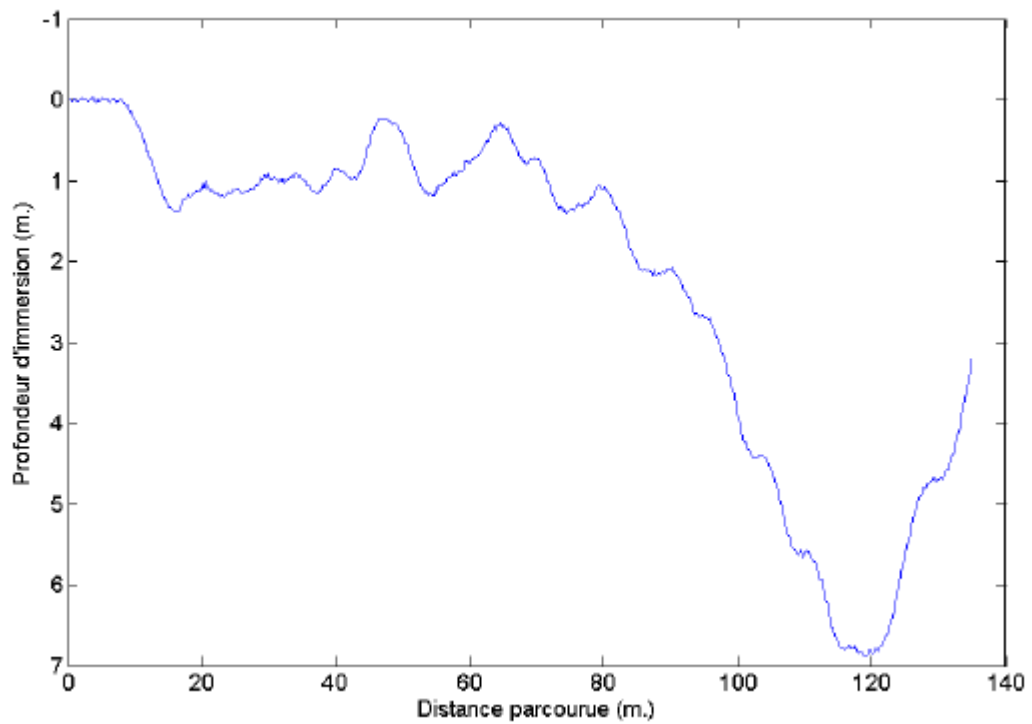


Figure 67 - Trajectoire du véhicule dans le plan vertical (essai en boucle fermée)

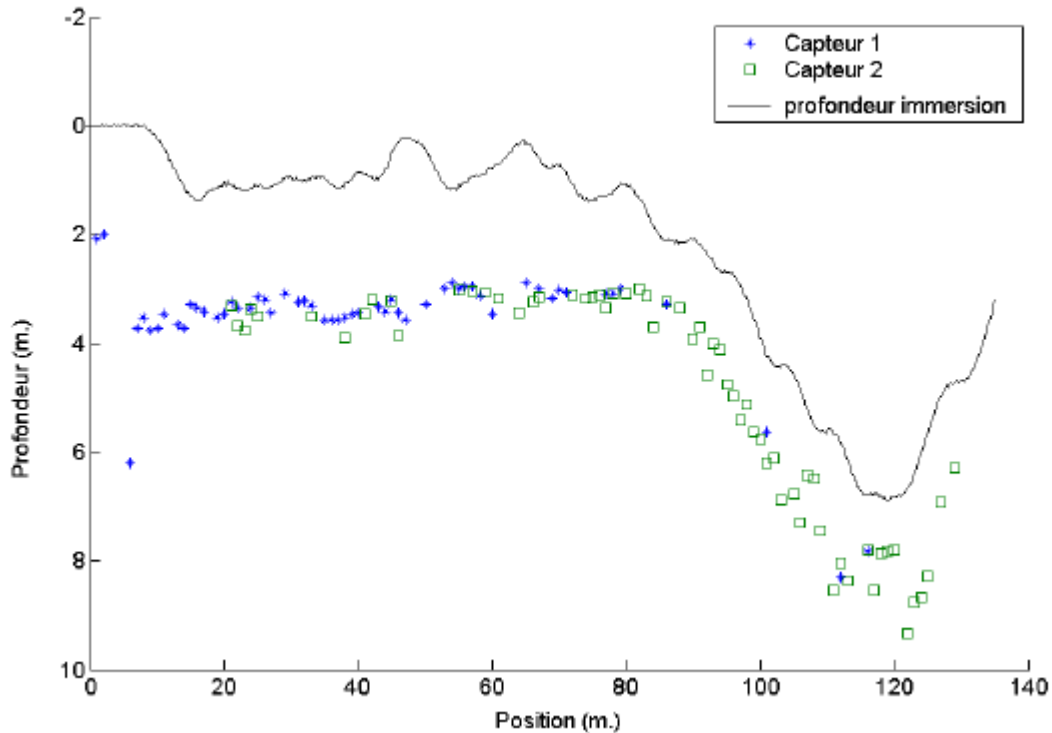


Figure 68 - Trajectoire du véhicule et données bathymétriques perçues

La comparaison de la trajectoire suivie par le véhicule (Figure 68) avec la trajectoire idéale générée hors-ligne à partir de la carte des fonds (Figure 66) révèle des écarts pouvant atteindre 90 cm. Cette valeur excède celle attendue théoriquement. Lors de l'essai en boucle ouverte, nous avons également observé que le robot parvenait difficilement à suivre une trajectoire pourtant rectiligne. Les écarts avec la trajectoire de consigne pouvaient alors dépasser 70 cm. Ceci est dû à un problème de commande du véhicule. Outre les perturbations extérieures (vagues) importantes lors des essais (jusqu'à 40 cm de creux et mer courte), la qualité de la commande a été affectée par le fait que nous ne disposions pas d'un modèle dynamique assez précis (prise en compte des modifications structurelles de Taipan). Malgré l'utilisation de la commande en mode glissant sensée effacer les incertitudes de modélisation et les perturbations extérieures, la faible envergure des gouvernes ne conférait pas à ces dernières la force suffisante pour assurer un suivi correct de trajectoire. Lors de la conception du véhicule, en effet, le cahier des charges prévoyait une vitesse de déplacement de 12 nœuds, soit trois fois plus que la vitesse actuelle (la force hydrodynamique exercée sur les gouvernes augmentant avec le déplacement de l'eau autour de ces dernières, le dimensionnement correct de ce type d'actionneur dépend de la vitesse du véhicule).

Les résultats obtenus lors de cet essai sont cependant très encourageants dans la mesure où le véhicule est parvenu seul à percevoir le fond marin et à le suivre sans le percuter. Malgré le problème de commande observé, il semble que l'algorithme utilisé parvienne à planifier des trajectoires de suivi de fond qui respectent les capacités de déplacement du véhicule.

Nous avons mené un deuxième essai de suivi de fond en boucle fermée. Cependant, un problème informatique a empêché la récupération des données de navigation (profondeur d'immersion, points GPS). Seules les acquisitions bathymétriques des sondeurs ont été récupérées (Figure 69). L'absence de positionnement GPS nous empêche d'en estimer la pertinence.

