



Date de publication :
10 septembre 2014

Robots marins et sous-marins - Perception, modélisation, commande

Cet article est issu de : **Automatique - Robotique | Robotique**

par **Vincent CREUZE**

Mots-clés

Robotique | Véhicules marins
et sous-marins | Perception |
Modélisation | Commande

Résumé Dans cet article, nous présentons les diverses catégories de robots marins et sous-marins en détaillant leurs domaines d'application et les aspects technologiques et scientifiques associés. Nous présentons ensuite leurs moyens de localisation, de perception (notamment acoustiques) et de communication, et nous en donnons les principales caractéristiques techniques. Dans une troisième partie, nous faisons l'inventaire des forces subies par de tels véhicules et nous établissons leur modèle dynamique. Enfin, nous présentons les trois approches de commande les plus utilisées et nous les comparons expérimentalement.

Keywords

Robotics | Marine vehicles |
Sensing | Modeling | Control

Abstract In this paper, we describe the different available types of marine and underwater robots and we detail the related fields as well as the corresponding technical and scientific issues. We also focus on the current equipments dedicated to positioning, sensing (including acoustic remote sensing), and communication. This presentation is completed by a review of the technical features of these equipments. Then, we detail the forces and torques exerted on such a vehicle, and we derive its dynamic model. The last section is dedicated to control. Three classical controllers are detailed and experimentally compared.

Pour toute question :

Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :

infos.clients@teching.com

Par téléphone :

00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **28/02/2022**

Pour le compte : **7200031509 - universite de toulon // 193.49.96.14**

Robots marins et sous-marins

Perception, modélisation, commande

par **Vincent CREUZE**

Maître de conférences

LIRMM, UMR5506 CNRS / université Montpellier 2, Montpellier, France

1. Catégories de véhicules et applications	S 7 783 – 2
1.1 Véhicules de surface (USV)	– 2
1.2 Véhicules sous-marins (ROV, AUV, <i>gliders</i>)	– 3
1.3 Autres types de véhicules	– 5
2. Localisation, perception, communication	– 6
2.1 Localisation et attitude	– 6
2.2 Perception de l'environnement	– 7
2.3 Communications sous-marines	– 13
3. Modélisation des véhicules	– 14
3.1 Cinématique	– 14
3.2 Dynamique	– 16
4. Commande des véhicules	– 20
4.1 Introduction	– 20
4.2 Commande PID	– 20
4.3 Commande adaptative à retour d'état	– 20
4.4 Commande en régime glissant	– 22
4.5 Comparaison expérimentale des trois méthodes proposées	– 23
5. Conclusion	– 25
Pour en savoir plus	Doc. S 7 783

Les robots marins (sous l'eau, mais aussi sur l'eau) sont en plein essor. À l'aube du développement des flottilles de véhicules, ils ont acquis désormais une certaine maturité industrielle et scientifique. Leur usage est largement répandu, principalement pour des applications pétrolières off-shore, pour les applications militaires (surveillance, déminage, etc.) et pour les applications scientifiques (océanographie, climatologie, etc.). Nous proposons dans cet article un tour d'horizon des véhicules existants (USV, AUV, ROV, glider, robot voilier, robot bio-inspiré, profileur, etc.) ainsi qu'un descriptif détaillé des matériels associés à leur fonctionnement, et qui permettent la localisation, la perception et la communication. Pour chaque catégorie de matériel, les principes de fonctionnement sont rappelés et les données techniques indispensables sont résumées, afin de permettre au lecteur de sélectionner correctement les matériels adaptés à son application, en tenant compte des caractéristiques techniques et des conditions d'utilisation.

Cet état de l'art technologique est accompagné dans une deuxième partie des outils scientifiques permettant de contrôler les véhicules marins : la modélisation et la commande. Le modèle présenté est celui défini par la SNAME (Society of Naval Architects and Marine Engineers) qui est largement utilisé par la communauté. À partir de ce modèle, nous avons sélectionné trois commandes, dont nous rappelons le fonctionnement et les points clés du réglage. Il s'agit de la commande PID, de la commande adaptative à retour d'état non linéaire et de la commande en régime glissant. Des exemples illustrent leur utilisation, et leurs avantages et inconvénients sont expliqués. Enfin, l'article se termine par une comparaison expérimentale des trois commandes présentées, appliquées à l'asservissement en profondeur d'un mini ROV. Cela permet de comparer les commandes et d'en souligner les limites.

1. Catégories de véhicules et applications

1.1 Véhicules de surface (USV)

1.1.1 Véhicules motorisés

Les USV (*Unmanned Surface Vehicles*) à moteur ont pour principales applications la surveillance (militaire), la cartographie/bathymétrie (militaire et civile), la détection/neutralisation de mines et l'océanographie (échantillonnage des paramètres physico-chimiques de l'eau). Dans la plupart des cas, les véhicules de surface sont simplement téléopérés. Le principal frein à leur automatisation complète est la détection et l'évitement des autres navires, ainsi qu'un cadre légal clair à leur navigation autonome. Dans tous les cas, le déploiement de ces véhicules doit être supervisé à distance par un opérateur humain, capable à tout moment d'interrompre la mission pour des raisons de sécurité. Parmi les véhicules de ce type, on peut citer l'exemple du véhicule militaire *Inspector*, conçu par ECA Robotics et des catamarans de *SeaRobotics* (figure 1).

1.1.2 Robots voiliers

Les missions allouées aux robots voiliers sont sensiblement identiques à celles des robots de surface motorisés, mais le mode de propulsion de ces engins leur confère une autonomie bien plus grande. Théoriquement, cette autonomie est même illimitée, car le bateau peut être équipé de panneaux solaires ou d'une éolienne. Ce dernier système est préféré la plupart du temps aux panneaux solaires dont l'efficacité est rapidement altérée par des dépôts de sels. On rencontre aussi parfois des systèmes de récupération d'énergie mécanique exploitant les mouvements de la bôme lors des virements de bord. En pratique, ce sont les capteurs embarqués qui limitent l'autonomie des robots voiliers. En effet, hormis pour la mesure de température (air ou eau) et de vitesse du vent, la plupart des capteurs océanographiques embarqués nécessitent des rééchantillonnages fréquents (mensuels, voire hebdomadaires) en raison de l'oxydation ou de la colonisation par des organismes vivants (algues, coquillages, etc.), communément appelés « *bio fouling* ».

La taille des robots voiliers est comprise entre quelques dizaines de centimètres et quelques mètres (souvent inférieure à 3 mètres). Du fait de leur grande autonomie, ces véhicules sont la plupart du temps utilisés en mode autonome, programmés pour suivre une

route donnée. Hormis en zone hauturière, pour des raisons de sécurité, la navigation autonome de ces engins exige une supervision humaine.

L'avantage des robots-voiliers par rapport à une bouée dérivante réside dans leur aptitude à se maintenir quasiment immobiles dans une zone donnée (« *station keeping* »), à effectuer des échantillonnages spatialement réguliers, ou encore à traverser des lignes de fronts climatiques. De plus, à l'inverse des navires océanographiques ou des « *ferry-box* » (permettant l'échantillonnage automatique à bord de navires de commerce), les robots voiliers ne perturbent pas, ou très peu, la grandeur mesurée. Du fait de leur petite taille, leur présence et leur déplacement engendrent peu de perturbations de la couche d'eau de *subsurface* et de la vitesse du vent.

Le robot voilier probablement le plus abouti actuellement est le robot *Vaimos* [*Vaimos_TI*] [1], développé conjointement par l'IFREMER et l'ENSTA Bretagne (figure 2). Il a notamment été déployé plusieurs jours en totale autonomie dans l'océan Atlantique.

À ce jour, aucun robot voilier n'est parvenu à relever le défi de la microtransat (traversée de l'Atlantique en totale autonomie [Doc. S 7 783]), mais chaque année, les robots voiliers s'affrontent lors de la compétition internationale WRSC (*World Robotic Sailing Championship*).

Les travaux de recherche dans ce domaine portent notamment sur la commande, sur la garantie du respect de la trajectoire prédéfinie, sur la détection et l'évitement d'obstacles, etc. [1] [2]. Là encore, le cadre légal n'est pas clairement défini et justifie la plus grande prudence lors des expérimentations.

1.1.3 Véhicules houlo-propulsés

Catégorie d'engins beaucoup plus marginale, les véhicules houlo-propulsés (également appelés « *wave-gliders* ») sont mus par un système de paravanes (volets inclinables) (figure 3) immergé et relié à la coque par un câble maintenu tendu par gravité. Le pilonnement du bateau (succession de mouvements ascendants et descendants) fait agir les volets comme les palmes d'un nageur, propulsant le véhicule vers l'avant. Ce moyen très efficace a permis au véhicule *Papa Mau* de traverser le Pacifique en 2012 (16 668 km, en plusieurs étapes). Les *wave-gliders* sont porteurs d'équipements permettant par exemple de récolter des données climatologiques (vent, pression, etc.) et océanologiques (courants, hauteur et spectre des vagues, salinité, température, oxygène dissous). Ils peuvent également être utilisés comme relais de communication, permettant, par modem acoustique et radio satellite, de communiquer avec des dispositifs immergés.

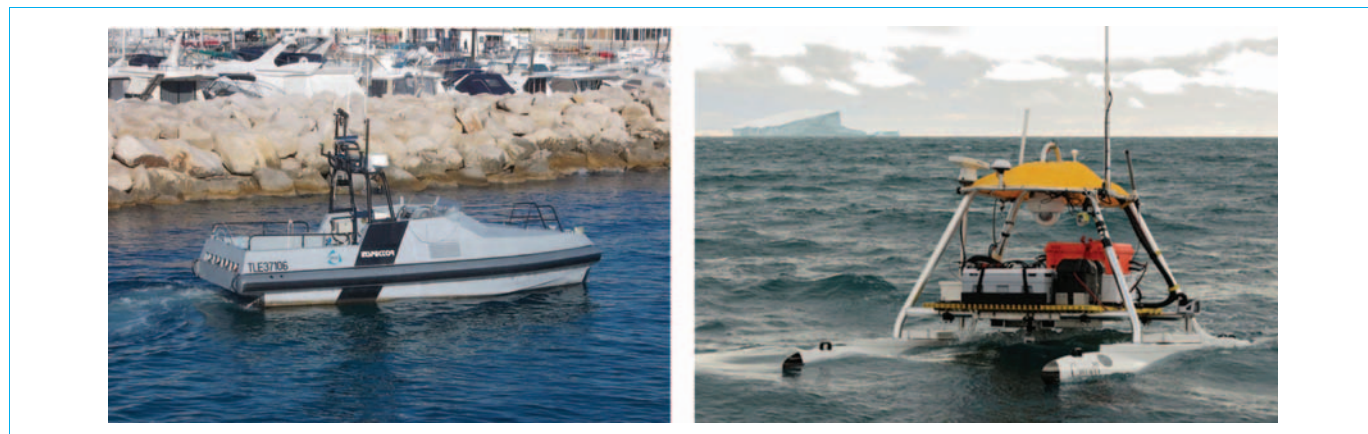


Figure 1 – À gauche, le véhicule de surface *INSPECTOR* d'ECA. On remarque la présence de nombreux capteurs (radar, caméra, etc.) (crédit : ECA Robotics). À droite, un catamaran autonome de surface conçu par *SeaRobotics* pour le compte de *Defence Research and Development Canada (DRDC)* et instrumenté notamment pour le profilage des icebergs (crédit : *SeaRobotics*)

Les problèmes théoriques et pratiques de ce type d'engin (capteurs, détection/évitement, cadre légal inexistant) sont les mêmes que pour les deux précédentes catégories.



