

# Perception et suivi de fond pour véhicules autonomes sous-marins

---

## Seabed perception and following for autonomous underwater vehicles

par Vincent CREUZE, Bruno JOUVENCEL

Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier (LIRMM, Université Montpellier II)  
creuze@lirmm.fr, jouvencel@lirmm.fr

### *résumé et mots clés*

Cet article expose une méthode de suivi de fond pour véhicule sous-marin naviguant en environnement *a priori* inconnu. Elle repose sur l'adaptation de la trajectoire planifiée aux contraintes de manœuvrabilité du véhicule étudié. Un algorithme basé sur des fonctions géométriques simples et sur les courbes d'interpolation telles que les « splines cubiques semi-forcées » ou les polynômes de Hermite permet de créer un trajet adapté au véhicule. Les données bathymétriques utilisées lors de ce processus proviennent de deux sondeurs placés à l'avant du véhicule. Des simulations hydrodynamiques ont été réalisées pour valider cette méthode. La validation expérimentale en milieu naturel est également présentée.

Véhicule autonome sous-marin (A.U.V.), planification de trajectoire, suivi de fond.

### *abstract and key words*

This paper outlines a method of seabed following designed for underwater vehicles navigating in a *a priori* unknown environment. This method aims to fit with the path defined by the seabed shape but it also respects the manoeuvring constraints of the said vehicle. The construction of such trajectories is achieved by using geometrical functions and interpolating polynomials such as "semi-forced cubic splines" or "Hermite polynomials". Environment modelling is carried out thanks to the bathymetric acquisitions of two embedded sounders situated in the front part of the vehicle.

Finally, we present the results obtained by hydrodynamic simulation and those obtained during experimentation in the open sea.

Autonomous Underwater Vehicle (A.U.V.), path planning, seabed following.

## 1. introduction

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. On les appelle les *A.U.V.* (*Autonomous Underwater Vehicles*). Cette catégorie d'engins est confrontée à 4 grandes classes de problèmes scientifiques, à savoir : l'autonomie énergétique, la navigation couplée au problème du 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. Les deux autres thèmes font l'objet de nombreuses recherches et c'est dans ce cadre que s'inscrivent les travaux présentés dans cet article. 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. L'objectif de la méthode présentée ici est de faire suivre au véhicule sous-marin le profil du fond marin en demeurant à distance constante de ce dernier. Dans le cas de véhicules sous-actionnés non holonomes tels que les véhicules munis d'un propulseur unique, les capacités de suivi de fond se trouvent limitées et il est nécessaire lors de la génération de trajectoires de tenir compte des contraintes de manœuvrabilité inhérentes à la configuration matérielle du véhicule.

Dans cet article, nous présentons une méthode « en ligne » de planification de trajectoires, permettant à un véhicule autonome sous-marin sous actionné de suivre le fond. La trajectoire sera déterminée à partir des données bathymétriques relevées au cours des déplacements du véhicule, ainsi que des principales contraintes physiques d'un véhicule de type « torpille civile ». Nos travaux s'inscrivent dans la problématique de recherche démarrée il y a 6 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 grands fonds avec 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 20m) [27]. 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. La méthode présentée ici tient compte des caractéristiques du robot autonome sous-marin *Taipan* développé au *LIRMM* (figure 1).



Figure 1. – Le véhicule autonome sous-marin « *Taipan* ».

Cet article comporte quatre parties. Un premier paragraphe présente le type de véhicule utilisé, son système acoustique de perception du fond marin, ainsi que les contraintes de manœuvrabilité retenues pour générer les trajectoires. Ensuite, nous détaillons la méthode utilisée pour générer les trajectoires de suivi de fond, puis présentons les résultats obtenus lors des simulations. Enfin, le dernier paragraphe est consacré à la mise en œuvre des capteurs électroacoustiques à bord de *Taipan* et aux résultats obtenus lors des expérimentations.

## 2. véhicule sous-marin et génération de trajectoire

### 2.1. véhicule

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. 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 (figure 2). Le véhicule possède à l'ar-

rière 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.

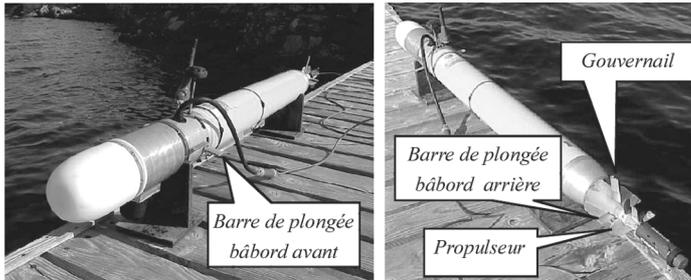


Figure 2. – Disposition des actionneurs de Taipan.

## 2.2. espace de travail

La symétrie d'un sous-marin par rapport à son plan vertical implique que les évolutions dans le plan vertical ne peuvent 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 [2][12]. Pour ces raisons et par souci de simplicité, notre étude se limite pour l'instant à des déplacements dans le plan vertical du sous-marin. 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  $z$  (figure 3). Dans notre étude, nous travaillons donc uniquement dans le plan  $xOz$ .

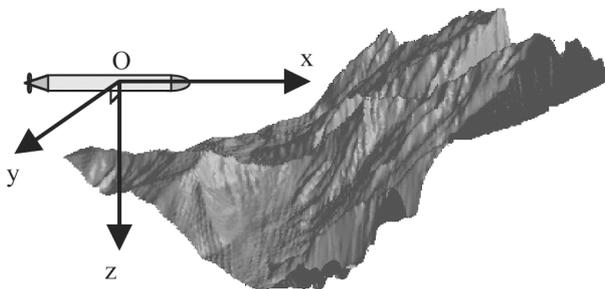


Figure 3. – Repère associé au véhicule.

## 2.3. dispositif de perception

Pour pouvoir suivre le fond, le véhicule doit déterminer, devant lui, le profil bathymétrique (c'est-à-dire relatif à la mesure des profondeurs) dans le plan vertical où il se déplace. Les ondes électromagnétiques ne se propageant pas sous la mer, il est nécessaire d'utiliser la télédétection acoustique. Si la capacité d'emport et la capacité énergétique du véhicule le permettaient, l'acquisition du profil bathymétrique pourrait se faire par des dispositifs tels que le sonar frontal à balayage [21][22]. Cependant, afin de minimiser la taille et la consommation énergétique du système de suivi de fond, on utilise des capteurs élémentaires de distance. Il s'agit de deux transducteurs électroacoustiques unidirectionnels placés à l'intérieur du « nez » du véhicule et orientés comme l'indique la figure 4.