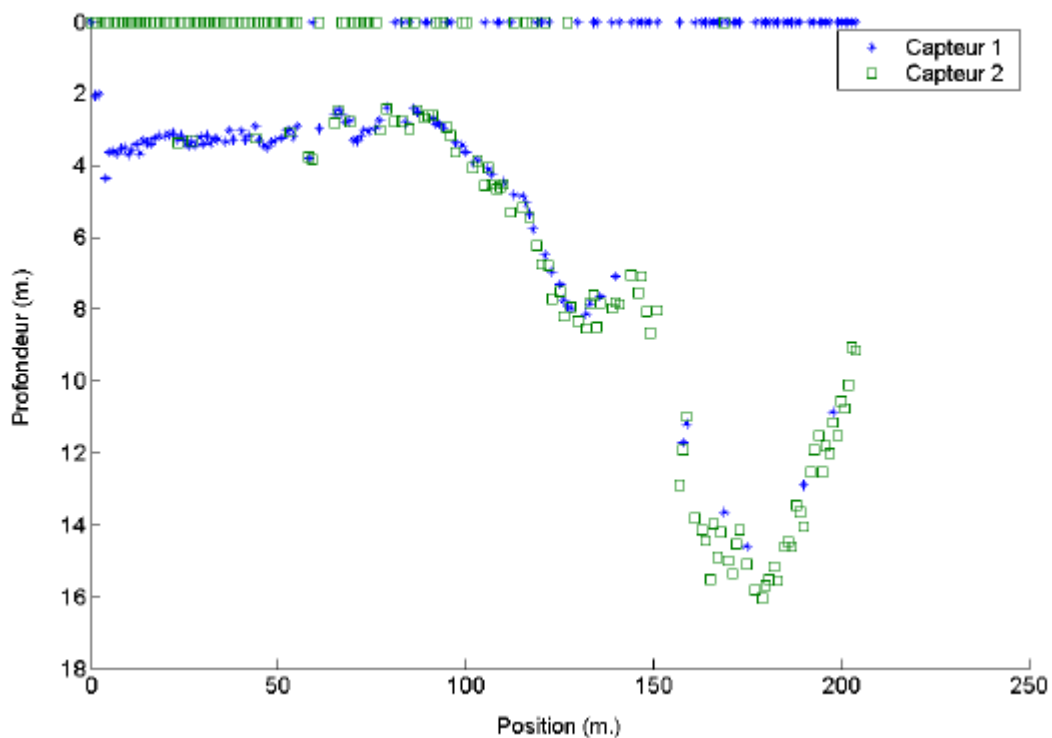


Figure 69 - Acquisitions bathymétriques lors du deuxième essai en boucle fermée

IV.13. Conclusion des expérimentations

Plusieurs essais en milieu naturel nous ont permis de tester notre méthode de suivi de fond. Nous avons tout d'abord expérimenté le dispositif d'acquisition des données bathymétriques en faisant naviguer le véhicule à profondeur constante (essai en boucle ouverte). Les profondeurs ainsi obtenues ont été comparées avec les données bathymétriques acquises lors d'une phase de cartographie préalable. Les résultats étant conformes aux attentes théoriques, nous avons procédé à deux essais en boucle fermée. Le véhicule a alors accompli un suivi de fond basé uniquement sur les acquisitions de son dispositif bathymétrique (sondeurs). L'écart entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques varie en fonction du type de fond rencontré. Il est faible lorsque le véhicule survole des zones au relief peu contrasté et il est élevé lorsque le véhicule approche de la source sous-marine. L'erreur observée est imputable à la fois à un problème de commande du véhicule le jour des expérimentations et à un problème de perception. Ce dernier est dû à la géométrie de la source, favorable aux échos multiples et dont les dimensions sont comparables à la largeur des faisceaux acoustiques utilisés pour la détection du fond. Cependant, à l'extérieur du cône de la source, les résultats expérimentaux du suivi de fond sont très satisfaisants et confirment ceux obtenus lors des simulations.

Conclusion générale

Ce mémoire présente une étude générale de la problématique du suivi de fond par des véhicules sous-marins autonomes. Ce problème du suivi de fond est générique en robotique mobile terrestre. Dans ce domaine, si l'évolution du véhicule s'effectue dans un milieu structuré, il s'agira, par exemple, de suivre un mur ou toute autre surface. Si l'évolution de l'engin est en tout terrain, la problématique appelée 2D1/2 consiste par exemple à suivre une ligne matérielle ou virtuelle. La distinction que l'on peut faire en robotique sous-marine avec l'approche classique qui vient d'être évoquée, réside pour l'essentiel dans la dimension de l'espace d'évolution. En robotique sous-marine, nous l'avons souligné dans cette étude, l'espace d'évolution est à 3 dimensions. En robotique terrestre, le véhicule restant en contact permanent avec le sol, le problème consiste à gérer son évolution en longitude et latitude. Les contraintes vis-à-vis de l'intégrité du véhicule consistent à vérifier qu'il peut franchir un obstacle ou que son assiette reste dans le domaine où le véhicule ne se renversera pas. Les contraintes liées à la génération de trajectoire doivent prendre en compte les données environnementales ainsi que les contraintes cinématiques du véhicule. Dans le domaine sous-marin, la troisième dimension introduit une contrainte de nature supplémentaire par rapport au domaine terrestre, contrainte partagée par la robotique aérienne. Celle-ci impose de définir la distance par rapport au fond ainsi que l'attitude du véhicule par rapport au plan tangent défini au point de surplomb du fond.

La robotique sous-marine étant un domaine de développement récent, peu d'études ont été consacrées au suivi de fond. Santos est l'un des seuls à avoir étudié simultanément les problèmes de la perception du fond et de la commande des robots pour assurer le suivi d'une trajectoire par un véhicule sous-marin sous-actionné. Dans la plupart des autres études, le principal souci est la perception et la caractérisation du relief marin, les trajectoires générées pouvant reproduire strictement le profil de fond car elles sont destinées à des véhicules sur-actionnés parfaitement holonomes. Santos a introduit une méthode de suivi de fond pour A.U.V. de type « plan-canard » (torpille) consistant à commander en tangage un véhicule en fonction des distances mesurées par deux sondeurs situés à ses deux extrémités. Cet asservissement local n'est cependant réalisable que sous l'hypothèse d'un fond aux variations compatibles avec le rayon de courbure minimal du véhicule. C'est pour cette raison que nous avons choisi d'étudier le cas d'un véhicule sous-marin autonome sous-actionné suivant un fond quelconque. Puisqu'il n'est alors plus question de reproduire exactement le relief du fond, nous avons proposé une méthode permettant de construire des trajectoires compatibles avec les capacités de manœuvre de ce type d'engins.

Par ailleurs, aucune étude n'ayant été consacrée au problème de la détection et de l'évitement de falaises sous-marines, il nous a semblé important de chercher à adjoindre une telle fonction à notre méthode de suivi de fond afin de garantir la sécurité du véhicule.

Dans un premier temps, nous avons établi les contraintes qui allaient nous permettre de générer des trajectoires qui soient compatibles avec les capacités de mouvement des véhicules sous-actionnés. Pour les robots de type torpille civile, qui appartiennent à cette dernière catégorie de véhicules, nous avons isolé les deux principales contraintes qui régissent les déplacements :

- ✓ le rayon de courbure minimal de la trajectoire à une vitesse donnée, imposé par les dimensions de l'appareil et celles de ses barres de plongée.
- ✓ la pente maximale de la trajectoire, dont nous avons vu qu'elle était liée soit au matériel embarqué, soit au couple de rappel hydrostatique du véhicule.