Figure 2 – Mise à l'eau du robot voilier Vaimos lors d'une mission dans l'Atlantique depuis le navire Thalassa de l'IFREMER (crédit : IFREMER / ENSTA Bretagne)

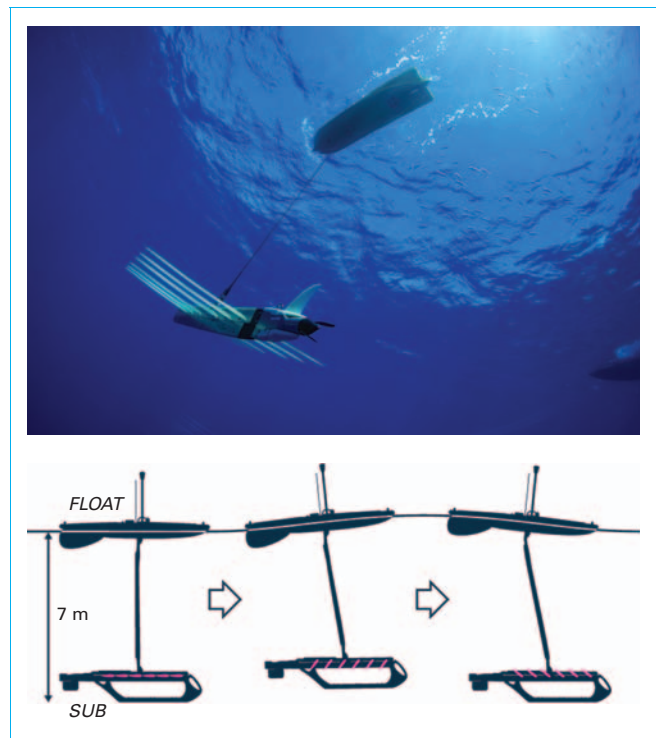


Figure 3 – Le wave-glider SV2 de Liquid robotics et le principe de fonctionnement de son mode de propulsion. Le poids de la partie immergée maintient tendu le câble qui la relie à la partie flottante. L'orientation variable des volets (en rose sur la figure), conjuguée aux mouvements verticaux imposés par la partie flottante, engendre une poussée horizontale qui fait avancer l'ensemble (copyright : Liquid Robotics)

1.2 Véhicules sous-marins (ROV, AUV, gliders)

1.2.1 Véhicules Télé-opérés (ROV)

Les ROV (*Remotely Operated Vehicles*) constituent l'essentiel des véhicules sous-marins exploités dans le monde. Comme leur nom l'indique, les ROV sont des engins télé-opérés. Certains de leurs degrés de liberté peuvent néanmoins être automatisés (profondeur, distance/fond, cap) et l'on utilise alors le terme anglo-saxon de « *co-control* ». Leurs applications sont nombreuses et concernent principalement l'industrie pétrolière, les travaux sous-marins et l'océanographie. Ils peuvent intervenir jusqu'à 6 000 mètres de profondeur.

Bien qu'il existe plusieurs classifications détaillées, on peut distinguer principalement deux grandes catégories : les ROV d'observation et les ROV d'intervention.

1.2.2 ROV d'observation

Également appelés ROV d'inspection, il s'agit de ROV de petite taille (de 3 à 300 kg) qui n'embarquent que des instruments d'observation et de mesure (caméra vidéo, appareil photo, sonar, caméra acoustique, sonde d'épaisseur de coque, magnétomètre, etc.). Cette classe de véhicules est utilisée par exemple pour inspecter les coques de bateaux (usure, présence de mine, présence de drogue), les parements de barrages hydrauliques, l'intérieur de structures immergées (pompes, conduites d'amenée), les infrastructures portuaires ou de génie-civil (piles de ponts), mais aussi pour l'inspection de pipelines ou de risers (tuyaux reliant les puits à une plate-forme pétrolière ou à une unité flottante de production, stockage et déchargement, communément dénommée FPSO), ou pour l'identification de mines.

Les principales difficultés opérationnelles sont liées à la présence de l'ombilical et au courant marin. Pour des applications très profondes (au-delà de 200 à 500 mètres), le véhicule n'étant pas dimensionné pour tracter la totalité de l'ombilical, l'engin est déployé depuis un système télé-opéré assurant son déroulement/enroulement, appelé TMS (*Tether Management System*) et ayant la plupart du temps la forme d'une cage (figure 4). Le TMS est relié au navire de surface par un ombilical tendu, plus gros et adapté à la longue distance et à la traction. En surface, le ROV solide du TMS sera récupéré par un portique communément appelé « LARS » (*Launch And Recovery System*).

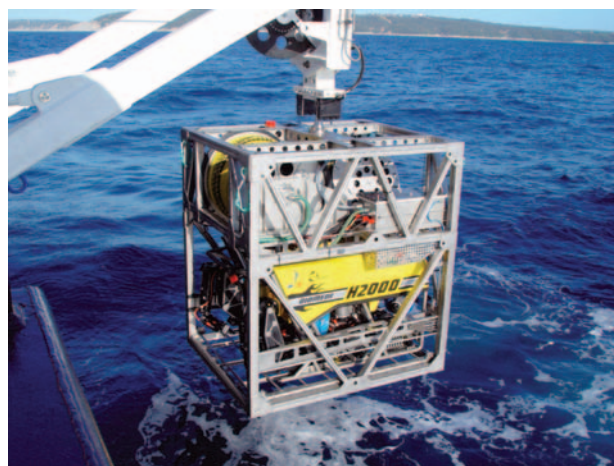


Figure 4 – Le ROV d'intervention H2000 de la société ECA HYTEC et son TMS (*Tether Management System*). Les deux bras blancs actionnés par des vérins constituent le portique du LARS (*Launch And Recovery System*). Ce robot de 900 kg peut opérer jusqu'à 2 000 m (copyright : ECA Robotics)

1.2.3 ROV d'intervention (*Workclass*)

Les ROV d'intervention (figure 5) sont plus gros que les ROV d'observation et disposent d'un ou de deux bras manipulateurs au bout desquels divers outils peuvent être adaptés en fonction des applications. Les bras utilisés sont couramment hydrauliques, mais récemment des modèles électriques sont apparus, permettant une plus grande finesse des mouvements et de la commande.

1.2.4 Véhicules autonomes sous-marins (AUV)

Les AUV (*Autonomous Underwater Vehicles*) accomplissent leur mission de façon autonome. Ils emportent des systèmes de détection acoustique (sondeur multifaisceaux, sonar latéral, etc.) et sont utilisés principalement pour de la bathymétrie/cartographie, notamment pour la détection de mines et pour l'océanographie (figure 6). Leur portée étant assez importante, leur positionnement repose sur l'utilisation d'une centrale inertielle, souvent couplée à un *loch Doppler* (DVL : *Doppler Velocity Log*, permettant de mesurer la vitesse du véhicule par rapport au fond ou à la surface). Pour des missions longues, un recalage absolu de la position peut être accompli soit par positionnement GPS ou DGPS en surface, soit par des systèmes de localisation acoustiques de type USBL (*Ultra short Baseline*) ou LBL (*Long Baseline*). Le principe de ces différents moyens de localisation sera détaillé au paragraphe 2. L'autonomie et la portée des

AUV sont essentiellement liées à leur taille. Ainsi le petit Remus 100 de Kongsberg (1,6 m de long, 37 kg, vitesse maximale de 5 nœuds) (voir annuaire des fabricants [Doc. S 7 783]) peut naviguer pendant 22 heures à 3 nœuds (soit une portée d'environ 40 km), alors qu'un plus gros AUV, le Hugin de Kongsberg (longueur pouvant atteindre 7 mètres pour un poids de 1 900 kg et une vitesse comprise entre 2 et 6 nœuds), peut naviguer jusqu'à 74 heures avec une portée supérieure à 200 km.

Durant la mission, lorsque l'engin est immergé, la communication avec l'AUV n'est possible, dans le meilleur des cas, qu'au moyen d'un modem acoustique, voire d'un simple transpondeur acoustique. Les débits étant très faibles (paragraphe 2.3), les données échangées se limitent à des ordres basiques ou à la transmission de signaux de bon déroulement ou d'interruption de mission. Les données enregistrées par l'AUV ne sont réellement accessibles qu'après la récupération de ce dernier, ou en cours de mission par radio satellite lorsque l'AUV fait surface.

Parmi les AUV, on peut noter le cas singulier du HAUV (société Bluefin Robotics), dont la forme rappelle plus celle d'un ROV, mais qui accomplit en toute autonomie l'inspection des coques de navires. Sa navigation est basée principalement sur les données de distance et de vitesse fournies par un *loch Doppler*, orienté vers la paroi suivie.

1.2.5 Les hybrides (HROV)

Les véhicules hybrides peuvent être utilisés soit en téléopération (filoguidée) soit en totale autonomie. C'est le cas par exemple du véhicule HROV d'IFREMER, capable d'opérer à 2 000 mètres de profondeur le long des parois de canyons océaniques. Le véhicule est relié à une gueuse par une fine fibre optique et emporte les batteries qui lui fournissent de l'énergie. Si la fibre se rompt, le HROV est capable de poursuivre ou de terminer sa mission (en mode dégradé) en toute sécurité, de façon autonome.

1.2.6 Gliders

Afin d'augmenter la portée des AUV de nouveaux modes de propulsion ont été proposés. On a ainsi vu apparaître les *gliders*, exploitant un *ballast* pour faire varier leur flottabilité et planer durant les phases alternées de plongée (750 mètres, voire 1 000 mètres selon les modèles) et de remontée à la surface à une vitesse comprise entre 0,5 et 1 nœud. Il n'y a donc plus d'hélice, ni de pièces mobiles à l'extérieur du véhicule, et l'autonomie est fortement accrue par rapport à celle des AUV (typiquement 1 à 2 mois, mais pouvant atteindre 8 mois avec une portée comprise entre 1 000 km et 38 000 km). Lorsque le *glider* arrive en surface, il peut basculer, faisant ainsi émerger sa queue/antenne (figure 7) afin de communiquer par satellite avec l'opérateur qui peut, le cas échéant, replanifier la mission.



Figure 5 – Le ROV Victor 6000 de l'Ifremer (copyright Ifremer 2014)

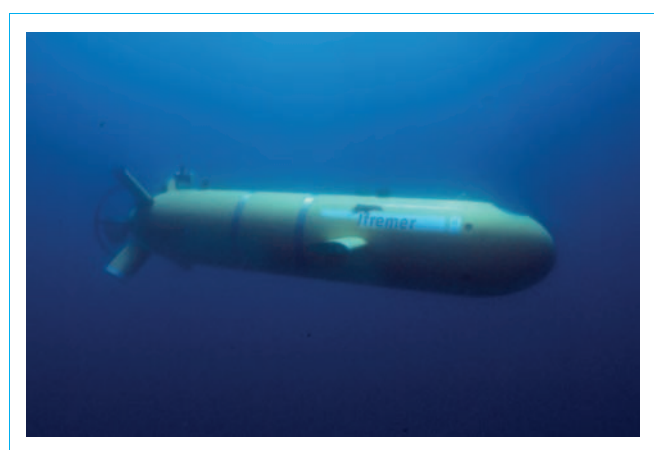


Figure 6 – L'AUV AsterX d'Ifremer (copyright Ifremer 2014)



Figure 7 – Le *glider* SeaExplorer (2,9 m, 59 kg) de la société ACSA en train de communiquer en surface (crédit : ACSA)

Les *gliders* sont principalement utilisés pour des mesures environnementales (salinité, température, fluorescence, oxygène dissous, chlorophylle, etc.) et des enregistrements acoustiques (du fait de l'absence de propulseur et de sa faible vitesse).

1.3 Autres types de véhicules

1.3.1 Crawlers

Les *crawlers* sont des robots sous-marins équipés de roues ou de chenilles. Ils peuvent évidemment rouler sur le fond marin et à l'intérieur de canalisations en eau, mais dans certains cas, ils peuvent aussi se déplacer le long de parois non horizontales telles que des coques de bateau. Cela est rendu possible soit par l'ajout d'un ou de plusieurs propulseurs plaquant le véhicule contre la paroi, soit par un électro-aimant si les parois sont métalliques. Les avantages de ce type d'engin pour l'inspection sont la stabilité de la visualisation, la localisation précise à moindre coût technologique et la possibilité d'effectuer un nettoyage efficace ou toute action nécessitant un appui ferme contre la paroi. L'inconvénient réside dans le fait que ces véhicules soulèvent des particules qui diminuent considérablement la visibilité. Enfin, on notera que de très gros *crawlers* (plusieurs tonnes) sont utilisés pour l'exploitation minière sous-marine.

1.3.2 Véhicules bio-inspirés (reptile, anguille, poisson, méduse, etc.)

Comme certains des animaux qu'ils imitent (salamandre, serpent), les véhicules bio-inspirés peuvent présenter l'avantage de pouvoir se déplacer sur des terrains mixtes (alternance de nage dans l'eau et de reptation sur le sol). Dans ce cas, les principales applications sont liées à l'observation, particulièrement dans le contexte militaire. D'autres véhicules s'inspirent simultanément de plusieurs animaux. Ainsi par exemple, le robot du projet Angels (European Commission, Information Society, and Media, Future and Emerging Technologies (FET) contract number : 231845), qui est un précurseur dans le domaine, nage comme une anguille [S 7 856] pour rallier efficacement un point d'intérêt, puis se sépare en plusieurs modules motorisés indépendants, exploitant l'électrolocation (§ 2.2.3) pour percevoir son environnement proche (figure 8). Ce mode de perception est inspiré de celui de poissons électriques dipolaires qui, au moyen d'un champ électrique, perçoivent les obstacles/proies les entourant.

D'autres engins bio-inspirés ont pour motivation l'étude du mode de propulsion (tortue, poisson, méduse). On citera l'exemple remarquable de la salamandre « Salamandra Robotica », développée par l'École polytechnique fédérale de Lausanne, dont le comportement de chaque segment du corps est déterminé de façon autonome en fonction de ses voisins. Ceci permet aussi bien la nage que la reptation, y compris lorsqu'une partie du corps est sectionnée [6].