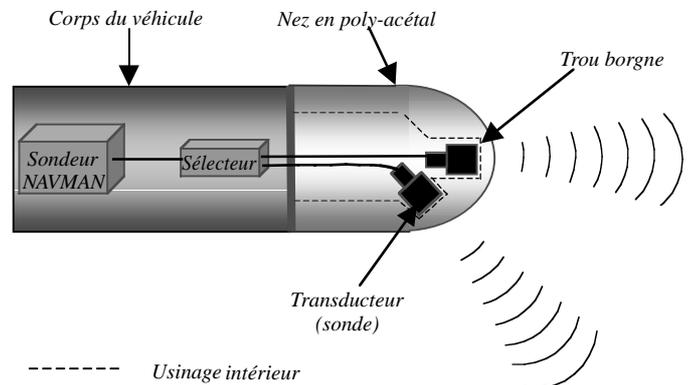


Figure 4. – Orientation des sondeurs.

Les deux transducteurs (ou sondes) sont reliés, *via* un multiplexeur (sélecteur), à un ordinateur (Navman 100) qui permet d'obtenir les mesures ponctuelles de distance utilisées pour créer un profil bathymétrique échantillonné. Pour déterminer les coordonnées des points de mesure du fond marin, on exploite les inclinomètres (angles de roulis et de tangage) et le compas magnétique (angle de lacet) embarqués à bord du véhicule. Les déplacements et la position de ce dernier sont calculés en intégrant le vecteur vitesse du véhicule, calculé à partir de l'attitude du véhicule et de sa vitesse linéaire obtenue par étalonnage préalable en fonction de la vitesse de rotation du propulseur. Dans le cas de *Taipan*, la précision des capteurs d'attitude est inférieure à  $1^\circ$ , 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. La portée du dispositif acoustique de mesure est égale à 50 mètres. 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  $1520 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  l'été et de  $1480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  l'hiver [13]. 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  $\theta_0 = 2 \sin^{-1} \left( \frac{0,61\lambda}{r_c} \right)$  et dont les rayons sont respectivement  $(1 - 4,8\%)d$  et  $(1 + 4,8\%)d$ , (où  $d$  est la distance mesurée par le sondeur,  $\lambda$  est la longueur d'onde du signal sonore émis et  $r_c$  est le rayon du cylindre d'émission du transducteur) (figure 5) [15]. Dans le cas des transducteurs utilisés sur *Taipan*, on a  $\theta_0 = 22^\circ$ .

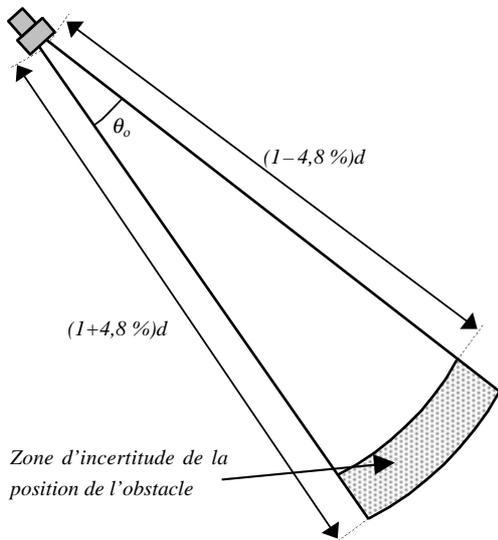


Figure 5. – Erreur de localisation de l'obstacle.

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 =  $22^\circ$ ). Une telle incertitude n'étant évidemment pas acceptable pour l'accomplissement du suivi de fond, 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 de [7]. Il permet d'atteindre une précision de localisation de l'ordre de 50 cm pour un obstacle situé à 10 mètres du véhicule.

Des expérimentations de ce dispositif bathymétrique ont été menées dans une zone préalablement cartographiée (relevé des

profondeurs couplé à un positionnement GPS). Les résultats obtenus sont reproduits sur la figure ci-dessous (figure 6). Les croix représentent les données acquises par le transducteur incliné vers le bas et les carrés représentent celles acquises par le transducteur horizontal. Les données nulles correspondent aux émissions acoustiques restées sans écho significatif. La comparaison des acquisitions avec les données de la carte pré-établie (courbe continue représentant le fond réel) vérifie la précision théorique annoncée précédemment et prouve le bon fonctionnement du dispositif.

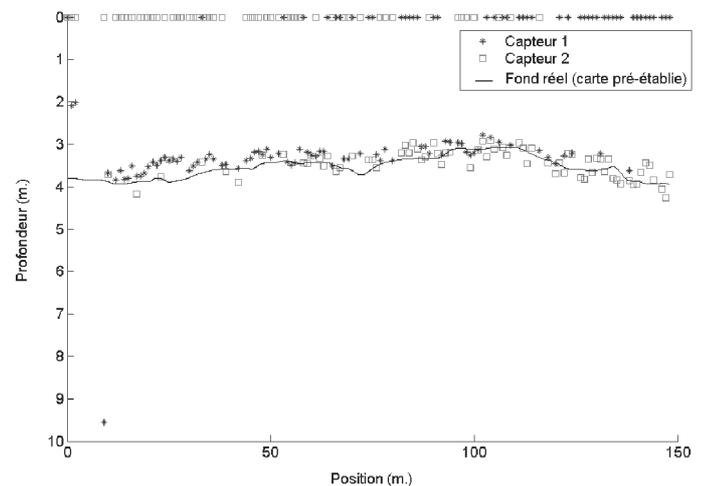


Figure 6. – Test du dispositif d'acquisition bathymétrique.

## 2.4. modèle dynamique

Les véhicules sous-marins sont des systèmes non-linéaires. Leur dynamique peut être modélisée par l'équation [2][12].

$$M_\eta(\eta)\ddot{\eta} + C_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + D_\eta(\nu, \eta)\dot{\eta} + g_\eta(\eta) = \tau_\eta$$

où  $\eta = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$  est le vecteur d'état, représentant la position et l'orientation du véhicule dans le repère terrestre fixe,  $\nu = [u, v, w, p, q, r]^T$  est le vecteur qui rassemble les vitesses linéaires et angulaires dans le repère lié au véhicule et  $\tau_\eta$  est le vecteur des forces et des moments appliqués au véhicule.

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 [3]. 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 elles ne sont pas modélisables. 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.

## 2.5. génération de trajectoires de suivi de fond

La recherche sur la génération de trajectoires a, jusqu'au début des années 80, concerné essentiellement les robots manipulateurs (bras articulés) [14]. 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 [4] 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 [17] établit un état de l'art très complet, présentant les concepts mathématiques nécessaires à la génération de trajectoires en fonction du modèle du véhicule.