Nous avons ensuite proposé une méthode de suivi de fond prenant en compte ces contraintes. Pour cette méthode, la génération des trajectoires suppose la connaissance de la position du véhicule dans un environnement bathymétrique connu *a priori*. À l'aide d'arcs de cercles et de portions de droites, nous corrigeons ensuite les zones de fond incompatibles avec les contraintes fixées. La trajectoire obtenue peut ou non être « adoucie » à l'aide de splines cubiques semi-forcées si la continuité de la dérivée seconde est requise le long de la trajectoire. La connaissance *a priori* de l'environnement bathymétrique n'étant pas toujours assurée, nous avons adapté la première méthode au cas local, où le véhicule navigue dans un environnement inconnu dont il découvre progressivement les caractéristiques physiques.

Pour cela, nous avons présenté un dispositif de perception spécifique qui répond aux exigences d'encombrement et de consommation des véhicules sous-marins autonomes. Les procédés utilisés habituellement nécessitent des sonars dont les dimensions et la consommation sont pénalisantes. Il nous a paru intéressant de chercher une méthode permettant d'assurer le suivi de fond en minimisant la quantité d'information nécessaire. La solution que nous proposons est innovante car les données bathymétriques ne sont acquises que par deux sondeurs mono-faisceaux disposés dans la partie avant du véhicule. Afin de déterminer les instants de renouvellement des trajectoires planifiées, nous avons étudié les modèles des faisceaux acoustiques des sondeurs et défini les zones non insonifiées, appelées « zones d'ombre ».

Nous avons ensuite détaillé comment l'adjonction d'un troisième sondeur à l'avant du véhicule nous permettait de compléter la méthode de suivi de fond en milieu inconnu, afin que celle-ci tienne compte de l'éventualité de se trouver face à un aplomb. Nous avons alors montré qu'un algorithme basé sur un découpage du faisceau en trois zones de perception permettait de classer les échos reçus et d'adapter le comportement du véhicule en conséquence. Nous avons expliqué comment déterminer alors la taille de l'obstacle et la manière de l'éviter afin d'assurer la sécurité du véhicule tout en tâchant de suivre le fond au plus près.

Cette méthode conjointe de suivi de fond et d'évitement des falaises sous-marines présente plusieurs avantages par rapport aux méthodes existantes. Elle ne nécessite en effet aucune connaissance *a priori* de l'environnement dans lequel se déplace le véhicule. Son coût en temps de calcul est faible. Le système de perception a pour avantages un faible encombrement, une faible consommation électrique et un coût très inférieur à celui des autres systèmes de télédétection acoustique. En outre, il ne perturbe pas l'hydrodynamisme du véhicule.

Pour vérifier la validité des méthodes que nous avons introduites, nous avons en premier lieu procédé à des simulations, en tenant compte du modèle hydrodynamique du véhicule autonome sous-marin *Taipan*. Ces simulations montrent une bonne aptitude du véhicule à suivre les trajectoires planifiées. La précision du suivi de fond est peu affectée par le passage d'un environnement connu à un environnement inconnu. La différence observée a pour origine l'imprécision des sondeurs, pourtant améliorée par un algorithme adapté. Les résultats obtenus lors des simulations de l'algorithme d'évitement de falaises nous ont permis de vérifier les trajectoires prévues lors de l'étude théorique.

Dans un deuxième temps, nous avons procédé à la validation expérimentale de notre méthode de suivi de fond. Nous avons mis en place le dispositif d'acquisition à bord du véhicule autonome sous-marin *Taipan*. Des tests en piscine puis en milieu naturel ont permis de vérifier le fonctionnement du système d'acquisition. Par la suite, des essais de suivi de fond ont été menés près de la source sous-marine de La Vise (Hérault), afin de vérifier l'aptitude du véhicule à détecter le fond, à planifier une trajectoire et à suivre cette dernière.

A l'issue de notre étude, nous relevons plusieurs améliorations possibles. Tout d'abord, en ce qui concerne la méthode de génération des trajectoires.

Si les résultats obtenus avec la méthode présentée sont satisfaisants, plusieurs améliorations sont toutefois envisageables.

La commande utilisée (mode glissant) pour assurer le suivi des trajectoires est classique en robotique sous-marine. Cependant, elle implique une intense activité des actionneurs, qui a pour conséquence une surconsommation énergétique. La diminution de l'autonomie qui en découle est particulièrement gênante dans le domaine de la robotique sous-marine. L'amélioration de cette commande par la prise en compte d'une partie du modèle dynamique pourrait permettre de diminuer l'activité des gouvernes. D'autres types de commandes pourraient également s'avérer intéressants, tels que la commande en mode glissant d'ordre supérieur.

Il est également envisageable d'augmenter la précision du suivi de fond en améliorant le système de perception. Des systèmes d'acquisition ont été décrits dans le manuscrit (sonar à balayage...) mais ils présentent l'inconvénient d'être inadaptés aux petits AUVs, en termes d'encombrement et de consommation énergétique. Des solutions techniques récentes telles que la mise en place de fines bandes piézo-électriques le long de la coque permettent par formation électronique de voies d'améliorer la précision angulaire de la localisation. L'exploitation des mouvements du véhicule est également une solution possible car cela permet de simuler l'existence d'une antenne de grande dimension. On parle alors d'antenne synthétique.

L'odométrie du véhicule pourrait, elle aussi, être améliorée en utilisant des centrales inertielles ou des dispositifs de mesure de la vitesse absolue du véhicule (loch à effet Doppler). Là encore, l'encombrement et la consommation s'avèreront des critères de choix décisifs.

L'amélioration la plus importante concerne la méthode utilisée pour construire les trajectoires. En effet, bien que celles obtenues soient compatibles avec les capacités de manœuvre du véhicule, ces capacités ne sont pas entièrement exploitées et il serait possible de générer des trajectoires respectant davantage les variations du profil de fond. Cela supposerait de savoir déterminer analytiquement à partir du modèle dynamique quelles sont les trajectoires admissibles. Cette intégration analytique n'a pas de solution mathématique à ce jour, mais ce problème est un sujet de recherche actuel connu sous le nom de «kinodynamic

motion planning problem» [MCI00]. Les solutions, en cours de développement, relèvent à la fois de la recherche en robotique et de la recherche en mathématiques. L'application de ce problème au cas de la robotique sous-marine pourrait présenter un intérêt majeur dans l'amélioration de la méthode proposée.

Enfin, l'émergence récente de la navigation en flottille, permet d'envisager le problème du suivi de fond sous un nouveau jour. L'échange d'informations bathymétriques par modem acoustique pourrait permettre aux véhicules d'enrichir leur connaissance de l'environnement sans disposer de capteurs acoustiques évolués. Une autre solution pourrait consister à placer en tête de flottille un véhicule instrumenté spécialisé dans la perception bathymétrique, chargé de transmettre aux autres les informations nécessaires au suivi de fond.

Lexique

Assiette : angle que fait l'axe longitudinal d'un bâtiment avec le plan horizontal.

A.U.V. (Autonomous Underwater Vehicle) : véhicule autonome sous-marin, capable de se positionner et de naviguer seul sans être télécommandé depuis la surface.

Bâbord : Partie du navire qui se trouve à gauche lorsque l'on fait face à l'avant.