Enfin, certains engins bio-inspirés ont pour finalité le jeu et l'esthétisme. Les méduses AquaJelly de Festo et les poissons Jessiko de Robotswim en sont de très belles illustrations (figure 9).

1.3.3 Profileurs (programme Argo)

Les profileurs sont des engins autonomes d'une vingtaine de kilogrammes, dérivant librement dans l'océan et effectuant des descentes à 2 000 mètres de profondeur (voire 3 500 mètres pour les profileurs NAOS), permettant de mesurer les caractéristiques physico-chimiques de la colonne d'eau (principalement température et salinité, mais aussi oxygène dissous pour les plus récents). Le système repose sur un *ballast* que l'on comprime pour descendre, que l'on dilate pour remonter à la surface. Les données recueillies à chaque cycle sont transmises en surface par satellite. Le profileur peut accomplir environ 250 cycles, à l'issue desquels il sera perdu au fond de l'océan (ce qui correspond à une durée de vie d'environ trois ans). Afin de minimiser les risques de destruction par des navires ou par des engins de pêche, les profileurs « stationnent » à 1 500 mètres de profondeur durant leurs périodes de repos (entre deux cycles).

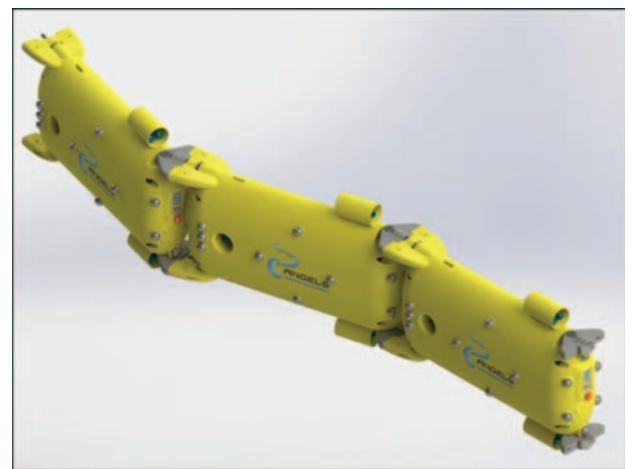


Figure 8 – Le prototype Angels (ici représenté avec seulement trois des neuf modules) se déplace rapidement en configuration anguille puis se décompose en éléments indépendants une fois le point d'intérêt rallié (crédit : École des mines de Nantes – IRCCyN & Scuola Superiore Santa Anna – CRIM Lab)

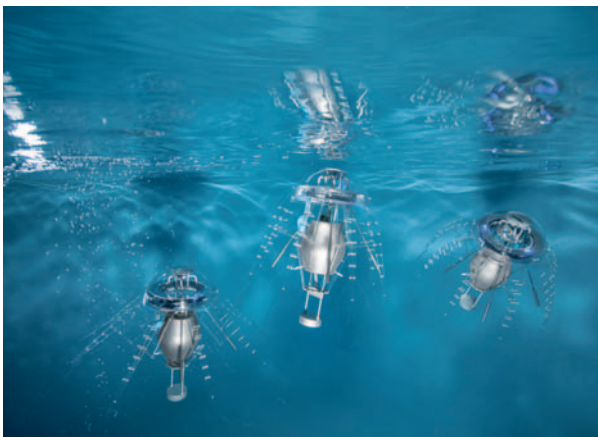


Figure 9 – Les méduses AquaJelly 2.0 de Festo (copyright : Festo AG & Co. KG) **et le poisson Jessiko** (crédit : Robotswim)

Lancé en 1999 par l'UNESCO, le programme international Argo a permis à plus de 30 pays de déployer 3 000 profileurs sur toutes les mers du monde. Pleinement opérationnel depuis 2007, le système permet de fournir des mesures océanographiques à une vaste communauté d'océanographes et de climatologues. Bien que le déploiement des profileurs ne soit pas contrôlé, leur renouvellement régulier permet de maintenir l'uniformité de leur répartition géographique [7].

2. Localisation, perception, communication

2.1 Localisation et attitude

La localisation des véhicules marins est un point-clé de leur bonne utilisation. Que ce soit au voisinage d'une infrastructure *offshore* ou dans un environnement naturel, un mauvais positionnement peut avoir des conséquences graves pour l'environnement exploré et pour la sécurité du véhicule lui-même. De plus, dans le cas particulier de l'inspection, les données recueillies ont peu de sens si elles ne sont pas localisées correctement.

2.1.1 Localisation des véhicules de surface

Pour les véhicules de surface, la localisation ne pose aucun problème. Un positionnement par GPS ou par GPS différentiel (DGPS) est en effet toujours possible. Il peut être complété par d'autres dispositifs afin d'en accroître la précision (centrale inertielle à fibre optique).

Pour la commande du véhicule, il est nécessaire de connaître le cap, les angles de roulis et de tangage, ainsi que les vitesses linéaires et les vitesses de rotation (§ 3.1.1). Pour cela, il est suffisant de compléter le GPS par une minicentrale inertielle (moins de 2 000 euros) de type MEMS. Pour ce type d'application, il existe d'ailleurs des produits rassemblant la centrale et le GPS dans un unique boîtier de la taille d'une boîte d'allumettes.

2.1.2 Localisation des véhicules sous-marins

Sitôt passés les premiers centimètres sous la surface, l'eau de mer agit comme une barrière pour les ondes électromagnétiques, ce qui ne permet plus d'utiliser le système GPS. Pour se localiser, on dispose alors de deux solutions : créer localement un système de positionnement acoustique ou avoir recours à une odométrie (estimation du chemin parcouru) très fine.

■ Systèmes acoustiques

Les systèmes de positionnement acoustique sous-marins reposent sur la mesure de temps de propagation d'ondes acoustiques ou sur des méthodes de traitement d'antenne.

On distingue plusieurs familles de systèmes de positionnement acoustiques.

Les bases longues (**LBL : Long BaseLine**) sont constituées d'au moins trois transpondeurs posés sur le fond, autour de la zone d'opération (jusqu'à 10 km), et dont on connaît précisément les positions absolues (ou au moins relatives). Le véhicule sous-marin émet un signal acoustique (*ping*) et mesure le temps de vol des signaux émis en réponse par les transpondeurs. Par triangulation, le véhicule peut déterminer sa position. La qualité du positionnement est souvent augmentée par la prise en compte d'une mesure de profondeur (capteur de pression). La précision métrique, voire centimétrique, du positionnement dépend de la configuration (distance et disposition des transpondeurs). La

qualité de la mesure est relativement stable à l'intérieur de la zone opérationnelle du système. Les LBL étant souvent déployées au fond, elles présentent en outre l'avantage d'éviter les erreurs de mesures dues aux réflexions acoustiques sur la surface. Leur calibrage parfois long et délicat demeure leur principal désavantage. Il existe une version de LBL à calibrage automatique, appelée **GIB-Lite (GPS Intelligent Buoy)**. Le système est constitué de quatre bouées de surface, localisées par GPS et sous lesquelles (à quelques mètres) pendent des hydrophones dont la profondeur d'immersion est connue. Le véhicule à localiser est porteur d'un *pinger* dont l'horloge ultra-stable a été préalablement synchronisée avec les horloges des bouées. Il émet un *ping* à intervalles réguliers et connus (il peut également transmettre sa mesure de profondeur). Les bouées déterminent passivement le temps de vol. Transmis par radio, les temps de vol et les position des bouées permettent à l'opérateur de connaître la position du véhicule. Ce système peut être déployé en quelques dizaines de minutes (voir GIB-Lite de la société ACSA dans l'annuaire des fabricants [Doc. S 7 783]) avec des performances sensiblement identiques à celles de la base longue traditionnelle.

Lorsque les distances entre les trois (ou plus) transpondeurs sont beaucoup plus petites que la zone d'opération et que les dispositifs acoustiques sont fixés sous la coque du bateau qui déploie le ROV ou l'AUV, on parle de base courte (**SBL : Short BaseLine**). Dans ce cas, le calibrage n'est plus un problème puisqu'il n'est réalisé qu'une seule fois, mais la précision du positionnement par triangulation est moins bonne qu'avec une base longue du fait de la proximité des transpondeurs. En outre, le navire porteur de la SBL n'étant pas immobile, il est nécessaire de prendre en compte sa position (GPS différentiel) et son attitude (centrale inertielle) pour corriger les mesures. Les transpondeurs d'une base courte (SBL) peuvent être rapprochés jusqu'à former un seul capteur, une petite matrice acoustique (antenne) capable de percevoir non seulement la distance du véhicule (par mesure de temps de vol), mais aussi la direction dans laquelle il se trouve (par mesure de déphasage sur les différents éléments de l'antenne). On appelle ce type de dispositif une base ultra-courte (**USBL : Ultra Short BaseLine**), voire une base super courte (**SSBL : Super Short BaseLine**). Puisqu'elle repose en partie sur une mesure angulaire, la précision du positionnement décroît avec la distance et c'est la précision angulaire de l'USBL qu'il faut considérer. Les meilleurs systèmes affichent des précisions angulaires inférieures à 0,05 degré. Comme pour une base courte, il est nécessaire de prendre en compte la position et l'attitude du navire porteur. La portée d'une USBL peut dépasser 10 km. Le coût du système est compris entre 15 k€ et 60 k€, auquel il convient d'ajouter le coût d'une centrale inertielle pour tenir compte des mouvements du navire. Certains modèles proposent en outre la possibilité d'utiliser le canal acoustique de l'USBL pour transférer des données simultanément au positionnement.

■ Centrales inertielles

L'objectif d'une centrale inertielle (**IMU : Inertial Measurement Units**) est de mesurer les accélérations linéaires et les vitesses de rotation du véhicule en trois dimensions. La plupart du temps, les centrales intègrent aussi un magnétomètre et un filtrage interne (souvent un filtre de Kalman) leur permettant de fournir une estimation de l'attitude du véhicule (angles d'Euler ou bien quaternions). On parle alors d'**AHRS (Attitude and Heading Reference Systems)**.

Il existe deux catégories de centrales inertielles. **Les centrales à base de gyroscopes à fibre optique (FOG : Fiber Optic Gyroscopes)**, dont les biais de mesures sont si faibles qu'il est possible d'intégrer les valeurs d'accélération pour déterminer la vitesse et la position (on parle alors d'**INS : Inertial Navigation Systems**). Elles sont néanmoins coûteuses (de l'ordre de la dizaine de k€ et plus). Il est fréquent d'associer une INS à un DVL (*Doppler Velocity Log*), qui, en fournissant la vitesse par rapport au fond, permet de borner l'erreur de vitesse de l'INS. L'erreur de position, bien qu'évoluant lentement, n'est, elle, cependant pas bornée. La plupart des AUV disposent donc en option d'une compatibilité avec les systèmes

acoustiques (souvent LBL ou USBL) permettant de recalculer la position estimée par leur centrale inertielle et leur DVL. Un recalage de position par GPS en surface est également possible.

La précision en tangage et roulis de ce type de centrale est de l'ordre de $0,01^\circ$ (INS PHINS de la société iXBlue). La précision en cap est comprise entre $0,01^\circ$ et $0,02^\circ$. L'erreur de positionnement est de 0,6 mille nautique par heure en mode inertielle seul et de 0,1 % de la distance parcourue si la centrale est associée à un DVL. Lorsque la centrale est associée à un système de positionnement acoustique ou GPS, la précision de positionnement du système utilisé est multipliée par trois (PHINS de iXBlue).

La deuxième catégorie de centrales exploite des composants électroniques de type **MEMS** (*Micro Electro-Mechanical Systems*) qui permettent à moindre coût (quelques dizaines de centimes d'euros) de mesurer des accélérations et des vitesses de rotation. Les biais de mesure de ce type de capteurs sont beaucoup plus importants que ceux des systèmes optiques et varient de façon importante avec la température. Néanmoins, ces systèmes permettent, généralement par filtrage de Kalman, d'estimer l'attitude du véhicule (angles d'Euler) en fusionnant les mesures de l'accélération (incluant la gravité supposée fixe), les vitesses de rotation et le champ magnétique. La précision des mesures est suffisante pour commander un véhicule (pilotage automatique du cap ou du tangage par exemple) mais ne permet en aucun cas de le localiser, à moins qu'il ne s'agisse d'un véhicule de surface. Dans ce cas la fusion des données GPS avec les données de la centrale inertielle est possible (des dispositifs commerciaux tels que l'IG-500N de la société française SBG Systems intègrent cette fonctionnalité) et le lecteur intéressé par l'algorithmique sous-jacente se reportera à [TE 6 725].

En résumé, on trouvera plutôt des centrales optiques à bord des AUV et des centrales MEMS à bord des ROV, ces derniers évoluant dans un espace plus restreint disposant souvent d'un système de positionnement acoustique (LBL, USBL, etc.).