La difficulté de planification de trajectoires pour les robots terrestres sujets à des contraintes cinématiques (tels que les véhicules à roues) s'explique 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 [16].

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 [4] :

$$\begin{cases} \dot{x} = \nu \cos \delta \cos \theta \\ \dot{y} = \nu \cos \delta \sin \theta \\ \dot{\theta} = \nu \sin \delta \end{cases}$$

où  $x$  et  $y$  sont les coordonnées du centre de l'essieu arrière du véhicule (supposé non orientable),  $\theta$  est l'angle que fait l'axe du véhicule avec l'axe des abscisses et  $\delta$  est l'angle d'orientation des roues avant par rapport à l'axe du véhicule.

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 [20][24]. Des contraintes spécifiques liées à l'application ont conduit à développer d'autres types de commandes dérivées de cette première.

Dans le domaine agricole, par exemple, 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 [5][6]. P. Martinet et C. Debain [18] 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 [24] [11]. 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 [19]. 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. Dans le cas du suivi de fond, on pourrait définir une fonction de tâche consistant à suivre une trajectoire planifiée en fonction des caractéristiques du véhicule et définir la loi de commande associée. La façon la plus simple de procéder consiste à générer une trajectoire admissible et à considérer que cette trajectoire est effectivement admissible sachant que, compte tenu des imperfections, le suivi se fera au voisinage de cette trajectoire. Cette méthode est applicable aux véhicules autonomes sous-marins et est proche de celle que nous allons présenter. Une méthode plus aboutie est la génération conjointe d'une trajectoire admissible et de la loi de commande associée permettant à un véhicule non-holonome de rejoindre cette trajectoire sous une forme admissible. Dans le cas d'un véhicule autonome sous-marin, le modèle cinématique n'étant pas accessible, il n'est pas possible d'appliquer directement cette dernière méthode.

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 [10]. 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. Reeds et Shepp ont développé une méthode similaire à celle de Dubins, mais en ajoutant la possibilité pour le véhicule de rebrousser chemin [23]. Dès lors on obtient des trajectoires de type « créneaux ». Ces chemins, qui concernent essentiellement les déplacements de type « manœuvre », sont constitués d'au plus cinq éléments (arcs de cercle ou segments de droite). Les méthodes de construction de courbes de Dubins ou de Reeds 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 dérivée de la courbure est constante et non nulle en tout point).

Nous avons vu précédemment 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) [17] et bien qu'ils ne soient pas pourvus de modèle cinématique. La génération de trajectoires pour cette deuxième catégorie d'engins est donc différente. En s'inspirant des travaux de Dubins et en les adaptant, nous avons mis au point une méthode de suivi de fond qui tient compte des contraintes de manœuvrabilité du véhicule.

### 2.6. contraintes retenues

Pour pouvoir accomplir la génération de trajectoires de suivi de fond, 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 :

– *Rayon de giration* : 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  $\rho_{\min}$ . Si on connaît le modèle dynamique du véhicule, on peut calculer  $\rho_{\min}$  à partir des coefficients hydrodynamiques de ce modèle et de la vitesse de déplacement du véhicule [2][12]. Dans le cas contraire, on peut mesurer  $\rho_{\min}$  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 [12][3]. Dans le cas de *Taipan*,  $\rho_{\min}$  a été mesuré et est égal à 10 mètres.

– *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, lui, 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 ( $Oy$ ) et font ainsi augmenter ou diminuer l'angle d'assiette. 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 [2]. A une vitesse donnée, lorsque l'angle d'assiette atteint la valeur  $\theta_{\max}$ , ces deux couples s'équilibrent et l'attitude du véhicule se fige (figure 7). Il existe donc, pour une vitesse donnée, un angle d'assiette maximal  $\theta_{\max}$ , qui dépend de l'angle maximal d'inclinaison des barres de plongée, du poids du véhicule ainsi que de la distance

métacentrique. Pour *Taipan*, nous avons retenu la valeur  $\theta_{\max} = 30^\circ$ . Même si cela ne change rien à la méthode décrite ensuite, précisons que dans le cas particulier de notre véhicule, cet angle ne correspond pas à l'angle (plus grand) d'équilibre des couples hydrostatique et hydrodynamique, mais à la limite imposée par le type d'inclinomètre embarqué.

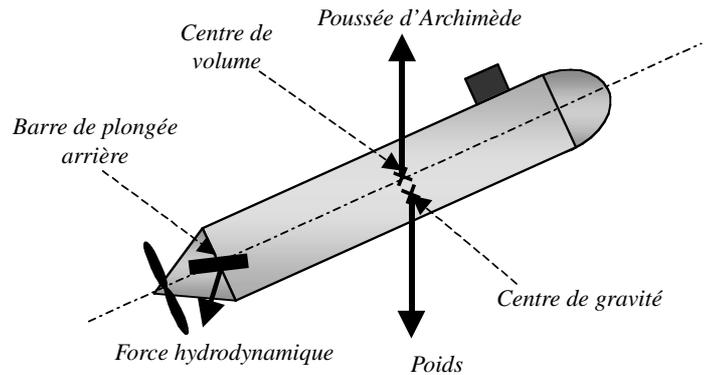


Figure 7. – Une partie des forces exercées sur le véhicule.

Ces contraintes se traduisent directement en contraintes géométriques lors de la planification de trajectoire. Si l'on note  $z = f(x)$  la trajectoire planifiée, cette dernière devra vérifier en tout point les deux inéquations ci-dessous. La première relation exprime la limitation de l'angle d'assiette.

$$-\tan(\theta_{\max}) \leq \frac{\partial f(x)}{\partial x} \leq \tan(\theta_{\max})$$

La deuxième inéquation correspond à la limitation du rayon de courbure.

$$\left| \frac{(1 + (f'(x))^2)^{\frac{3}{2}}}{f''(x)} \right| \geq \rho_{\min}$$

Remarquons enfin qu'il existe des cas où l'angle d'assiette n'est pas limité et où le sous-marin pourrait, si son équipement interne le permettait, décrire un cercle complet dans le plan vertical. En effet, lorsque la vitesse du véhicule est suffisamment grande, les forces hydrodynamiques augmentent et deviennent prépondérantes face aux forces de rappel hydrostatique. De la même manière, lorsque la distance métacentrique est suffisamment faible le couple de rappel hydrostatique devient négligeable. Ces cas simplifient le problème de suivi de fond car ils correspondent à une plus grande manœuvrabilité du véhicule. Cependant, ils sont rares car ils présentent de nombreux inconvénients pour la stabilité et le pilotage des sous-marins [2]. Ils ne seront pas traités ici.