Bathymétrie : mesure des profondeurs marines.

Pipeline : canalisation sous-marine servant à transporter du pétrole.

Poupe : Arrière d'un navire.

Proue : Avant d'un navire.

Rouler : être affecté d'un mouvement alternatif de roulis (rotation autour de l'axe longitudinal du véhicule)

Sonar latéral : Un sonar latéral a pour fonction de constituer des images acoustiques détaillées des fonds marins. Un faisceau sonore étroit est émis avec une incidence rasante, et intercepte le fond selon une fine bande s'évasant avec la distance. A l'intérieur de cette zone, le signal émis, très court, va délimiter une zone insonifiée de très faible dimension qui va balayer toute la zone couverte ou *fauchée*. L'écho ainsi recueilli au cours du temps est une représentation de la réflectivité du fond le long de la fauchée, et surtout de la présence d'irrégularité ou de petits obstacles qui sont "vus" par le signal très résolvant. Ce signal, enregistré latéralement à la direction d'avancée du sonar (*side-scan sonar*) est juxtaposé aux signaux successifs déjà obtenus par le sonar pendant son avancée, constituant ainsi, ligne après ligne, une véritable "image acoustique du fond" [LUR98]. Le système est basé sur l'utilisation d'antennes de géométrie rectangulaire très allongée, créant une directivité largement ouverte dans le plan vertical (plusieurs dizaines de degrés, pour insonifier largement en distance transversale tout en évitant la surface de la mer) et très étroite dans le plan horizontal (pour avoir un faisceau très résolvant, en général de l'ordre de 1° voire moins).

Téléométrie : mesure de distance.

Transducteur électroacoustique : dispositif utilisant un quartz pour transformer l'énergie électrique en énergie acoustique et réciproquement. Les transducteurs servent à émettre et recevoir les signaux acoustiques des sondeurs ou des sonars.

Tribord : Partie du navire qui se trouve à droite lorsque l'on fait face à l'avant.

Bibliographie

- [AHL67] J.H. Ahlberg, E.N. Nilson et J.L. Walsh, “*The theory of splines and their applications*”, Vol.38 de Mathematics in science and engineering, Academic Press, 1967.
- [AIT93] K. Ait-Abderrahim, «*Commande de Robots Mobiles*», Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, 1993.
- [ARA94] K. Aramaki, T. Ura, «*Local Map Drawing by AUV and Path Planning*», Recent Advances in Marine Science and Technology '94, Townsville, Australia, Oct. 1994, pp.35-45
- [AUC81] M. Aucher, «*Dynamique des Sous-Marins*», Sciences et Techniques de l’armement, 55, 4^{ème} fasc., Paris, 1981.
- [BAC01a] P. Baccou, B. Jouvencel, and V. Creuze, “*Single Acoustic Beacon for AUV Navigation*”, ICAR2001 IEEE, Budapest, Août 2001.
- [BAC01b] P. Baccou, B. Jouvencel, V. Creuze, and C. Rabaud, “*Cooperative positioning and navigation for multiple AUV operations*”, OCEANS2001 MTS/IEEE, Honolulu, November 2001.
- [BAC01c] P. Baccou, “ “, Thèse de doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier, Décembre 2001.
- [BAC02] P. Baccou, B. Jouvencel, and V. Creuze, “*Homing and navigation using one transponder*”, ICRA2002 IEEE, Washington D.C., Mai 2002
- [BOI] M.Boisrayon, B.Tocquet, «*Mesures acoustiques*», Théorie et applications de l’acoustique sous-marine, Tome 3, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées
- [BOR01] G. A. Borges, M.-J. Aldon, “*Design of a Robust Real-Time Dynamic Localization System for Mobile Robots*”, Proc. of 9th International Symposium on Intelligent Robotic Systems (SIRS), Toulouse, France, 2001.
- [BRO94] Brokloff, «*Matrix Algorithm For Doppler Sonar Navigation*», OCEANS94 IEEE, Brest, Sept 94, III, p.378-383
- [BRU94] Donald P. Brutzman, “*A Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle*”, dissertation, Naval Postgraduate school, Monterey California, 1994.
- [CAI] J.G.Cailloux, B.Tocquet, «*Capteurs acoustiques*», Théorie et applications de l’acoustique sous-marine, Tome 2, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées
- [CAU92] I. Caux, «*Mesure des coefficients hydrodynamiques d'une cible sous-marine, Etude 2490, pièce n°3*», Bassin d'Essais des Carènes, Paris, 1992.

- [COI92] Philippe Coiffet, « *La robotique* », Hermès science publications (traité des nouvelles technologies), ISBN : 2866012976, 1992.
- [COR99a] L.Cordesses, C. Cariou, P.Martinet et C. Thibaud, « *CP-DGPS based combine harvester control without orientation sensor* », ION99, 1999.
- [COR99b] L.Cordesses, P.Martinet, B. Thuilot et M. Berducat, « *GPS-based control of a land vehicle* », IAARC99, 1999.
- [CRE01a] V.Creuze and B. Jouvencel, “*Une méthode de suivi de fond pour véhicule autonome sous-marin sous-actionné*”, 14’JJCR, Evry, May 2001.
- [CRE01b] V. Creuze, B. Jouvencel, and P. Baccou, “*Seabed following for small autonomous underwater vehicles*”, OCEANS2001 MTS/IEEE, Honolulu, November 2001.
- [CRE02] V. Creuze and B. Jouvencel, “*Avoidance of Underwater Cliffs for Autonomous Underwater Vehicles*”, IROS 2002 IEEE, Lausanne, October 2002.
- [CRI90] R Cristi, F.A. Papoulias et A.J. Healey, “*Adaptive sliding mode control of autonomous underwater vehicles in the dive plane*”, IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 15, n°3, July 1990.
- [DUB57] L. E. Dubins, “*On curves of minimal length with a constraint on average curvature and with prescribed initial and terminal positions and tangents*”, Amer. J. Math., 497–516, 1957.
- [ELF86] A. Elfes, « *A Sonar-based Mapping and Navigation System* », IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pittsburgh, April 1986.
- [ESP92] Espiau, B., F. Chaumette, and P. Rives, “*A new approach to visual servoing in robotics*”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992
- [FOS94] Thor I. Fossen, “*Guidance and Control of Ocean Vehicles*”, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1994.
- [GRA] B.Granvaux, J.L.Nicolas, M.Semillon, « *Acoustique sous-marine* », Théorie et applications de l’acoustique sous-marine, Tome 1, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées.
- [INT.htm] <http://www.interphase-tech.com/pcview.htm>
- [JOU01] B. Jouvencel, V. Creuze, and P. Baccou, “*A New Method for Multiple AUV Coordination. A Reactive Approach*”, ETFA2001 IEEE, Antibes, Octobre 2001.
- [KHA99] W. Khalil et E. Dombre, *Modélisation, Identification et Command des Robots*, 2^{ème} édition, Collection Robotique, Hermès Science Publications, Paris, 1999.