■ Mesure de profondeur

La mesure de profondeur est obtenue simplement par mesure de pression. La relation de proportionnalité qui relie pression et profondeur dépend de la densité de l'eau de mer et donc principalement de la salinité. On retiendra que dans la mer, la pression augmente d'environ 1 025 hPa (soit 1,025 bar) tous les 10 mètres. Le choix du capteur dépendra de l'application. Si l'on projette d'automatiser la profondeur d'immersion d'un véhicule, il faudra choisir un capteur dont la résolution dépasse largement la résolution que l'on attend de la régulation. La résolution et la gamme des capteurs étant étroitement liées, il est illusoire d'avoir une précision centimétrique à 6 000 mètres de profondeur. Dans ce cas, on réglera plutôt l'altitude, c'est-à-dire la distance mesurée entre le véhicule et le fond (par un dispositif de mesure optique ou acoustique).

2.2 Perception de l'environnement

Les méthodes utilisées en surface (RADAR, Vidéo, LIDAR) ne seront pas traitées car elles sont identiques à celles utilisées en robotique terrestre ou aérienne. On notera cependant l'existence du système **AIS** (*Automatic Identification System*) propre au domaine maritime. Ce dernier, développé notamment pour prévenir les abordages, permet de connaître, par radio VHF, les coordonnées GPS, la route et les caractéristiques des navires environnants (à condition qu'ils soient eux-mêmes équipés du système AIS). Cependant, ne donnant pas la liste exhaustive des navires environnants, il ne peut être utilisé que comme complément d'information.

2.2.1 Perception visuelle sous-marine

Le moyen le plus économique de percevoir l'environnement d'un robot sous-marin est la vidéo. La plupart des véhicules (surtout les

ROV) est déjà équipée d'une ou de plusieurs caméras. Certains phénomènes compliquent cependant l'utilisation de la vision sous la mer par rapport à une utilisation terrestre. En premier lieu, l'indice de réfraction de l'eau ($n = 1,34$ dans la mer et $n = 1,33$ dans l'eau douce) est différent de celui de l'air ($n = 1$). Il varie légèrement avec la salinité et très légèrement avec la pression. Il est donc nécessaire d'être vigilant dans le choix de la nature et de la forme du hublot, surtout si l'on a besoin de calibrer la caméra. Tout d'abord, choisir un matériau dont l'indice de réfraction est le même que celui de l'eau rendra les éventuelles rayures invisibles pour la caméra. Ensuite, la configuration idéale consiste à utiliser un hublot hémisphérique au centre duquel on placera le foyer de la caméra. Les rayons lumineux parvenant à la caméra traverseront donc tous quasi perpendiculairement la surface du hublot et, ainsi, ne seront pas diffractés (loi de Descartes). Le premier avantage est la non-modification de la focale de la caméra et donc un angle d'ouverture identique dans l'eau et dans l'air. Le deuxième avantage réside dans le fait qu'il n'est pas nécessaire de recalibrer la caméra lorsque l'indice change (par exemple en fonction de la salinité). L'intérêt de ce type de hublot diminue cependant lorsque l'on utilise une caméra à focale variable car alors le foyer n'est pas toujours au centre de l'hémisphère formé par le hublot.

Certains ROV sont équipés d'une caméra inclinable placée dans un tube transparent. Dans ce cas, du fait de la réfraction, on observe sur l'image un phénomène d'anamorphose (par exemple l'image est contractée d'un tiers horizontalement et non contractée verticalement). Ainsi, l'image d'un cercle deviendra une ellipse. On rencontre enfin souvent des hublots plans. Comme pour un masque de plongée, la réfraction produit un allongement de la focale dans les proportions de la variation d'indice et donc le champ de vision de la caméra est réduit d'un tiers et les objets paraissent plus gros mais non déformés. Dans ce cas, le calibrage de la caméra dépendra de l'indice, donc de la salinité.

On note l'existence de hublots équipés de lentilles asphériques (voir optiques Thalacator, société Extrem'Vision dans l'annuaire [Doc. S 7 783]) présentant des qualités optiques proches de celles d'un dôme hémisphérique.

Un autre point important qui distingue la vision sous-marine de la vision terrestre est l'absorption des couleurs. Le rouge et le jaune sont absorbés très rapidement et il est nécessaire de prévoir un éclairage artificiel au-delà de quelques mètres d'immersion si l'on souhaite percevoir les véritables couleurs (on assiste depuis peu à la généralisation des éclairages à LED pour les robots sous-marins). La diffusion joue, elle aussi, un rôle important car elle diminue fortement la visibilité, ce phénomène étant renforcé si l'éclairage artificiel a sa source trop près de la caméra. On veillera donc à écarter le plus possible les projecteurs de l'axe de la caméra afin de limiter la rétrodiffusion de la lumière par les particules en suspension. L'intensité lumineuse décroissant exponentiellement avec la profondeur, la plupart des opérations au-delà de 100 mètres se font dans la pénombre ou dans l'obscurité. On est alors confronté à des problèmes d'ombres et de non-uniformité d'illumination qui limitent l'applicabilité directe des méthodes de reconstruction des scènes à partir d'un flux vidéo (*mosaicing*). Pour cela, il est nécessaire d'appliquer préalablement des traitements particuliers (normalisation par exemple), tels que ceux décrits dans [8].

Depuis 2012, on trouve des systèmes sous-marins commerciaux associant une caméra et un faisceau laser, permettant une reconstruction tridimensionnelle de l'environnement, même en eau assez turbide.

Les caméras vidéo trouvent néanmoins leurs limites en eau complètement turbide. Il est alors indispensable d'utiliser un système de perception acoustique.

2.2.2 Perception acoustique

Dans ce paragraphe, nous donnons un aperçu des principales catégories de capteurs acoustiques et du type de données qu'il est

convenu d'en attendre. Le lecteur intéressé pourra consulter la référence [9] qui constitue une excellente introduction, ainsi que la référence [10] qui présente l'ensemble des concepts de ce domaine clairement et de façon très détaillée.

■ Sondeur

Le **sondeur (echosounder)** est le plus ancien système de mesure acoustique, mais il est toujours largement utilisé. Son fonctionnement est simple. Il consiste à utiliser un transducteur électro-acoustique (piézo-électrique) pour émettre un *ping* (il peut s'agir d'une impulsion ou d'un train d'ondes éventuellement modulé en fréquence) en direction du fond. L'onde acoustique est rétrodiffusée par le fond (elle est renvoyée en direction de la source) et, par mesure du temps de vol (trajet aller-retour du son), on calcule la distance entre le transducteur et le fond. L'analyse du signal reçu permet en outre souvent d'estimer la nature du fond (sable, vase, roche, etc.) et de détecter des objets (poissons) dans la colonne d'eau.

Les hautes fréquences permettent de détecter des petits objets, mais sont plus vite atténuées que les basses fréquences (préférées donc pour les longues portées).

■ Sondeur multi-faisceau

Le **sondeur multifaisceau (multibeam echosounder ou swath echosounder)** est utilisé lui aussi pour déterminer la distance et la nature du fond. Il est donc employé principalement par les hydrographes pour effectuer des relevés bathymétriques, le plus souvent placé sous la coque d'un navire ou à bord d'un AUV. Le principe de fonctionnement est simple, il repose sur l'utilisation de deux antennes distinctes. L'antenne émettrice émet un faisceau acoustique très large transversalement et très étroit longitudinalement (en jaune sur la figure 10). L'antenne réceptrice, quant à elle, permet par formation électronique de voies [10] de séparer les diverses contributions de l'écho en fonction de leur direction de provenance, grâce à de nombreux faisceaux larges longitudinalement et étroits transversalement (figure 10). Il en résulte la mesure

simultanée de la profondeur et de la nature du fond d'une multitude de points transversalement à l'axe du véhicule porteur. Afin de pouvoir géo-référencer précisément ces points, il est nécessaire de disposer d'une centrale inertielle dont la position relative par rapport au sondeur est parfaitement connue (mesure par un géomètre). De plus, l'exploitation des mesures n'a de sens que si le système acoustique a été soigneusement calibré, ce qui constitue une tâche difficile.

■ Sonars à balayage et sonars multifaisceaux

Il existe plusieurs catégories de sonars. La première catégorie est celle des **sonars à balayage monofaisceau (single-beam scanning sonar)**. Dans cette catégorie, on distingue les **sonars de profilage (profiling sonar)**, dont le faisceau est un cône très étroit (*pencil shaped beam*) et les **sonars d'imagerie (imaging sonar)**, dont le faisceau a la forme d'un pinceau étroit horizontalement (de l'ordre de 1° à 3°) et large verticalement (de l'ordre de 20° à 45°) (*fan shaped beam*) (figure 11). Le *profiling sonar* permet donc d'avoir précisément les distances des cibles mesurées le long de l'axe de visée, ce que ne permet pas l'*imaging sonar* qui est ambigu en angle (figure 12). La résolution d'un sonar est la capacité à pouvoir séparer des cibles proches. Elle est liée à la durée du signal émis et à la largeur du faisceau. Plus le pinceau ou le cône est étroit (horizontalement), meilleure est la résolution. Un système mécanique fait tourner le faisceau, collectant ainsi une mesure par *ping*, d'où l'appellation, rencontrée également, de sonar à balayage mécanique (*mechanical scanning sonar*). La prise de mesures sur un secteur angulaire ou sur un tour d'horizon de 360° peut donc demander plusieurs secondes, ce qui nécessite de connaître et de compenser les mouvements du véhicule sous peine d'obtenir des images déformées ou mal localisées. Cette durée dépend évidemment de l'échantillonnage souhaité et de la portée. Les fréquences acoustiques utilisées sont comprises le plus souvent entre 300 kHz et 2 MHz pour une portée dépassant rarement les 300 mètres.

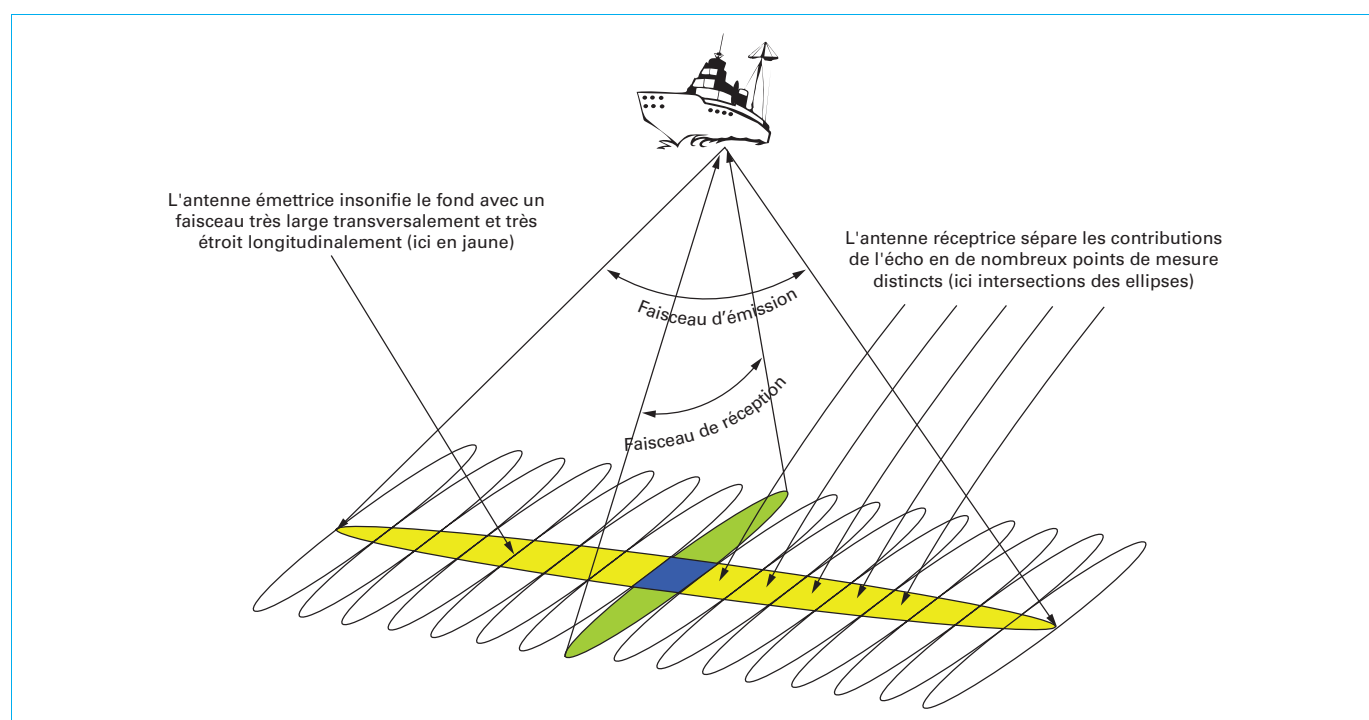


Figure 10 – Les faisceaux d'émission et de réception d'un sondeur multifaisceau

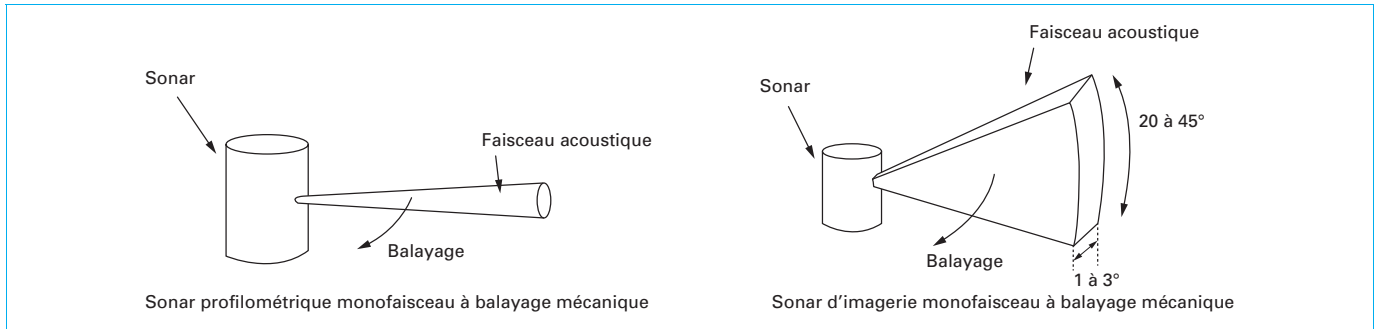


Figure 11 – Forme du faisceau acoustique émis par un sonar monofaisceau de profilage (à gauche) et d'imagerie (à droite)