### 3. algorithme de génération de trajectoires

#### 3.1. forme globale

Nous avons vu, dans ce qui précède, que le véhicule étudié dispose d'un profil bathymétrique échantillonné et que les trajectoires planifiées de suivi de fond doivent vérifier deux contraintes géométriques. La plupart du temps, le profil de fond vérifiera ces contraintes et la trajectoire planifiée ne consistera qu'en une interpolation, décalée vers le haut, des échantillons bathymétriques. Parfois, cependant, le strict suivi du profil de fond ne sera pas possible au regard des contraintes physiques retenues. On devra alors déterminer une trajectoire compatible dont l'allure sera la plus proche du profil de fond. Le respect des contraintes géométriques énoncées précédemment suggère de construire la trajectoire en assemblant des fragments de droites de pente comprise entre  $-\theta_{max}$  et  $+\theta_{max}$  et des arcs de cercle de rayon  $\rho_{min}$  (figure 8).

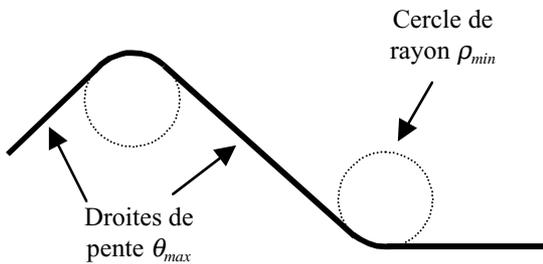


Figure 8. – Forme générale d'une trajectoire.

Pour construire ces trajectoires planifiées satisfaisantes, nous faisons subir aux données bathymétriques brutes trois traitements successifs : le franchissement des sommets, le traitement des creux, puis une interpolation polynomiale.

#### 3.2. franchissement des sommets

Lorsque le profil bathymétrique autour d'un sommet viole les contraintes de manœuvrabilité 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. On fait passer par le sommet à franchir un arc de cercle, de rayon égal au rayon de courbure minimal autorisé,  $\rho_{min}$ . Lorsque les pentes des tangentes situées de part et d'autre de l'arc de cercle atteignent les valeurs  $-\theta_{max}$  et  $+\theta_{max}$ , on prolonge l'arc de cercle par des droites. Ces deux droites ont pour pente respectivement  $-\theta_{max}$  et  $+\theta_{max}$  (figure 9).

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 10). On définit ainsi un nouveau profil à suivre dont le franchissement des sommets est possible. Il faut appliquer ce traitement à tous les sommets connus 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.

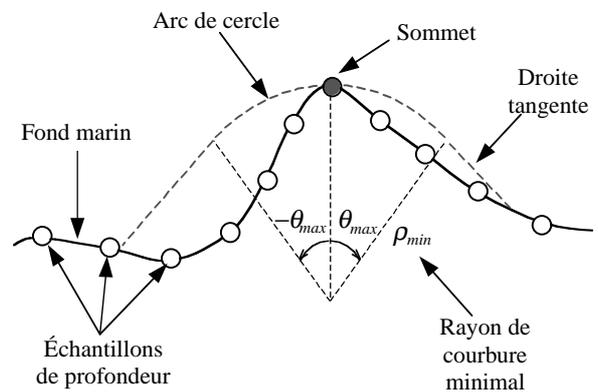


Figure 9. – Première étape du traitement d'un sommet.

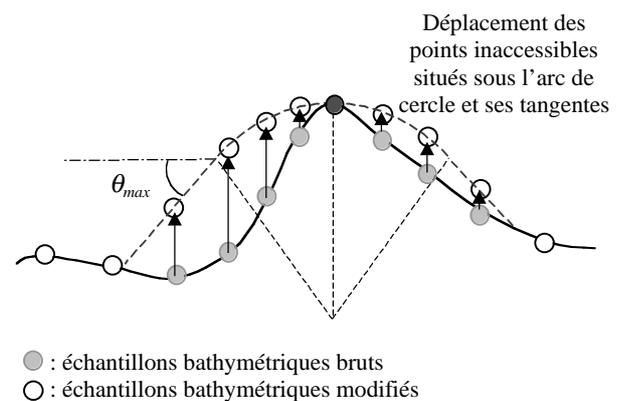


Figure 10. – Deuxième étape du traitement d'un sommet.

Ce traitement effectué, on constate que 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 nécessaire d'appliquer un dernier traitement correctif aux échantillons bathymétriques.

### 3.3. traitement du rayon de courbure dans les creux

Dans chaque creux de la courbe, on ajuste un cercle de rayon égal à  $\rho_{min}$ , 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 11).

La mise en œuvre de l'algorithme de traitement des creux peut poser des problèmes liés à la nature échantillonnée du profil bathymétrique. L'ajustement précis du cercle n'est pas toujours possible. Lorsque cela se produit, il suffit de sur-échantillonner artificiellement et localement le profil bathymétrique.

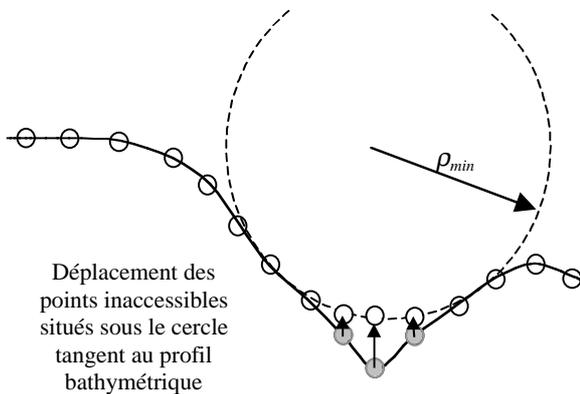


Figure 11. – Traitement d'un creux.

### 3.4. interpolation du profil bathymétrique

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

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  $C^2$ . Nous avons choisi les splines cubiques. 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 positions 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) et à l'ordre 2 (continuité de la dérivée seconde). La vérification de ces trois conditions se traduit

mathématiquement par la résolution du système ci-dessous [1], qui permet d'accéder aux coefficients de la spline cubique  $f(x)$ .

$$\begin{cases} f_i(x_{k(i)}) = z_{k(i)} \\ f'_i(x_{k(i)}) = f'_{i+1}(x_{k(i+1)}) \\ f''_i(x_{k(i)}) = f''_{i+1}(x_{k(i+1)}) \end{cases}$$

où  $x_i$  est l'abscisse d'un échantillon et  $z_i$  la profondeur correspondante.