- [KUC87] R. Kuc and M. Siegel, “*Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation*”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 6, Novembre 1987, pp. 766-778.
- [LAT91] J.-C. Latombe, “*Robot Motion Planning*”, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
- [LAZ96] S. Lazard, Planification de trajectoires de robots mobiles non-holonomes et de robots à pattes, Thèse de doctorat, Université Paris 6 – INRIA Sophia Antipolis, 1996.
- [LEFa] F.Lefaudeux, « *Détection des signaux acoustiques* », Théorie et applications de l’acoustique sous-marine, Tome 4, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées
- [LEFb] F.Lefaudeux, « *Systèmes sonar* », Théorie et applications de l’acoustique sous-marine, Tome 5, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées
- [LEO00] J. J. Leonard and H. J. S. Feder, “*A computationally efficient method for large-scale concurrent mapping and localization*”. Proceedings of the Ninth International Symposium on Robotics Research, Salt Lake City, Utah, Springer-Verlag, 2000, pp. 169-176.
- [LUR98] X. Lurton, « *Acoustique sous-marine, présentation et applications* », Editions Ifremer, 1998.
- [MAR97a] P. Martinet, C. Debain, M. Berducat, P. Bonton et J. Gallice, “*Asservissement visuel pour le guidage d’engins agricoles* », J3A, 1997.
- [MAR97b] P. Martinet, D. Khadraoui, C. Thibaud, and J.Gallice, “*Controller synthesis applied to automatic guided vehicles*”, SYROCO97’, 1997.
- [MCI00] K. A. McIsaac, J. P. Ostrowski, “*Motion planning for Dynamic Eel-like Robots*”, IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, 24-28 avril 2000.
- [MUR90] R.M Murray and S. Sastry, “*Steering non holonomic systems using sinusoids*”, Proceedings of the CDC, pages 2097–2101, 1990.
- [NAG97] Y. Nagasaka, R. Otani, K. Shigeta, and K. Taniwaki, “*Automated operation in paddy fields with a fiber optic gyro sensor and GPS*”, International Workshop on Robotics and Automated Machinery for Bio-Productions, BIO-ROBOTICS’97, p.21-26, 1997.
- [NEW98] P. Newman, H. Durrant-White, « *Using Sonar in Terrain-Aided Underwater Navigation* », Department of Mechatronics, University of Sydney, IEEE, 1998, p.440-445.
- [PAS] M. Pasteau, R. Philippart, A. Dziedzic, « *Applications de l’acoustique* », Théorie et applications de l’acoustique sous-marine, Tome 6, Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées, ISBN 2.7225.0442.1.

- [PAT94] O. Patrouix, « *Modélisation multi-niveaux de données ultra-sonores : Application à la robotique mobile* », Thèse, Université Montpellier II, 1994
- [PET98] Y. Petillot, J. Teña Ruiz, D.M. Lane, “*Underwater vehicle path planning using a multi-beam forward looking sonar*”, IEEE, Revue, 1998, page 1194
- [REE90] J. A. Reeds and L. A. Shepp, “*Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards*”. Pacific Journal of Mathematics, 145(2), 1990.
- [RIG89] V. Rigaud, L. Marcé, « *Acoustic data fusion for an absolute submarine navigation* », IFREMER/IRISA, IARP 1st Workshop on Multisensors Fusion and Environment Modelling, Toulouse, 1989
- [SAF01] A. Safak Sekmen and B. Barshan, « *Estimation of object location and radius of curvature using ultrasonic sonar* », Applied Acoustics, Volume 62, Elsevier Science Ltd, July 2001, pp. 841-865.
- [SAM91] Samson, C., M. Le Borgne, and B. Espiau, “*Robot Control. The task function approach*”, ISBN 0-19-8538057, Oxford, 1991.
- [SAM95] C. Samson, “*Control of chained systems: Application to path following and time-varying point stabilization of mobile robots*”, IEEE Transactions on Automatic Control, 1995.
- [SAN95a] A. Santos, « *Contribution à la conception des sous-marins autonomes: architecture des actionneurs, architecture des capteurs d'altitude, et commandes référencées capteurs* », Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris, Décembre 1995.
- [SAN95b] A. Santos, D. Simon et V. Rigaud, “*Sensor-based control of under-actuated autonomous underwater vehicles*”, IFAC (CAMS) 95, Trondheim, Mai 1995.
- [SLO91] J-J. Slotine et W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.
- [SMI97] C. M. Smith et J. J. Leonard, «*A multiple hypothesis approach to concurrent mapping and localization for autonomous underwater vehicles*”, Proceedings of International Conference on Field and Service Robotics, Sydney, Australia, December, 1997, Proceedings publiés par Springer-Verlag, 1998.
- [STR99] O. Strauss, F. Comby et M.J. Aldon, “*Multibeam sonar image matching for terrain-based underwater navigation*”, OCEANS'99 MTS/IEEE, Seattle, Septembre 1999 (CD-ROM)
- [VAG98] J. Vaganay, B. Jouvencel, P. Lépinay, et R. Zapata, “*Taipan, an AUV for very Shallow Water Applications*”, WAC'98, Anchorage, 1998.

- [VAG00] J. Vaganay, B. Jouvencel, P. Baccou et V. Creuze, "*The Odyssey of Taipan exploring the Ocean at GOATS 2000*", GOATS2000 / Saclantcen, La Spezia, October 2000.
- [VAG01] J. Vaganay, B. Jouvencel, P. Baccou et V. Creuze, "*The Odyssey of Taipan exploring the Ocean at GOATS 2000*", GOATS2000, Saclantcen, La Spezia, 2001.
- [ZAP96] R. Zapata, P. Lépinay, "*Collision avoidance and bottom following of a torpedo-like vehicle*", OCEANS96, Fort Lauderdale, Floride, 23-25 sept 96.

Annexe 1 : Commande de Taipan en cap et en immersion

Passage aux équations sans dimension

Dans les problèmes d'hydrodynamique, il est commode d'utiliser des nombres sans dimension appelés coefficients hydrodynamiques quand ils se rapportent aux efforts hydrodynamiques. On choisit les nombres sans dimension suivants :

- ✓ $\tau = (Vs/L) t$ ($\tau=1$ =temps mis pour parcourir la longueur L du sous-marin)
- ✓ $A = (\pi/4) D^2$ (A =aire de référence, D diamètre du sous-marin)
- ✓ coefficients de force et de moments (ρ désignant la masse spécifique de l'eau) :

$$\begin{aligned} C_X &= \frac{X}{\frac{\rho}{2} A V_s^2}; & C_Y &= \frac{Y}{\frac{\rho}{2} A V_s^2}; & C_Z &= \frac{Z}{\frac{\rho}{2} A V_s^2} \\ C_L &= \frac{L}{\frac{\rho}{2} A L V_s^2}; & C_M &= \frac{M}{\frac{\rho}{2} A L V_s^2}; & C_N &= \frac{N}{\frac{\rho}{2} A L V_s^2} \end{aligned} \quad (\text{Eq 45})$$

vitesses linéaires :

$$u = \frac{U}{V_s}; \quad v = \frac{V}{V_s}; \quad w = \frac{W}{V_s}; \quad (\text{Eq 46})$$

accélérations linéaires :

$$\dot{u} = \frac{L}{V_s^2} \dot{U}; \quad \dot{v} = \frac{L}{V_s^2} \dot{V}; \quad \dot{w} = \frac{L}{V_s^2} \dot{W}; \quad (\text{Eq 47})$$

vitesses angulaires :

$$p = \frac{P}{\tau} = P \frac{L}{V_s}; \quad q = Q \frac{L}{V_s}; \quad r = R \frac{L}{V_s} \quad (\text{Eq 48})$$