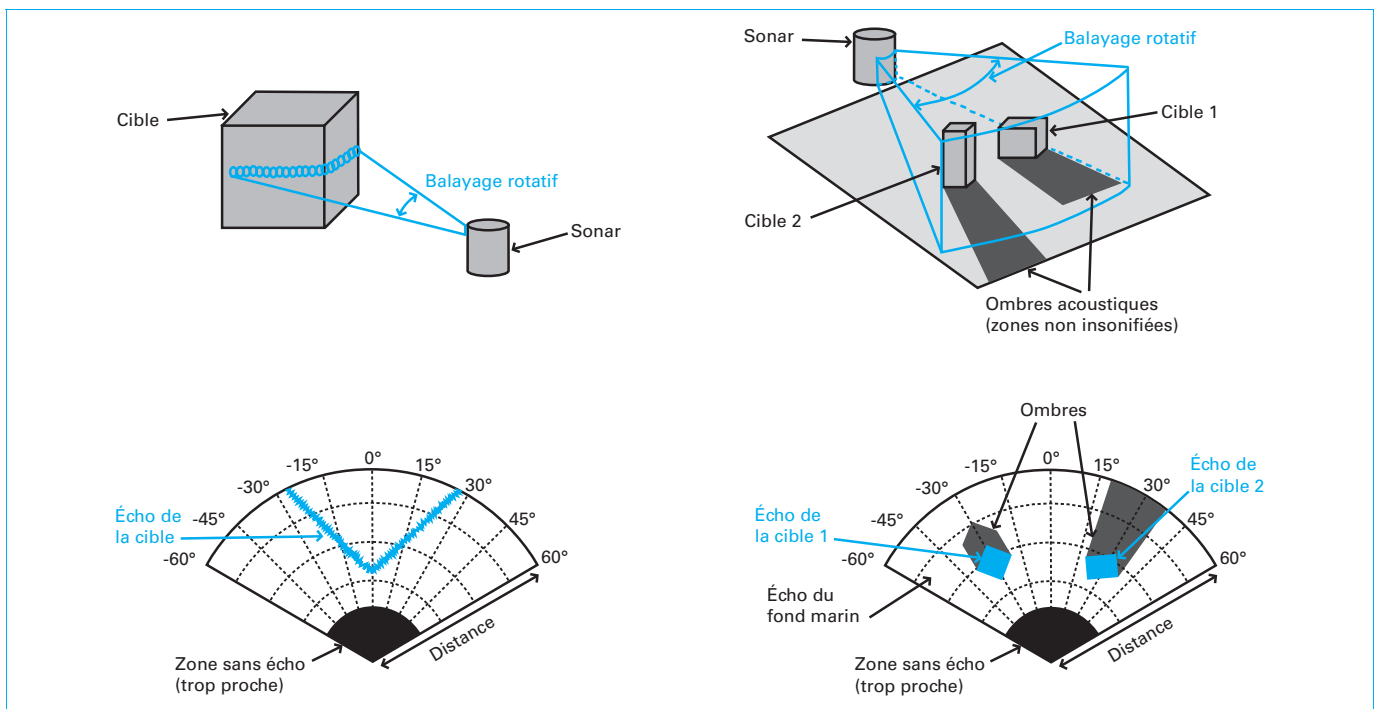


Figure 12 – Exemple d'acquisitions par un sonar à balayage monofaisceau de profilage (à gauche) et d'imagerie (à droite). En haut, on visualise la façon dont le faisceau balaie l'environnement. En bas, on visualise l'allure de l'image sonar correspondante

La seconde catégorie de sonars est celle des **sonars multifaisceaux** (*multibeam sonars*), dont la tête acoustique est une matrice de transducteurs émettant simultanément, ce qui permet de couvrir une large zone plus rapidement que les systèmes monofaisceaux. Là encore, on distingue les sonars de profilage (*multibeam profiling sonar*) dont les faisceaux sont des cônes très étroits (1° d'ouverture environ), et les sonars d'imagerie (selon les fabricants : *multibeam imaging sonar*, ou *2D imaging sonar*, ou encore *acoustic camera*, bien que les contours de cette dernière appellation commerciale soient assez flous), dont les faisceaux ont une ouverture angulaire verticale souvent voisine de 15° ou 20° (figure 13). Le nombre de faisceaux atteint fréquemment 256, voire 512 ou plus, ce qui permet d'obtenir un échantillonnage angulaire horizontal inférieur à 1° (avec un champ de vision horizontal total compris entre 45° et 130°). Plus le nombre de faisceaux est élevé, plus l'échantillonnage spatial est resserré, ce qui a pour conséquence d'obtenir une image plus lissée et plus continue. La précision de la

mesure de distance est de l'ordre du centimètre. L'image obtenue est un secteur dans lequel les échos sont représentés uniquement en fonction de leur distance et de leur azimut. L'intensité des pixels représente l'intensité des échos reçus et fournit donc une indication sur la nature et l'orientation des surfaces impactées. L'interprétation des images (figure 14) demande donc une certaine habitude et l'on exploite les ombres pour deviner le relief des zones observées. Pour que l'image soit exploitable au mieux, le faisceau doit insonifier en biais la zone à observer, ce qui explique que beaucoup des systèmes dédiés aux véhicules sous-marins aient une tête acoustique pré-inclinée.

Si les sonars monofaisceaux sont suffisamment petits et légers pour être emportés à bord d'un mini-ROV (par exemple, le sonar Micron de Tritech, un cylindre de diamètre 50 mm et de hauteur 79 mm, ne pèse que 324 g), les sonars multifaisceaux sont plus encombrants (un sonar BlueView M900-45 pèse 2,2 kg et mesure 10 cm de diamètre pour 20 cm de hauteur).

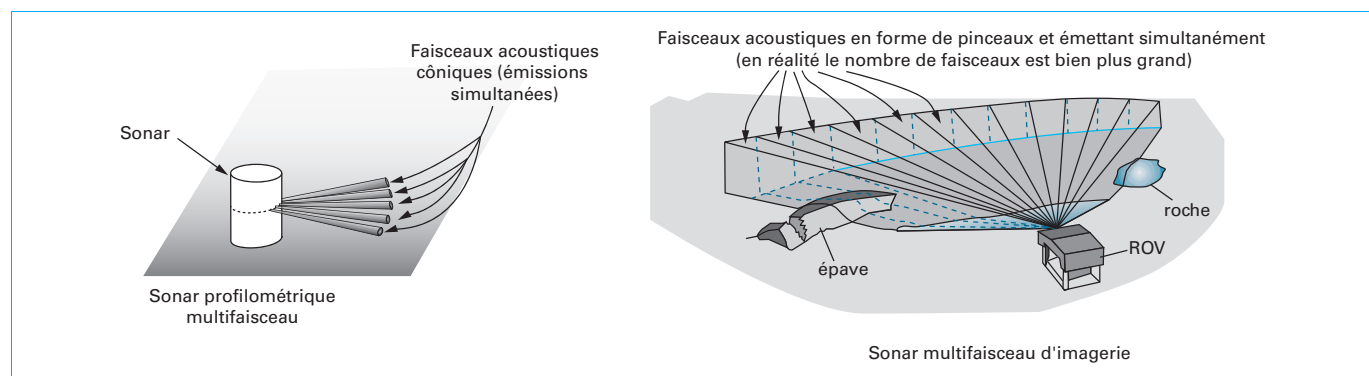


Figure 13 – Forme des faisceaux acoustiques émis par un sonar multifaisceau de profilage (à gauche) et d'imagerie (à droite)

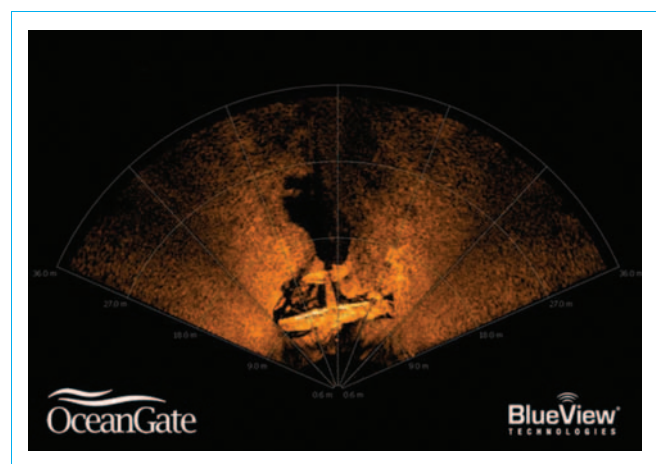


Figure 14 – Exemple d'image acoustique d'une épave d'avion gisant sur un fond sédimentaire, obtenue par une caméra acoustique BlueView M900 (crédit : OceanGate / Teledyne BlueView)

L'avantage des systèmes multifaisceaux par rapport aux systèmes monofaisceaux est leur rapidité d'acquisition (couramment comprise entre 10 et 20 images par secondes) et donc la possibilité de mieux analyser les cibles en mouvement relatif par rapport au sonar [11] (sur un sonar monofaisceau, une cible mobile apparaît floue ou déformée et une cible fixe peut aussi apparaître floue ou déformée si le véhicule porteur se déplace). Le sonar fonctionne aussi bien en eau claire que lorsque la visibilité est nulle, ce qui en fait un complément indispensable de la vidéo. Les prix de ces équipements sont compris entre 5 k€ et plus de 100 k€.

Il existe de nombreuses déclinaisons de ces types de systèmes (systèmes à plusieurs fréquences, faisceaux croisés, scan 3D par balayage mécanique de systèmes multifaisceaux montés sur des bases pivotantes, etc.). Le choix de la fréquence du sonar doit être fait en fonction de l'application. Une fréquence basse augmentera la portée, tandis qu'une haute fréquence permettra de percevoir des détails plus fins (au détriment de la portée). L'installation du sonar à bord d'un véhicule de surface doit se faire en inclinant suffisamment le sonar pour que la partie supérieure du faisceau ne soit pas réfléchi par la surface.

■ Sonar latéral

Le sonar latéral (*side-scan sonar*) est un dispositif remorqué assez près du fond (poisson) ou fixé sur les flancs inférieurs d'un

AUV. Comme le sondeur multifaisceau, il n'a de sens que si le porteur se déplace, de préférence à attitude, profondeur et cap constants. On l'utilise pour obtenir une image du fond marin sur de larges zones de part et d'autre du véhicule tracteur, principalement pour rechercher et identifier des objets posés sur le fond (épaves, mines, pipelines, etc.).

Le sonar latéral émet un faisceau acoustique en forme de pinceau de chaque côté de l'AUV perpendiculairement à sa direction d'avancement (figure 17). La largeur (en fait, l'ouverture de faisceau) dite « horizontale » des deux faisceaux (selon la direction d'avancement) est inférieure à $0,5^\circ$ et la largeur dite « verticale » (perpendiculairement à la direction d'avancement) de chacun des deux faisceaux est voisine de 40° à 50° . Les échos réémis sont reçus et affichés en fonction de leur instant d'arrivée et non de leur direction (ce qui peut rendre délicate l'interprétation des images). Sur l'image obtenue, l'intensité lumineuse dépend de l'intensité acoustique reçue, ce qui fournit une information sur la nature de la cible. Les images de structures créées par l'homme sont évocatrices et leurs formes familières en facilitent l'interprétation (figure 18). A contrario, les images de structures naturelles sont plus difficiles à interpréter.