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'équations sous-déterminé. Nous avons imposé à la dérivée de la courbe une valeur initiale égale à l'angle d'assiette 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 ». [1].

Cependant, ces splines présentent l'inconvénient d'engendrer des dépassements de profondeur. 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 dangereux 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. Les polynômes de Hermite, noté  $P_i(x)$  sont obtenus simplement par itération en utilisant l'équation ci-dessous :

$$P_i(x) = (1 \ x \ x^2 \ x^3) \mathbf{H} \begin{pmatrix} z_{i-1} \\ z_i \\ P'(x_{i-1}) \\ P'(x_i) \end{pmatrix}$$

où la matrice de Hermite  $\mathbf{H}$  vaut :

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -3 & 3 & -2 & 1 \\ 2 & -2 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Une fois l'interpolation accomplie, il ne reste qu'à translater la trajectoire obtenue vers le haut afin d'obtenir la distance désirée entre le véhicule et le fond.

### 3.5. itération du processus et zone d'ombre

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 12). Les zones d'ombre débutent lorsque la droite tangente au profil de fond croise l'émetteur d'ondes acoustiques. 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.

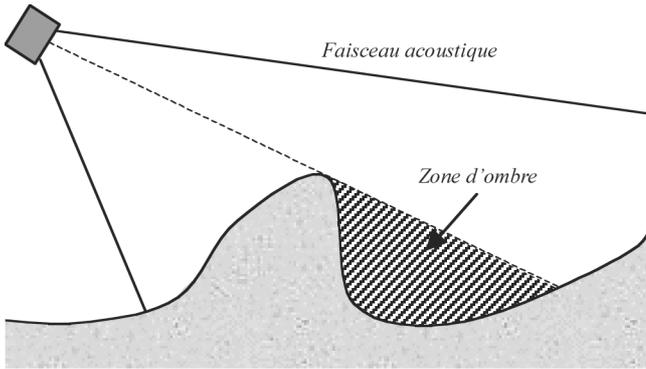


Figure 12. – Zone d'ombre.

En l'absence de zone d'ombre, on applique la méthode de construction de trajectoires 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 profondeurs).
- 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.

L'horizon de perception est donc à dimension variable puisqu'il est conditionné dans un cas par la survenue des zones d'ombre acoustiques et dans l'autre cas par la portée du système de perception lui-même. Afin de garantir la sécurité du véhicule il paraît évident qu'il est nécessaire de considérer la totalité des échantillons bathymétriques pour calculer la trajectoire, c'est-à-dire ne pas limiter l'horizon de perception. Cependant, nous avons vu précédemment que la précision du dispositif de mesure diminuait avec la distance. Ainsi, s'il est nécessaire de consi-

dérer les acquisitions bathymétriques sans limite de distance pour générer la trajectoire, il est recommandé de limiter la distance parcourue sur la trajectoire entre chaque instant où l'on réitère le calcul. Pour déterminer cette distance maximale parcourue, on utilisera les informations du paragraphe 2.3 en les adaptant à la précision recherchée pour le suivi de fond.

### 3.6. commande

La trajectoire planifiée ainsi obtenue est utilisée pour piloter le véhicule sous-marin. On utilise une commande en mode glissant [25]. Ce type de commande entraîne une forte consommation d'énergie, mais est très couramment utilisé pour le pilotage des véhicules sous-marins [12]. La commande en mode glissant permet de compenser les inévitables méconnaissances du modèle dynamique du véhicule ainsi que les nombreuses perturbations extérieures (houle, courants...). Le modèle linéarisé décrivant le mouvement en immersion d'un sous-marin peuvent être mis sous la forme générale :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (1)$$

On définit comme suit la surface de glissement  $\sigma(\mathbf{x})$  :

$$\sigma(\mathbf{x}) = \mathbf{s}^t \mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

La stabilité sur la surface de glissement est assurée si la condition de glissement [25] est vérifiée, ce qui, avec  $\eta > 0$ , peut s'écrire :

$$\dot{\sigma}(\mathbf{x}) = -\eta \operatorname{sgn}(\sigma(\mathbf{x})) \quad (3)$$

car :

$$\sigma(\mathbf{x})\dot{\sigma}(\mathbf{x}) = -\eta\sigma(\mathbf{x}) \operatorname{sgn}(\sigma(\mathbf{x})) = -\eta\sigma|\sigma| \quad (4)$$

En dérivant  $\sigma(\mathbf{x})$  (2), on fait apparaître  $\dot{\mathbf{x}}$  que l'on peut remplacer par  $\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$  d'après (1). En remplaçant  $\dot{\sigma}(\mathbf{x})$  dans l'équation de glissement (3), on obtient :

$$\mathbf{s}^t(\mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}) = -\eta \operatorname{sgn}(\sigma(\mathbf{x})) \quad (5)$$

De l'équation précédente, on peut extraire  $\mathbf{u}$  et on obtient la commande à appliquer :

$$\mathbf{u} = -(\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \mathbf{s}^t \mathbf{A} \mathbf{x} - (\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \eta \operatorname{sgn}(\sigma(\mathbf{x})) \quad (6)$$

Cette commande peut également s'écrire sous la forme :

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x} + \mathbf{K}_s \eta \operatorname{sgn}(\sigma(\mathbf{x})) \quad (7)$$

avec :

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= (\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \mathbf{s}^t \mathbf{A} \\ \mathbf{K}_s &= -(\mathbf{s}^t \mathbf{B})^{-1} \end{aligned} \quad (8)$$

On obtient une commande constituée d'un retour d'état linéaire et d'un terme de commutation non linéaire censé compenser les imperfections du modèle utilisé et les perturbations extérieures. Dans le cas de notre véhicule, la loi de commande finale est donc :

$$\beta = k_1 w + k_2 q + k_3 \theta + \eta \tanh \left[ (s_1 w + s_2 q + s_3 (\theta - \theta_d) + s_4 (z - z_d)) / \phi \right] \quad (9)$$

où  $\beta$  est l'angle à appliquer aux gouvernes de plongée,  $w$ ,  $q$ ,  $\theta$ ,  $z$  et  $\phi$  sont les grandeurs définies dans le paragraphe 2.4 consacré au modèle dynamique et où  $z_d$  et  $\theta_d$  sont respectivement la profondeur et le tangage désirés.