accélérations angulaires :

$$\dot{q} = \frac{dq}{d\tau} = \frac{L}{V_s} \frac{dQ}{dt} \frac{dt}{d\tau} = \frac{L^2}{V_s^2} \dot{Q} \quad (\text{Eq 49})$$

coefficient de volume : $k_\Delta = \Delta/(AL) = m/(\rho AL)$

coefficient d'inertie : $k_i = I/(\rho AL^3)$

$$\gamma = ga/V_s^2$$

On a:

$$\begin{aligned} \frac{\rho}{2} AV_s^2 C_X &= X_U \dot{U} \\ \frac{\rho}{2} AV_s^2 C_Y &= Y_V \dot{V} + Y_R \dot{R} + Y_{\dot{V}} \dot{V} + Y_{\alpha} \dot{\alpha} \\ \frac{\rho}{2} AV_s^2 C_Z &= Z_W \dot{W} + Z_Q \dot{Q} + Z_{\dot{W}} \dot{W} + Z_{\beta} \dot{\beta} \\ \frac{\rho}{2} ALV_s^2 C_L &= L_V \dot{V} + L_P \dot{P} + L_R \dot{R} + L_{\dot{V}} \dot{V} + L_{\dot{P}} \dot{P} + L_{\dot{R}} \dot{R} - mga\phi \\ \frac{\rho}{2} ALV_s^2 C_M &= M_W \dot{W} + M_Q \dot{Q} + M_{\dot{Q}} \dot{Q} + M_{\beta} \dot{\beta} - mga\theta \\ \frac{\rho}{2} ALV_s^2 C_N &= N_V \dot{V} + N_R \dot{R} + N_{\dot{R}} \dot{R} + N_{\alpha} \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (\text{Eq 50})$$

En prenant en compte les équations précédentes, le système d'équations (Eq 50) peut être réécrit sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} C_X &= C_{Xu} \dot{u} \\ C_Y &= C_{Yv} \dot{v} + C_{Yr} \dot{r} + C_{Y\dot{v}} \dot{v} + C_{Y\alpha} \dot{\alpha} \\ C_Z &= C_{Zw} \dot{w} + C_{Zq} \dot{q} + C_{Z\dot{w}} \dot{w} + C_{Z\beta} \dot{\beta} \\ C_L &= C_{Lv} \dot{v} + C_{Lp} \dot{p} + C_{Lr} \dot{r} + C_{L\dot{v}} \dot{v} + C_{L\dot{p}} \dot{p} + C_{L\dot{r}} \dot{r} + k_1 \\ C_M &= C_{Mw} \dot{w} + C_{Mq} \dot{q} + C_{M\dot{q}} \dot{q} + C_{M\beta} \dot{\beta} + k_2 \\ C_N &= C_{Nv} \dot{v} + C_{Nr} \dot{r} + C_{N\dot{r}} \dot{r} + C_{N\alpha} \dot{\alpha} \end{aligned} \quad (\text{Eq 51})$$

avec par exemple pour l'équation en C_M :

$$C_{Mw} = \frac{M_w}{\frac{\rho}{2} ALV_s^2}; C_{Mq} = \frac{M_Q}{\frac{\rho}{2} AL^2 V_s^2}; C_{M\dot{q}} = \frac{M_{\dot{q}}}{\frac{\rho}{2} AL^3}; C_{M\beta} = \frac{M_b}{\frac{\rho}{2} ALV_s^2}; k_2 = \frac{-mga\theta}{\frac{\rho}{2} ALV_s^2} \quad (\text{Eq 52})$$

D'après les définitions de k_{Δ} et γ , k_1 et k_2 peuvent aussi s'exprimer par :

$$k_2 = \frac{-mga\theta}{\frac{\rho}{2}ALV_s^2} = \frac{-m\gamma\theta}{\frac{\rho}{2}AL} = -2k_\Delta\gamma\theta \quad \text{et} \quad k_1 = -2k_\Delta\gamma\phi \quad (\text{Eq 53})$$

Comme on a divisé les seconds membres de (Eq 50) par $(\rho/2)AV_s^2$ pour les forces et par $(\rho/2)ALV_s^2$ pour les moments, on divise aussi les premiers membres, ce qui donne :

$$\begin{aligned} m\dot{U} &\rightarrow \frac{2m}{\rho AL}\dot{u} \\ m(\dot{V} + RU) &\rightarrow 2k_\Delta\dot{v} + 2k_\Delta r \\ m(\dot{W} - QU) &\rightarrow 2k_\Delta\dot{w} - 2k_\Delta q \\ I_x\dot{P} &\rightarrow 2k_{ix}\dot{p} \\ I_y\dot{Q} &\rightarrow 2k_{iy}\dot{q} \\ I_z\dot{R} &\rightarrow 2k_{iz}\dot{r} \end{aligned} \quad (\text{Eq 54})$$

On aboutit finalement au système d'équations sans dimension suivant :

$$\begin{aligned} U &= V_s = \text{cte} \\ (2k_\Delta - C_{Yv})\dot{v} &= C_{Yv}v + (C_{Yr} - 2k_\Delta)r + C_{Y\alpha}\alpha \\ (2k_\Delta - C_{Zw})\dot{w} &= C_{Zw}w + (C_{Zq} + 2k_\Delta)q + C_{Z\beta}\beta \\ (2k_{ix} - C_{Lp})\dot{p} &= C_{Lv}v + C_{Lp}p + C_{Lr}r + C_{Lv}\dot{v} + C_{Lr}\dot{r} - 2k_\Delta\gamma\phi \\ (2k_{iy} - C_{Mq})\dot{q} &= C_{Mw}w + C_{Mq}q + C_{M\beta}\beta - 2k_\Delta\gamma\theta \\ (2k_{iz} - C_{Nr})\dot{r} &= C_{Nv}v + C_{Nr}r + C_{N\alpha}\alpha \end{aligned} \quad (\text{Eq 55})$$

Valeurs numériques des coefficients

Le bassin des carènes a déterminé pour un véhicule semblable à Taipan certains paramètres intervenant dans les équations de mouvement sans dimension [CAU92] :

$$\begin{aligned} C_{Yv} &= -2.7, & C_{Yr} &= 1.05, & C_{Y\alpha} &= -0.3 \\ C_{Zw} &= -2.7, & C_{Zq} &= -1.05, & C_{Z\beta} &= -0.3 \\ C_{Mw} &= 0.64, & C_{Mq} &= -0.44, & C_{M\beta} &= -0.13 \\ C_{Nv} &= -0.64, & C_{Nr} &= -0.44, & C_{N\alpha} &= 0.13 \end{aligned} \quad (\text{Eq 56})$$

La pesée effectuée aux CNIM nous a permis de déterminer le volume de Taipan ($\Delta = 0.0252 \text{ m}^3$), sa masse ($m = 24.3 \text{ kg}$), la position de son centre de gravité.