L'ombre des objets (derrière un objet, le son ne parvient pas) peut donner une information sur leur forme. En effet, l'ombre dépend de leur hauteur, mais aussi de leur distance et de la hauteur du sonar par rapport au fond.

À mesure que le sonar avance, chaque échantillon acoustique (chaque *ping*) constitue une ligne de l'image sonar finale de la zone explorée. Il est donc important que le sonar se déplace à vitesse et attitude constantes sous peine de voir l'image se distordre ou devenir floue (lignes irrégulièrement espacées, qui se croisent, ou se recouvrent). Désormais, certains sonars latéraux intègrent des compensations de mouvement afin de limiter les flous et les distorsions (par exemple, le L3-Klein 5900). De nombreux modèles combinent également le sonar latéral avec d'autres systèmes acoustiques (*gap filler sonar*, *sub-bottom profiler*, etc.) permettant de compléter ou de mieux interpréter l'image.

Sous tous les sonars latéraux, il existe une zone qui ne peut pas être visualisée (*nadir gap*). Pour obtenir une couverture complète de la zone, il est possible d'adjoindre au sonar latéral un sonar dit « *gap filler* », orienté légèrement vers l'avant et qui insonifie la zone aveugle.

La portée d'un sonar latéral est de l'ordre de la centaine de mètres de part et d'autre du sonar, pouvant atteindre 200 à 300 mètres. Elle est de l'ordre de 10 fois la hauteur d'eau sous le sonar et dépend de la fréquence utilisée (plus la fréquence est élevée, plus la résolution est fine et plus la portée est faible). Les fréquences utilisées sont de l'ordre de la centaine de kHz (typiquement 500 kHz), mais peuvent dépasser 1,5 MHz. La précision est comprise entre 5 cm et quelques dizaines de centimètres, selon la portée et la fréquence.

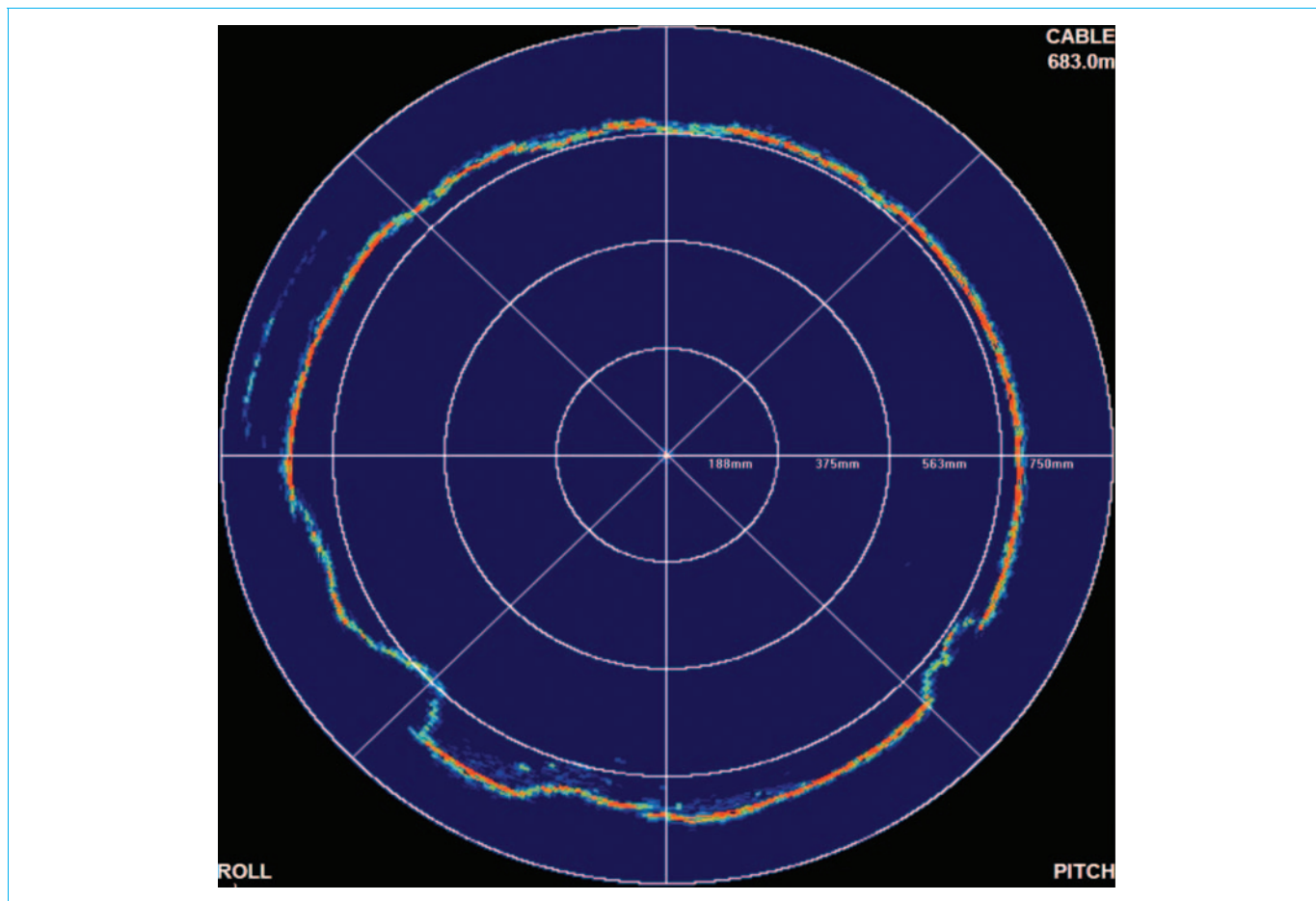


Figure 15 – Exemple d'image acoustique obtenue par un sonar monofaisceau profilométrique à balayage Mini Pipe Profiling Sonar – 2512 USB, de Marine Electronics Ltd. Il s'agit de l'intérieur d'une canalisation en béton de 1,2 m de diamètre. On observe des dépôts graisseux à 8 heures et 4 heures et des dépôts de vase et gravier en bas (crédits : Marine Electronics Ltd)

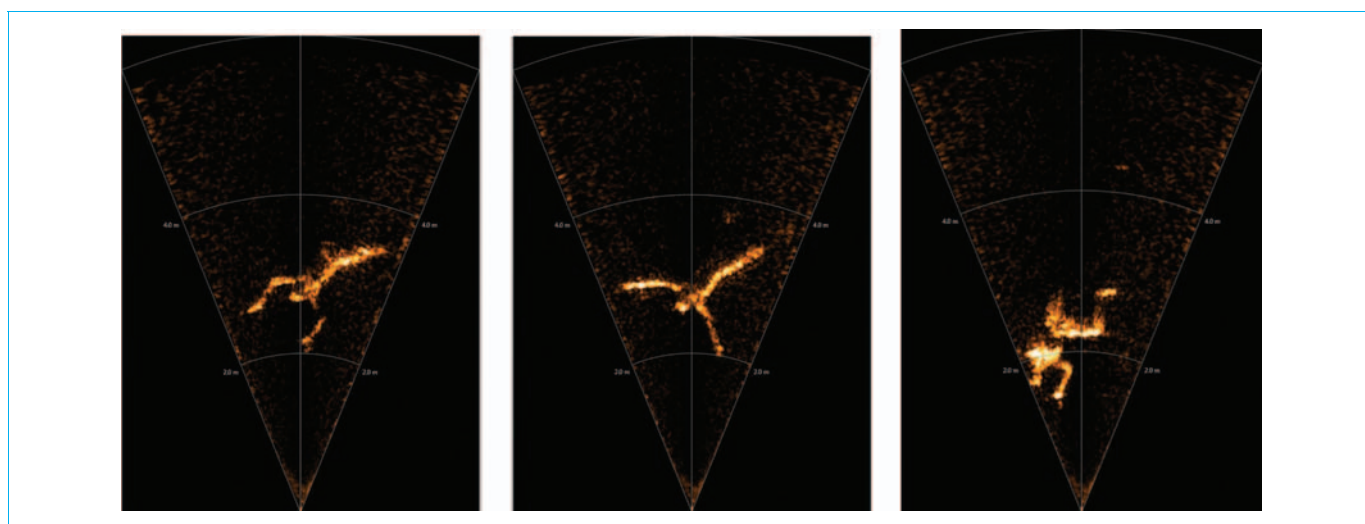


Figure 16 – Exemple d'une séquence d'images prises en bassin par un sonar multifaisceau BlueView P450-45. On distingue nettement un homme qui nage (crédit : Teledyne BlueView)