### 3.7. organigramme

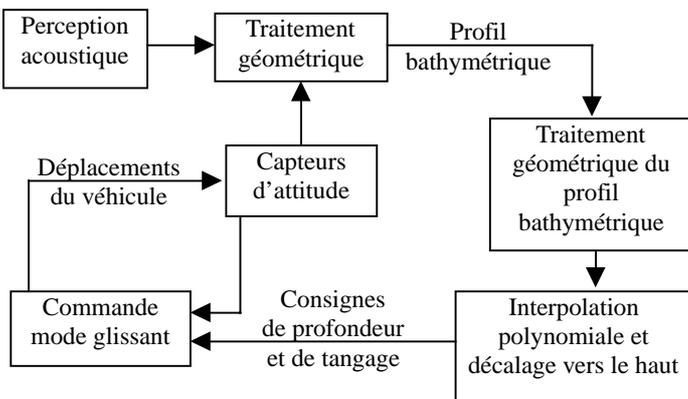


Figure 13. – Organigramme du système de suivi de fond.

## 4. simulations

### 4.1. description du simulateur

Le LIRMM dispose d'un simulateur hydrodynamique permettant de simuler le comportement dynamique d'un véhicule sous-marin en fonction de divers paramètres, tels que la commande appliquée, les paramètres environnementaux et les constantes hydrodynamiques du véhicule. Le simulateur exploite le modèle dynamique du véhicule sous-marin *Taipan*. Par intégration

numérique du modèle, le simulateur calcule les déplacements du véhicule en fonction de la commande appliquée. Les données-capteurs utilisées pour générer la commande sont obtenues en bruitant les variables d'état théoriques du véhicule (conformément aux caractéristiques des capteurs implantés dans le véhicule). Les acquisitions bathymétriques sont accomplies en tenant compte du modèle acoustique des transducteurs utilisés et des incertitudes liées au milieu. Des perturbations environnementales telles que le courant marin peuvent également être prises en compte par le simulateur pour calculer les déplacements du véhicule.

Ce simulateur fonctionne sur des ordinateurs de types PC et a été développé sous environnement Matlab. La validité de ce simulateur a été prouvée au cours des dernières années grâce à de nombreuses comparaisons avec des données réelles [26][27][28].

### 4.2. cadre de l'étude en simulation

L'étude de la méthode de suivi de fond a été menée à partir de données bathymétriques réelles (figure 14). Il s'agit d'un relevé de profondeurs effectué près des côtes françaises.

Les données perçues par les sondeurs ont été simulées en temps réel à partir des profondeurs référencées dans la carte et à partir de la position du robot sur cette dernière.

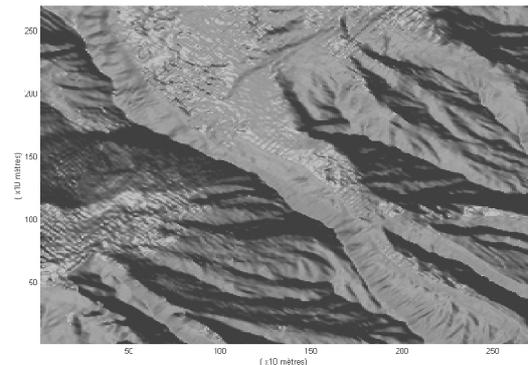


Figure 14. – Relevé bathymétrique.

### 4.3. incorporation de l'algorithme dans le simulateur hydrodynamique du véhicule *Taipan*

Plusieurs séries de simulations ont été menées afin de déterminer la fréquence de calcul de trajectoire permettant d'optimiser à la fois la trajectoire et le coût en temps de calcul. Les résultats obtenus 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 [9].

Sur la figure 15, on visualise le profil de fond enregistré par les capteurs, la trajectoire planifiée et la trajectoire suivie par le robot (ces deux dernières sont quasiment superposées). L'angle d'assiette reste compris entre  $-\theta_{\max}$  et  $+\theta_{\max}$  (figure 16).

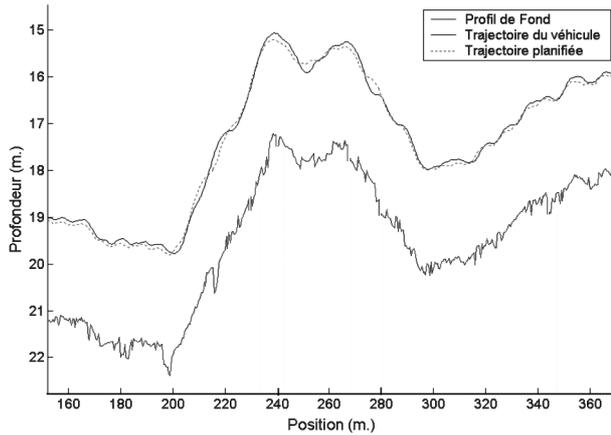


Figure 15. – Fond reconstitué (en bas) et trajectoire suivie (en haut).

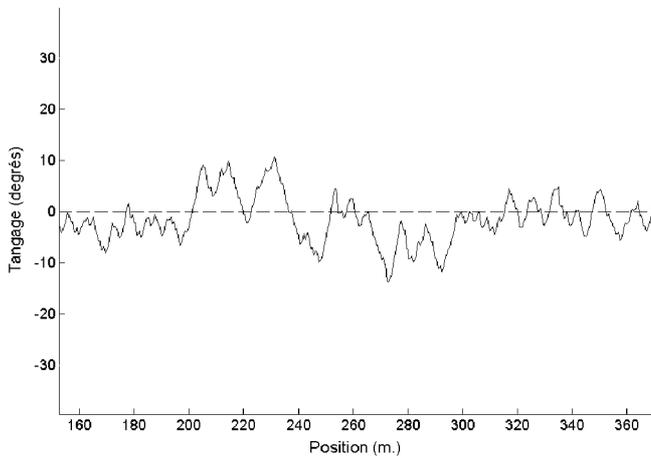


Figure 16. – Angle d'assiette le long de la trajectoire.

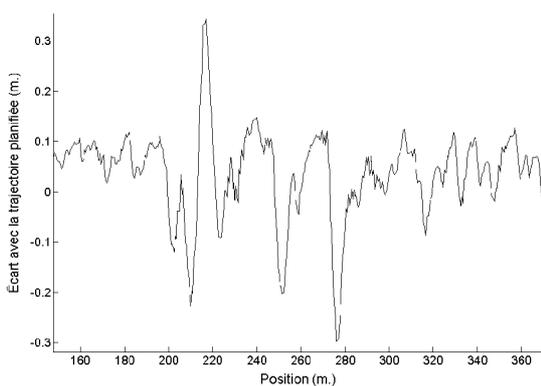


Figure 17. – Écart entre la trajectoire suivie et la trajectoire idéale.