L'inertie I_y autour de l'axe O_y a été déterminée approximativement de la façon suivante: les éléments de masses les plus conséquentes (batterie, moteur, queue, tête et corps de Taipan) ont été assimilés à des cylindres. Les dimensions, masses et distances (entre axe $O_{y'}$ propre - parallèle à O_y de Taipan - et O_y) de chacun de ces éléments sont données dans le tableau ci-dessous :

Élément	Longueur (m)	Rayon (m)	Masse (kg)	Distance (m)
batterie	0.366	0.0375	6.7	0.307
corps	1.195	0.075	4.6	0.1125
moteur	0.12	0.035	2.0	0.56
queue	0.21	0.025	1.36	0.815
tête	0.25	0.075	5.4	0.61

Figure 70 - Dimensions, masses et distances des éléments constitutifs

Le moment d'inertie $I_{y'}$ de chacun de ces éléments autour de son propre axe $O_{y'}$ (parallèle à l'axe O_y de Taipan) a été calculé par la formule :

$$I_{y'} = \frac{M}{12}(3R^2 + L^2) \quad (\text{Eq 57})$$

Chacun de ces moments a ensuite été transféré autour de O_y par application du théorème de Huygens :

$$I_y = I_{y'} + Md^2 \quad (\text{Eq 58})$$

La somme de ces moments d'inertie transférés est $I_y = 4.9045 \text{ kg.m}^2$. Etant donné la symétrie de forme, on a par ailleurs

$$I_z = I_y.$$

En ce qui concerne les inerties ajoutées, d'après [AUC81], on a :

$$C_{Mq} = C_{Nr} = -2k_{iy} k_{i\Delta}(\lambda) = -0.1051 \quad (\text{Eq 59})$$

où $\lambda = 11.03$ représente l'allongement (longueur/diamètre) de Taipan, $k_{iy} = k_{iz} = 0.0597$, et $k_{i\Delta}(\lambda) = 0.88$ [AUC81].

Modèle d'évolution de Taipan dans le plan vertical

Pour obtenir le modèle de plongée, il faut passer des équations sans dimension décrivant l'évolution du véhicule dans le plan vertical aux équations avec dimension correspondantes. Les équations sans dimension sont :

$$\begin{aligned}
 (2k_{\Delta} - C_{Zw})\dot{w} &= C_{Zw}w + (C_{Zq} + 2k_{\Delta})q + C_{Z\beta}\beta \\
 (2k_{iy} - C_{Mq})\dot{q} &= C_{Mw}w + C_{Mq}q + C_{M\beta}\beta - 2k_{\Delta}\gamma\theta \\
 \dot{\theta} &= q \\
 \dot{z} &= \dot{w} - V_s\theta
 \end{aligned} \tag{Eq 60}$$

Le modèle de plongée linéarisé valable lorsque seules les gouvernes de plongée arrière sont actionnées (les gouvernes avant restant à zéro) s'écrit donc :

$$\begin{aligned}
 \dot{W} &= \frac{C_{Zw}}{(2k_{\Delta} - C_{Zw})L} V_s W + \frac{(C_{Zq} + 2k_{\Delta})}{(2k_{\Delta} - C_{Zw})} V_s Q + \frac{C_{Z\beta}}{(2k_{\Delta} - C_{Zw})L} V_s^2 \beta \\
 \dot{Q} &= \frac{C_{Mw}}{(2k_{iy} - C_{Mq})L^2} V_s W + \frac{C_{Mq}}{(2k_{iy} - C_{Mq})L} V_s Q + \frac{C_{M\beta}}{(2k_{iy} - C_{Mq})L^2} V_s^2 \beta - \frac{2k_{\Delta}\gamma\theta V_s^2}{(2k_{iy} - C_{Mq})L^2} \\
 \dot{\theta} &= Q \\
 \dot{Z} &= \dot{W} - V_s\theta
 \end{aligned} \tag{Eq 61}$$

On voit donc que le modèle dépend de la vitesse de déplacement de l'engin et doit donc être recalculé à chaque changement de vitesse.

Modèle d'évolution de Taipan dans le plan horizontal

Les équations sans dimension décrivant l'évolution de Taipan dans le plan horizontal sont :

$$\begin{aligned}
(2k_{\Delta} - C_{Y\dot{v}})\dot{\psi} &= C_{Yv}v + (C_{Yr} - 2k_{\Delta})r + C_{Y\alpha}\alpha \\
(2k_{iz} - C_{Nr})\dot{r} &= C_{Nv}v + C_{Nr}r + C_{N\alpha}\alpha \\
\dot{\psi} &= r
\end{aligned}
\tag{Eq 62}$$

Les équations avec dimension correspondantes sont donc :

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= \frac{C_{Yv}}{(2k_{\Delta} - C_{Y\dot{v}})L} V_s V + \frac{(C_{Yr} - 2k_{\Delta})}{(2k_{\Delta} - C_{Y\dot{v}})} V_s R + \frac{C_{Y\alpha}}{(2k_{\Delta} - C_{Y\dot{v}})L} V_s^2 \alpha \\
\dot{R} &= \frac{C_{Nv}}{(2k_{iz} - C_{Nr})L^2} V_s V + \frac{C_{Nr}}{(2k_{iz} - C_{Nr})L} V_s R + \frac{C_{N\alpha}}{(2k_{iz} - C_{Nr})L^2} V_s^2 \alpha \\
\dot{\psi} &= R
\end{aligned}
\tag{Eq 63}$$

Ici aussi, le modèle dépend de la vitesse d'évolution de l'engin.

Que ce soit pour l'immersion ou le cap, nous disposons donc maintenant de modèles dont les valeurs numériques sont connues et qui peuvent donc servir de base à la conception des lois de commandes à structure variable.

Détermination des lois de commandes

Loi de commande en immersion

Voir page 47 de ce manuscrit.

Loi de commande en cap

La loi de commande en cap s'applique à l'angle α . On choisit la surface de glissement suivante :

$$\sigma = s_1 v + s_2 r + s_3 (\psi - \psi_d)
\tag{Eq 64}$$

Pour une vitesse V_s donnée, le modèle d'évolution dans le plan horizontal peut être écrit sous la forme :

$$\begin{bmatrix} \dot{V} \\ \dot{R} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ R \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \end{bmatrix} \alpha \quad (\text{Eq 65})$$

En notant $K = [k_1 \ k_2 \ 0]$ le gain du retour d'état, la matrice A_c du système bouclé s'écrit:

$$A_c = \begin{bmatrix} a_{11} - b_1 k_1 & a_{12} - b_1 k_2 & 0 \\ a_{21} - b_2 k_1 & a_{22} - b_2 k_2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 66})$$

En développant $\det(\lambda I - A_c) = 0$, on aboutit à un système de 2 équations (on a une valeur propre nulle) qui permettent de calculer k_1 et k_2 pour λ_1 et λ_2 données et $\lambda_3 = 0$:

$$\begin{bmatrix} b_1(\lambda_1 - a_{22}) + a_{12}b_2 & b_2(\lambda_1 - a_{11}) + a_{21}b_1 \\ b_1(\lambda_2 - a_{22}) + a_{12}b_2 & b_2(\lambda_2 - a_{11}) + a_{21}b_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\lambda_1^2 + (a_{22} + a_{11})\lambda_1 - a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21} \\ -\lambda_2^2 + (a_{22} + a_{11})\lambda_2 - a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 67})$$

Une fois K déterminé, la matrice A_c est connue. On obtient les paramètres s de la surface de glissement en résolvant $A_c^t s = 0$, soit :

$$\begin{bmatrix} a_{11} - b_1 k_1 & a_{21} - b_2 k_1 & 0 \\ a_{12} - b_1 k_2 & a_{22} - b_2 k_2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{Eq 68})$$