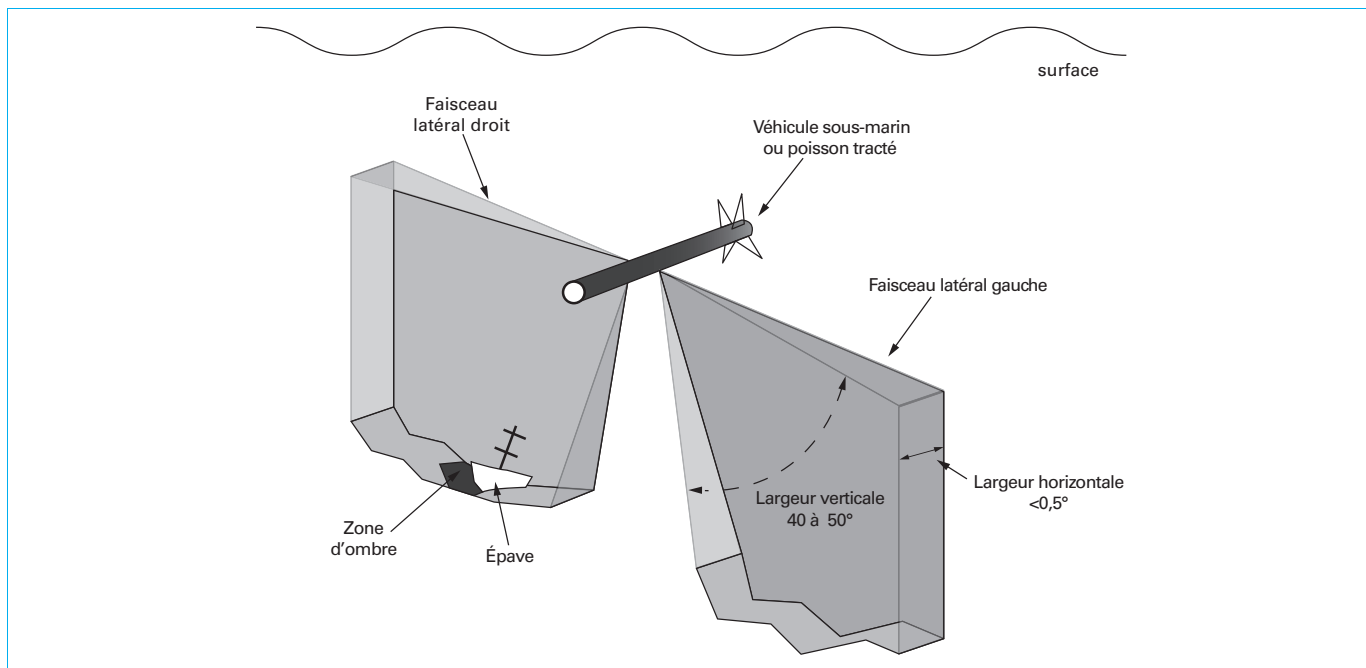


Figure 17 – Principe d'acquisition d'un sonar latéral

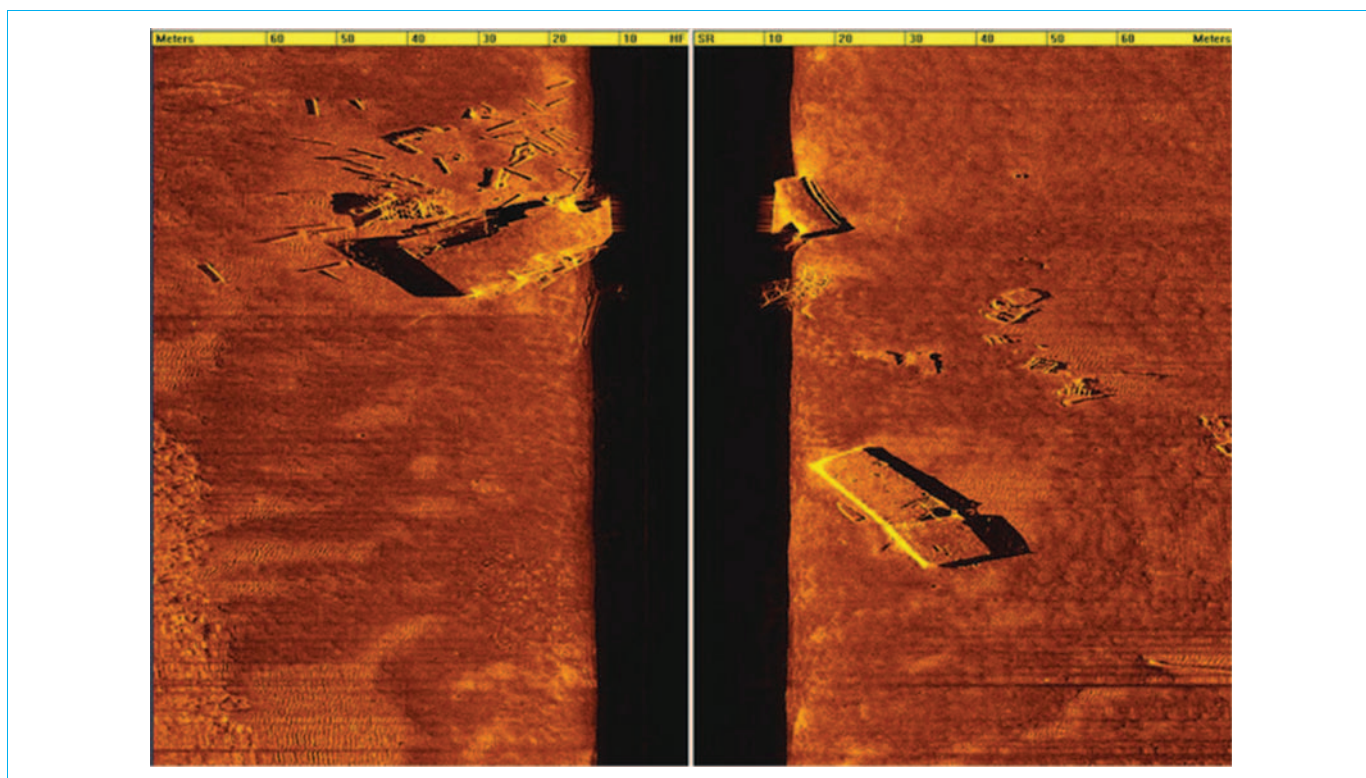


Figure 18 – Exemple d'acquisition par sonar latéral (4200 : Multi-Purpose Survey System de EdgeTech). On distingue une bande noire au centre séparant les images issues des deux faisceaux latéraux. Cette bande correspond au parcours du son en pleine eau (donc sans écho) avant que le premier écho du fond n'apparaisse. On observe une épave et des débris. Les ombres informent sur la hauteur des débris (crédit : Image courtesy of EdgeTech)

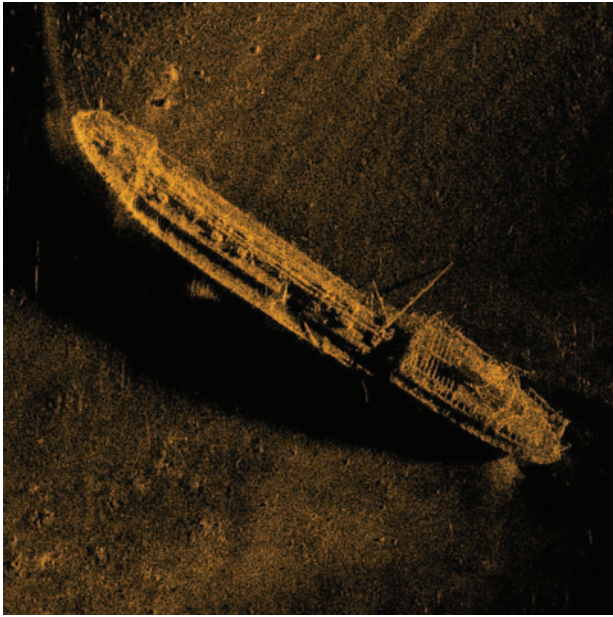


Figure 19 – Image acquise par sonar à ouverture synthétique HISAS 1030 embarqué à bord de l'AUV HUGIN 1000. La longueur de l'épave est de 68 m (pétrolier Holmengraa reposant par 77 m de fond) (crédit : Kongsberg Maritime)

■ Sonar à ouverture synthétique

Également appelé SAS (*Synthetic Aperture Sonar*), il s'agit d'un sonar couplé à une centrale inertielle. Il combine plusieurs *pings* émis d'endroits différents et fusionne les résultats pour obtenir une image dont la résolution est typiquement 10 fois supérieure à celle des systèmes traditionnels car il crée virtuellement une antenne plus grande (figure 19). Ces dispositifs sont tractés (Shadows de IxBlue) ou embarqués à bord d'AUV (HISAS 1030 de Kongsberg à bord de l'AUV Hugin).

Outre leur meilleure résolution, ces systèmes permettent d'éviter les décalages au nadir et offrent une résolution d'image constante, sans distorsion. En revanche, la vitesse de déplacement de ce type de capteurs est limitée (dégradation de la portée). La résolution, ainsi que la possibilité d'avoir une vision d'un même objet sous divers angles, font du SAS un outil particulièrement adapté à la détection et à l'identification des mines.

2.2.3 Sens électrique (électrolocation)

L'électrolocation est inspirée du mode de perception de certains poissons électriques, tels le *gnathonemus petersii*. Elle repose sur l'utilisation de plusieurs électrodes situées le long du corps d'un engin sous-marin (figure 20), permettant de créer un champ électrique autour de celui-ci et d'en mesurer les perturbations par son environnement. Ces dernières permettent de détecter et de localiser des objets (ou des obstacles) conducteurs (vivants) ou non. Cette méthode est applicable aussi bien dans l'eau douce que dans l'eau salée, indépendamment de la turbidité. La portée du système est de l'ordre de la distance entre les électrodes produisant le champ. Pour l'instant, il n'existe pas de système commercial exploitant l'électrolocation et le lecteur intéressé pourra se référer aux travaux fondateurs de F. Boyer et au projet ANGELS déjà mentionné [3] [4] [5].

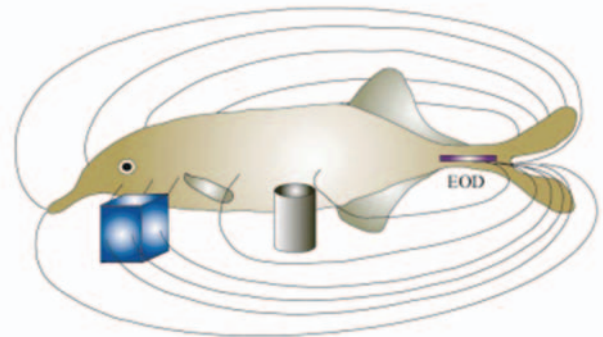
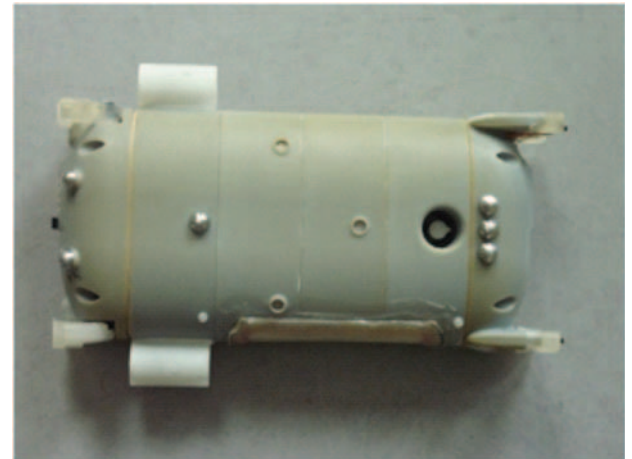


Figure 20 – Sur le module du prototype Angels représenté en haut, on distingue, sur le flanc du véhicule, les électrodes utilisées pour l'électrolocation (crédit : École des mines de Nantes – IRCCyN & Scuola Superiore Santa Anna – CRIM Lab). **En bas, on visualise le champ électrique créé par le poisson *gnathonemus petersii*. Les lignes de champ sont perturbées par les obstacles conducteurs ou non** (crédit : École des mines de Nantes – IRCCyN). **Le prototype Angels reproduit ce mode de perception**

2.3 Communications sous-marines

Comme pour la localisation, la non-pénétration des ondes électromagnétiques dans l'eau complique les communications entre véhicules sous-marins ou encore entre un véhicule sous-marin et la surface. Plusieurs solutions technologiques existent cependant. Elles sont choisies essentiellement en fonction du débit désiré et de la portée.

2.3.1 Communications acoustiques

Les communications acoustiques entre un navire et un véhicule sous-marin ou entre deux véhicules sous-marins sont effectuées au moyen de modems acoustiques. Les phénomènes de réflexion, dispersion, réflexion, absorption et diffraction, sont autant d'obstacles à la bonne propagation du son. Ils sont à l'origine de chemins courbes, de multi-trajets, d'atténuations, etc. De ce fait, le débit des communications acoustiques est très limité et fortement lié à la portée et à la directivité souhaitée. Ainsi, les produits commerciaux actuels ne permettent pas de dépasser des débits de l'ordre de la trentaine de kilobits par seconde (38,4 kbps pour les modems LinkQuest High Speed et 31,2 kbps pour les modems EvoLogics) pour des portées inférieures à 10 km. On notera que ces valeurs maximales ne peuvent être atteintes simultanément.

En limite de portée, les débits sont donc souvent moindres. Des travaux de recherche ont permis d'atteindre des débits supérieurs dans des conditions d'utilisation particulières (par exemple transmission verticale en eaux profondes), mais ces dispositifs ne sont pas commercialisés.

2.3.2 Communications par ombilical

■ Câble électrique

Il existe une grande variété de câbles sous-marins. La plupart du temps, ce sont des câbles constitués de plusieurs conducteurs de puissance de forte section, de paires torsadées pour la transmission des données numériques ou vidéo, et/ou de câbles coaxiaux (essentiellement pour la vidéo). Le câble est « plein » pour ne pas être déformé par la pression. Il est également souvent armé pour résister aux agressions mécaniques extérieures et renforcé pour résister aux efforts de traction. On trouve sans problème des câbles prévus pour être utilisés à plusieurs milliers de mètres d'immersion et pour pouvoir tracter plusieurs tonnes.

Plusieurs contraintes sont tout de même à considérer dans le choix d'un câble. Outre sa résistance mécanique, on sera attentif à son poids dans l'eau (pour ne pas perturber le fonctionnement du véhicule s'il se déplace en « *free-swimming* ») et surtout à la résistance électrique des conducteurs destinés à la puissance électrique. En effet, même sur des faibles longueurs (100 m) la chute de tension peut atteindre plusieurs volts, voire plusieurs dizaines de volts si le câble est mal dimensionné. En outre, la résistance électrique du câble entraînera une dissipation de chaleur par effet Joule. Cette dernière est sans conséquence dans l'eau, mais peut se révéler problématique (surchauffe) dans le cas où l'essentiel de l'ombilical reste enroulé sur le treuil.

Enfin, un dernier point à considérer est le type des liaisons utilisées pour transporter les données. Si l'on peut espérer transporter de la vidéo analogique et des données (liaison série RS422/485 par exemple) sur plusieurs centaines de mètres, il est très difficile de transporter de la vidéo haute-définition ou de l'Ethernet à haut-débit au-delà de 100 mètres. On a alors obligatoirement recours à des câbles hybrides cuivre + fibre optique.

■ Fibre optique (monomode, multimode, débits, etc.)

Il existe deux familles de fibres (multimode et monomode) et plusieurs qualités (OM1 à 4 pour les multimodes, OS1 et OS2 pour les monomodes). La portée dépend du débit désiré, du protocole et bien sûr du type et de la qualité de fibre choisie. Ainsi par exemple, avec le protocole 100BaseFX, à 100 Mb/s, une fibre multimode pourra transporter les données sur 5 km, tandis qu'une fibre monomode permettra de dépasser 20 km. Avec le protocole 1000BaseLX, à 1 Gb/s, on atteindra 500 mètres environ en multimode et 5 km en monomode. Les prix des câbles hybrides (cuivre + fibre optique) sont comparables à ceux des câbles électriques. En revanche, les connecteurs étanches hybrides (comme l'OptoLink de MacArtney, ou Optical Hybrid de Seacon) sont beaucoup plus coûteux que les connecteurs pour cuivre seul. Il est également nécessaire d'équiper le véhicule et le navire de surface de convertisseurs de médias entre fibre et cuivre, équipés du module émetteur-récepteur SFP (*Small Form-factor Pluggable*) adapté à la fibre utilisée. Pour optimiser l'utilisation de la bande passante du canal optique, les convertisseurs peuvent être remplacés par des multiplexeurs optiques, ce qui permet de combiner sur une seule fibre plusieurs types de données (vidéo, données série, Ethernet, bus IEEE1394, etc.). Le prix d'un multiplexeur (tel que le Series Focal Multiplexer de Moog) est de l'ordre de 8 à 10 k€. Il est évidemment illusoire d'utiliser un multiplexeur pour transporter plus de données que la fibre ne peut supporter et il peut être préférable de multiplier les fibres, par exemple pour transporter simultanément plusieurs vidéos numériques en haute-définition. Le choix du type de fibre et des équipements associés est très lié à l'application et demeure l'affaire d'un spécialiste.