Afin d'estimer la qualité du suivi de fond, on extrait de la carte utilisée le profil bathymétrique réellement survolé par l'AUV 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. On compare ce résultat à la trajectoire parcourue par le sous-marin lors des simulations. Les résultats (figure 17) des simulations montrent un écart maximum de 40 cm entre la trajectoire idéale et celle suivie par le robot. Cet écart ne semble pas imputable à la nature parcellaire de la génération de trajectoire au cours du déplacement de l'A.U.V., mais plutôt à la difficulté à commander les véhicules sous-marins.

## 5. validation expérimentale

### 5.1. caractéristiques de *Taipan*

C'est à bord du robot sous-marin *Taipan* que les expérimentations ont été 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 autonome sous-marin possède une autonomie de 20 km et peut descendre jusqu'à 150 mètres de profondeur [26][27]. Dans la partie avant de *Taipan* nous avons installé deux sondeurs. Les deux transducteurs électroacoustiques des sondeurs sont collés sur des surfaces planes usinées à l'intérieur du nez de *Taipan* (figure 18). Ils émettent et reçoivent des ondes acoustiques de fréquence égale à 200 kHz. L'électronique de commande qui leur est associée permet à l'informatique embarquée de déclencher les acquisitions avec le sondeur désiré.

### 5.2. résultats expérimentaux

Afin de contrôler la validité des mesures enregistrées par *Taipan*, nous avons établi préalablement un relevé bathymétrique précis de la zone d'opération (figure 19). 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*. 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. 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 (Hérault, France). 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.

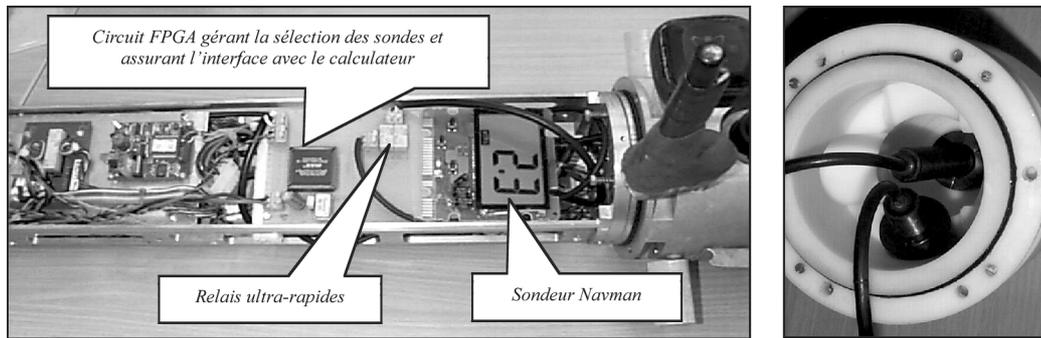


Figure 18. – Implantation du dispositif.

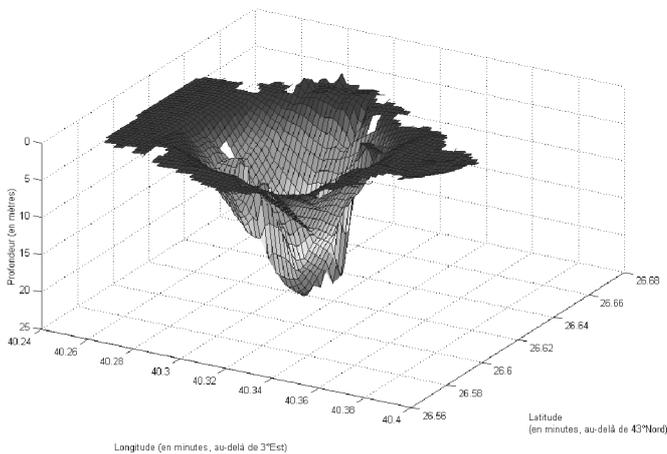


Figure 19. – Relevé bathymétrique de la source de La Vise.

Le véhicule *Taipan* navigue au-dessus de la source de La Vise et les informations de profondeur obtenues au cours du déplacement sont utilisées pour générer la commande du véhicule afin qu'il suive le fond. Deux essais de ce type ont été réalisés consécutivement dans une mer agitée (30 à 40 cm de creux). 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.

L'écart entre le profil bathymétrique relevé et les profondeurs de la carte des fonds est inférieur à 50 cm pour les zones de faible pente et peut dépasser 1 mètre pour la zone où la pente est grande et où le 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.

La comparaison de la trajectoire suivie par le véhicule avec la trajectoire idéale générée hors-ligne à partir de la carte des fonds révèle des écarts pouvant atteindre 90 cm. Cette valeur excède celle attendue théoriquement. Lors d'un essai en boucle ouverte dans les mêmes conditions, 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 censée 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 compte tenu des perturbations environnementales importantes le jour des expérimentations. 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.

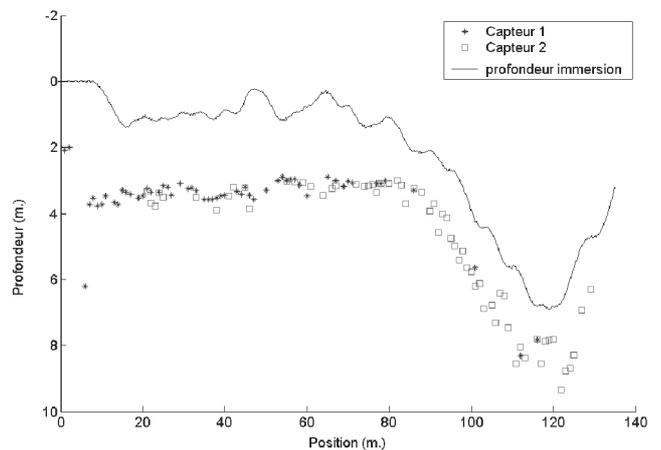


Figure 20. – Trajectoire du véhicule et données bathymétriques perçues.

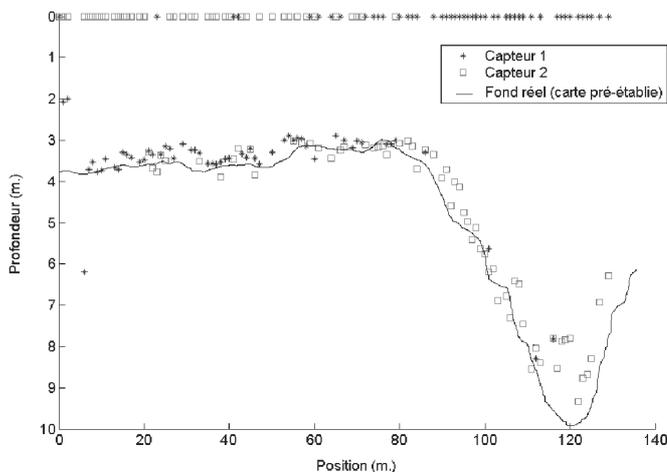


Figure 21. – Comparaison des acquisitions bathymétriques avec les profondeurs réelles.