Pour cela, on pose $s_1 = 1$, ce qui donne :

$$\begin{aligned} s_2 &= \frac{b_1 k_1 - a_{11}}{a_{21} - b_2 k_1} \\ s_3 &= b_1 k_2 - a_{12} - (a_{22} - b_2 k_2) s_2 \end{aligned} \quad (\text{Eq 69})$$

On normalise ensuite les s_i ($i=1$ à 3):

$$s_i = \frac{s_i}{\sqrt{s_1^2 + s_2^2 + s_3^2}} \quad i = 1 \text{ à } 3 \quad (\text{Eq 70})$$

La loi de commande finale est donc :

$$\mathbf{a} = k_1 \mathbf{v} + k_2 \mathbf{r} + \mathbf{h} \tanh[(s_1 \mathbf{v} + s_2 \mathbf{r} + s_3 (\mathbf{y} - \mathbf{y}_d)) / \mathbf{f}] \quad (\text{Eq 71})$$

En pratique, v n'est pas mesurable. On considérera donc v comme nul, ce qui revient à supprimer les termes $k_1 v$ et $s_1 v$ de la loi de commande. Ceci est possible sur le véhicule autonome sous-marin Taipan car dans le cas particulier de ce véhicule, la suppression de ces deux termes n'entraîne pas d'instabilité (les pôles restent à partie réelle négative). Dans le cas de la commande d'un autre véhicule, il conviendra de vérifier que cette dernière condition est vérifiée avant de procéder à ce type de simplification.

Validation expérimentale avec Taipan

La Figure 71 représente le résultat d'une expérimentation du comportement en cap de Taipan. Les oscillations résiduelles, une fois la consigne atteinte, sont de l'ordre de 1° .

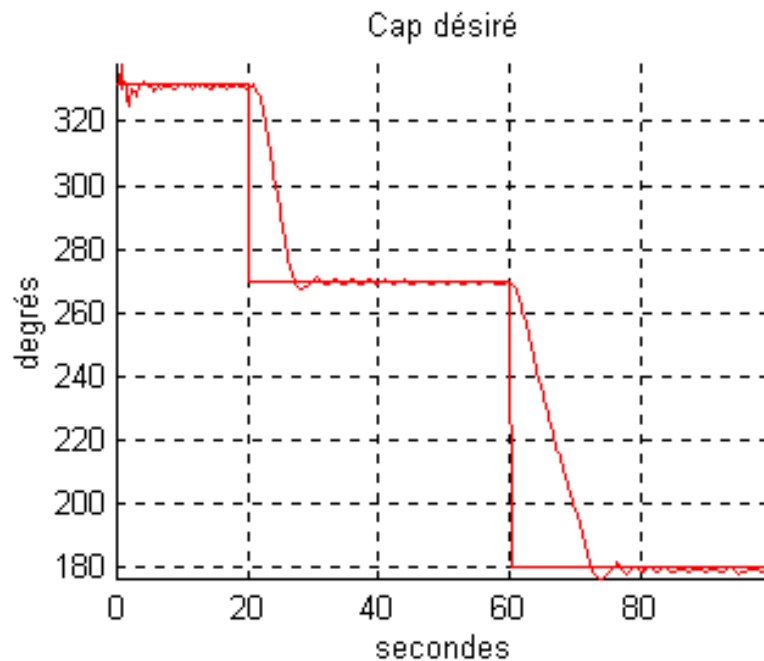


Figure 71 - Essai de la commande en cap

Annexe 2 : Traitement des données bathymétriques

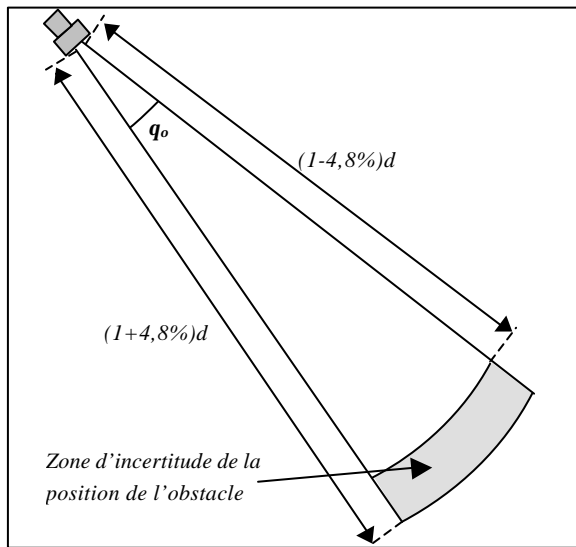


Figure 72 - Erreur de localisation de l'obstacle

Nous avons vu dans le paragraphe III.4.5.a (page 68) que la position du point d'impact du faisceau acoustique ne peut être connue précisément et se trouve dans la zone délimitée par deux arcs de cercle d'angle q_0 et dont les rayons sont respectivement $(1-4,8\%)d$ et $(1+4,8\%)d$, où d est la distance mesurée par le sondeur.

Il est cependant possible d'améliorer la précision du positionnement angulaire du point d'impact en observant plusieurs échantillons consécutifs. La méthode est basée sur les constatations suivantes :

Soit un faisceau d'ouverture q_0 , soit d l'angle d'inclinaison du faisceau avec l'horizontale et soit g la pente locale du fond marin par rapport à l'horizontal, les orientations des angles étant celles de la Figure 73. Soit l'angle z défini par :

$$z = d + \frac{q_0}{2} + g \quad (\text{Eq 72})$$

alors :

- ✓ si $z < 0$ alors il n'y a pas d'impact car ce cas correspond à une zone d'ombre
- ✓ si $0 < z < 90^\circ$, alors l'impact se trouve nécessairement sur le bord inférieur du faisceau acoustique.
- ✓ si $90 < z < 90 + q_0$, alors la position de l'impact est incertaine. En théorie, elle devrait se trouver, au sein du faisceau, sur le rayon acoustique perpendiculaire au fond marin. Cependant, étant donné le faible angle d'ouverture du faisceau, les différences

de marche entre ses rayons ne sont pas significatives, comparées aux inévitables irrégularités du fond.

✓ si $z > 90^\circ + q_0$, alors l'impact se trouve nécessairement sur le bord supérieur du faisceau acoustique.

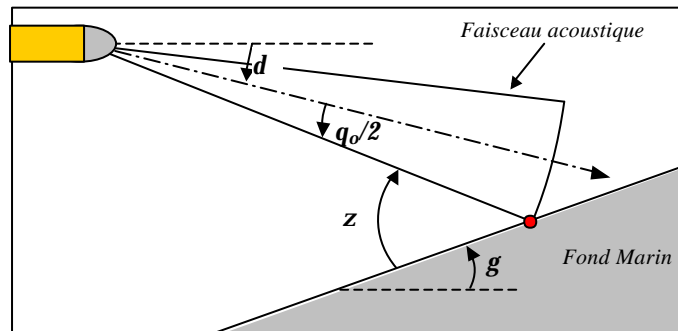


Figure 73 - Choix des angles

Lors des acquisitions bathymétriques de Taipan, on peut ainsi améliorer le positionnement des points d'impact. Pour cela, on calcule la pente locale du fond grâce à plusieurs échantillons consécutifs (supposés dans un premier temps localisés dans l'axe du faisceau). A partir du résultat obtenu et en exploitant les propriétés qui viennent d'être énoncées, on peut déterminer et corriger la position de l'impact au sein du faisceau acoustique.