## 6. conclusion

Cet article décrit une méthode de suivi de fond à distance constante pour un véhicule autonome sous-marin sous-actionné non holonome. Les trajectoires générées sont compatibles avec les contraintes de manœuvrabilité du véhicule. Les simulations présentées font apparaître une bonne capacité de suivi du véhicule par rapport à la trajectoire planifiée. Le fonctionnement de la tête instrumentée du véhicule *Taipan* et de l'algorithme de génération de trajectoires a été vérifié expérimentalement en milieu naturel. Des travaux récents ont été menés en complément de ceux décrits dans cet article. Ils portent sur la détection et l'évitement des falaises sous-marines. Ils reposent sur l'utilisation d'un troisième transducteur incliné vers le haut et sur le découpage de son faisceau acoustique en trois zones de perception distinctes [8]. Les recherches menées actuellement dans la continuité de ces travaux portent sur l'adjonction de transducteurs latéraux supplémentaires afin de pouvoir envisager des stratégies d'évitement latéral des obstacles et de pouvoir étendre l'algorithme de suivi de fond à l'espace à trois dimensions.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] 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.
- [2] M. Aucher, *Dynamique des Sous-Marins*, Sciences et Techniques de l'armement, 55, 4<sup>e</sup> fasc, Paris, 1981.
- [3] D. P. Brutzman, *A Virtual World for an Autonomous Underwater Vehicle*, dissertation, Naval Postgraduate school, Monterey California, 1994.
- [4] P. Coiffet, *La robotique*, Hermès science publications (traité des nouvelles technologies), ISBN 2866012976, 1992.
- [5] L. Cordesses, C. Cariou, P. Martinet et C. Thibaud, "CP-DGPS based combine harvester control without orientation sensor", Proceedings of the ION-GPS Meeting, ION-GPS'99, pp 2041-2046, Nashville, Tennessee, USA, 14-17 Septembre 1999.
- [6] L. Cordesses, P. Martinet, B. Thuilot et M. Berducat, "GPS-based control of a land vehicle", Proceedings of the 16th IAARC/IFAC/IEEE International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC'99, pp 41-46, Madrid, Spain, 22-24 Septembre 1999.
- [7] V. Creuze, *Navigation référencée terrain pour véhicule autonome sous-marin*, Thèse de doctorat, CNRS/Université de Montpellier II, Montpellier, Novembre 2002.
- [8] V. Creuze et B. Jouvencel, "Avoidance of Underwater Cliffs for Autonomous Underwater Vehicles", IROS 2002 IEEE, Lausanne, Octobre 2002.
- [9] V. Creuze, B. Jouvencel et P. Baccou, "Seabed following for small autonomous underwater vehicles", OCEANS2001 MTS/IEEE, Honolulu, p.369-374, Novembre 2001.
- [10] 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., p. 497-516, 1957.
- [11] B. Espiau, F. Chaumette et P. Rives, "A new approach to visual servoing in robotics", IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992
- [12] T. I. Fossen, *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 1994.
- [13] B. Granvaux, J.L. Nicolas et M. Semillon, *Acoustique sous-marine*, Théorie et applications de l'acoustique sous-marine, Tome 1, édité par l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées, 1980.
- [14] W. Khalil et E. Dombre, *Modélisation, Identification et Command des Robots*, 2<sup>e</sup> édition, Collection Robotique, Hermes Science Publications, Paris, 1999.
- [15] R. Kuc et M. Siegel, *Physically based simulation model for acoustic sensor robot navigation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. PAMI-9, No. 6, p. 766-778, Novembre 1987.
- [16] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1991.
- [17] 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.
- [18] P. Martinet, C. Debain, M. Berducat, P. Bonton et J. Gallice, « Asservissement visuel pour le guidage d'engins agricoles », Actes des Journées Automatique, Agriculture et Agro-Alimentaire, Club EEA, MENESR, PRC-GdR Automatique et ISIS, J3A'97, pp 213-223, Clermont-Ferrand, France, 28-29 Octobre 1997.
- [19] P. Martinet, D. Khadraoui, C. Thibaud et J. Gallice, "Controller synthesis applied to automatic guided vehicles", SYROCO'97, Nantes, France, 2 Septembre 1997.
- [20] R. M. Murray et S. Sastry, "Steering non holonomic systems using sinusoids", Proceedings of the CDC, p. 2097-2101, 1990.
- [21] P. Newman et H. Durrant-Whyte, "Using Sonar in Terrain-Aided Underwater Navigation", Department of Mechatronics, University of Sidney, IEEE, p. 440-445, 1998.
- [22] Y. Petillot, J. Teña Ruiz et D.M. Lane, "Underwater vehicle path planning using a multi-beam forward looking sonar", IEEE, p. 1194, Revue, 1998.
- [23] J. A. Reeds et L. A. Shepp, "Optimal paths for a car that goes both forwards and backwards", Pacific Journal of Mathematics, 145(2), 1990.
- [24] C. Samson, M. Le Borgne et B. Espiau, *Robot Control. The task function approach*, ISBN 0-19-8538057, Oxford, 1991.
- [25] J-J. Slotine et W. Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.

## Perception et suivi de fond pour véhicules autonomes sous-marins

- [26] J. Vaganay, B. Jouvencel, P. Baccou et V. Creuze, *The Odyssey of Taipan exploring the Ocean at GOATS 2000*, GOATS2000, Saclantcen, La Spezia, 2001.
- [27] J. Vaganay, B. Jouvencel, P. Lépinay, et R. Zapata, *Taipan, an AUV for very Shallow Water Applications*, WAC'98, Anchorage, 1998.
- [28] R. Zapata et P. Lépinay, "Collision avoidance and bottom following of a torpedo-like vehicle", OCEANS96, Fort Lauderdale, Floride, 23-25 septembre 1996.

*Manuscrit reçu le 1<sup>er</sup> juillet 2002*

### LES AUTEURS

Vincent CREUZE



Vincent Creuze est professeur agrégé de Physique Appliquée et docteur « Systèmes Automatiques et Microélectroniques » de l'Université de Montpellier II. Il a effectué ses travaux de recherche de thèse au LIRMM, au sein du groupe Robotique sous-marine.

Bruno JOUVENCEL



Bruno Jouvencel professeur de l'Université de Montpellier II, anime le groupe Robotique sous-marine au LIRMM et s'intéresse plus particulièrement à la perception multi plateformes mobiles.