Pour aller bien au-delà de l'application aux engins sous-marins, le lecteur intéressé pourra se reporter à [E 7 105].

2.3.3 Autres modes de communication

Pour des communications en champ proche (quelques dizaines de mètres, voire moins d'un mètre), on a récemment vu apparaître des dispositifs de communication optique commercialisés ou en voie de commercialisation (Lamparo de Subsea Tech, AQUAmodem Op1 d'Aquatec). Cette technologie naissante devrait atteindre sa maturité dans les années qui viennent. Elle repose sur l'utilisation de faisceaux lumineux directionnels modulés. Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI) et le Massachusetts Institute of Technology (MIT) s'illustrent notamment par leurs travaux de recherche dans ce domaine [7].

3. Modélisation des véhicules

3.1 Cinématique

Il existe diverses représentations des véhicules marins. Nous ne présenterons ici que la plus commune, celle définie en 1950 par la SNAME (*Society of Naval Architects and Marine Engineers*). Pour connaître tous les détails sur cette représentation, le lecteur se reportera à [13].

3.1.1 Repères de référence

Il existe deux repères (figure 21) :

- Le repère fixe, attaché à la Terre (*Earth Fixed Frame*). La position de l'origine O du repère ainsi que l'orientation des axes x et y peuvent varier car il existe plusieurs conventions : ECI (*Earth-Centered Inertial frame*), ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed frame*) ou encore NED (*North East Down*). Dans ce qui suit, nous utiliserons la convention NED, selon laquelle Ox est orienté vers le Nord, et Oy vers l'Est. L'axe Oz de ce repère est orienté vers le bas (perpendiculairement à la surface de la Terre). L'origine O du repère est placée en surface, en un point fixe dans la zone dans laquelle évolue le véhicule. On notera R_n ce repère (l'indice n signifiant NED). On considérera que la zone de navigation est localement plane et que le repère R_n est un repère galiléen. La coordonnée z représente directement la profondeur d'immersion du véhicule.

- Le repère mobile attaché au véhicule et noté R_b (l'indice b signifiant *Body fixed frame*). Le centre O de ce repère est placé soit au centre de gravité du véhicule, soit en son centre de volume. Les axes Ox , Oy et Oz sont alignés avec les principaux axes de symétrie de la coque. L'axe Ox (longitudinal) pointe vers l'avant du véhicule, l'axe y (transversal) est orienté vers tribord (vers la droite du véhicule lorsqu'on regarde vers l'avant) et l'axe z (normal) est orienté vers le bas.

On note $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ le vecteur d'état représentant la position et l'orientation du véhicule dans le repère terrestre R_n .

Les coordonnées (x, y, z) , exprimées en mètres, représentent la position du centre du repère R_b dans le repère R_n . Les angles φ , θ , ψ , exprimés en radians, sont les angles qui indiquent l'orientation du repère R_b par rapport au repère R_n . Communément appelés angles d'Euler dans la littérature internationale, il s'agit en réalité des angles de Tait-Bryan (ou encore angles de Cardan ou angles nautiques). Ces angles φ , θ , ψ sont nommés respectivement roulis (ou gîte, ou encore rotation propre), tangage (ou assiette, ou encore nutation) et lacet (ou cap, précession, ou encore azimut). On notera qu'occasionnellement, les appellations roulis, tangage et lacet sont utilisées pour désigner des variations des angles nautiques et non les angles eux-mêmes.

Il existe plusieurs conventions pour définir ces angles. La plus répandue est la convention z - y - x pour aller du repère R_n au repère R_b . Cela signifie, par exemple, qu'en partant du repère R_n (en noir

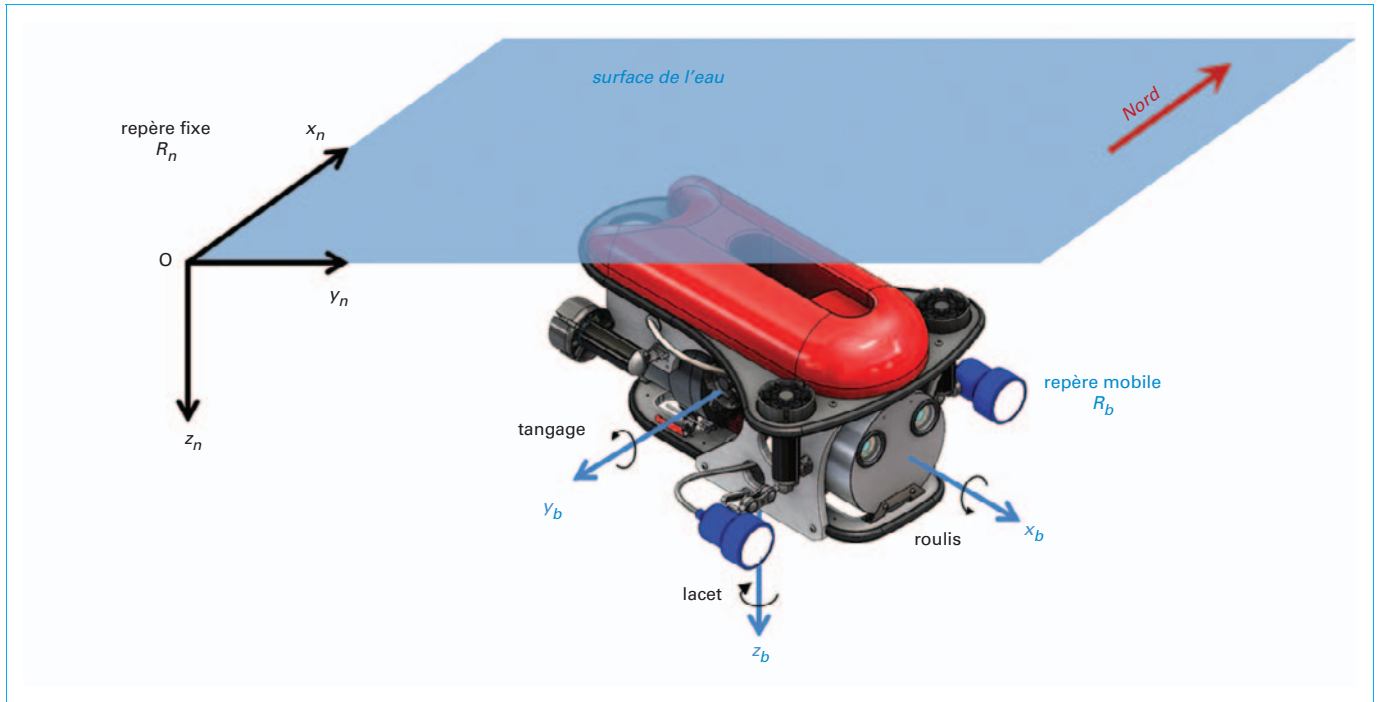


Figure 21 – Le repère fixe R_n (repère **North-East-Down**, attaché à la Terre) et le repère mobile R_b (attaché au véhicule) (crédit : Becom-d)

sur la figure 22), pour obtenir l'orientation du repère R_b , on applique d'abord une rotation ψ en lacet autour de l'axe z_n . Les axes x_n et y_n ont alors une nouvelle orientation dans le plan horizontal (notés x' et y' sur la figure 22a). On effectue ensuite une rotation (tangage) θ autour de l'axe y' nouvellement orienté. L'axe x' est alors de ce fait orienté vers le bas ou le haut et devient x'' sur la figure 22b. On effectue enfin une rotation (roulis) φ autour de l'axe x'' . L'orientation finale du repère correspond à l'orientation du repère R_b (en rouge sur la figure 22c).

On peut exprimer cette transformation du repère R_n vers le repère R_b sous forme matricielle et la matrice de rotation associée est notée R_n^b . Inversement, on peut passer du repère R_b au repère R_n en utilisant la matrice de rotation R_b^n . Ces deux matrices sont reliées par la relation :

$$R_n^b = (R_b^n)^{-1} = (R_b^n)^T \quad (1)$$

Pour la plupart des véhicules marins, les angles nautiques sont parfaitement adaptés. Cependant, si la situation $\theta = \pm \frac{\pi}{2} \text{ rad}$ est susceptible de se produire, afin d'éviter la singularité associée à ces valeurs, il est alors préférable de décrire l'orientation du véhicule au moyen des quaternions. Malgré cela, la méthode des angles nautiques étant plus lisible et permettant une approche plus intuitive de la commande, nous avons choisi cette représentation pour la suite de l'article. Le lecteur intéressé pourra consulter [AF 5 050] pour obtenir davantage de détails sur ces représentations.

On note $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ le vecteur qui rassemble les vitesses linéaires et angulaires dans le repère R_b lié au véhicule.

Les vitesses u, v, w , exprimées en m/s, correspondent aux vitesses selon les axes Ox, Oy et Oz du véhicule et sont appelées respectivement vitesse longitudinale (*surge*), vitesse ou dérive transversale (*sway*) et vitesse de pilonnement (*heave*). Les vitesses de rotation p, q, r , exprimées en rad/s, correspondent aux vitesses de rotation autour des axes Ox, Oy et Oz , c'est-à-dire les vitesses de roulis, tangage et lacet du véhicule respectivement.

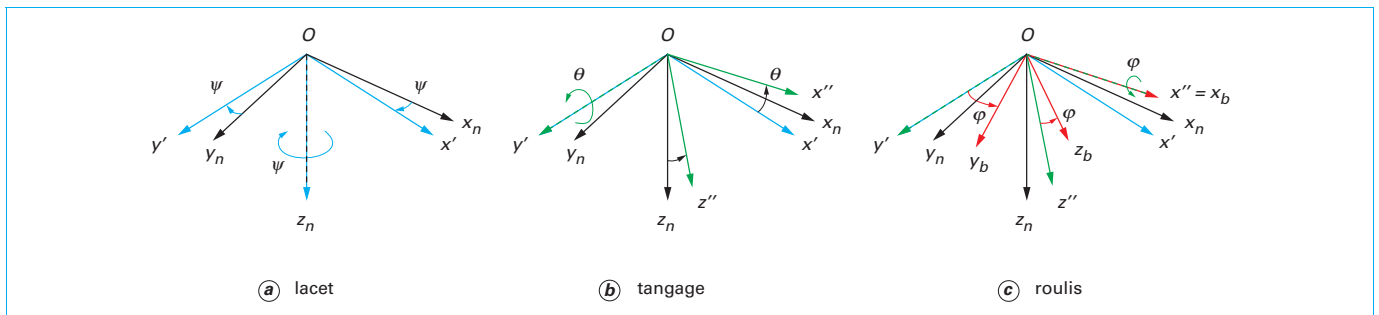


Figure 22 – Les trois transformations successives permettant de passer du repère R_n au repère R_b avec la convention $z-y-x$

3.1.2 Matrice de transformation

La dérivée $\dot{\eta}$ du vecteur d'état η dans le repère R_n peut être calculée à partir des vitesses v exprimées dans le repère R_b en appliquant la relation ci-dessous :

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2)$$

dans laquelle, $J(\eta)$ est une matrice de transformation définie telle que :

$$\dot{\eta} = \begin{bmatrix} R_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathcal{T} \end{bmatrix} v \quad (3)$$

où R_b^n est la matrice de rotation décrite précédemment, permettant de calculer dans le repère R_n les vitesses linéaires $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ à partir des vitesses linéaires u, v, w exprimées dans le repère R_b .

\mathcal{T} est la matrice de transformation permettant de calculer la dérivée $\dot{\phi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$ des angles nautiques à partir des vitesses de rotation angulaires p, q, r .

Ces deux matrices dépendent de l'orientation du véhicule et ont pour expression :

$$R_b^n = \begin{bmatrix} c\psi c\theta & -s\psi c\theta + c\psi s\theta s\phi & s\psi s\theta + c\psi s\theta c\phi \\ s\psi c\theta & c\psi c\theta + s\psi s\theta s\phi & -c\psi s\theta + s\psi s\theta c\phi \\ -s\theta & c\theta s\phi & c\theta c\phi \end{bmatrix} \quad (4)$$

et

$$\mathcal{T} = \begin{bmatrix} 1 & s\phi t\theta & c\phi t\theta \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi/c\theta & c\phi/c\theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

avec ϕ, θ, ψ les angles nautiques précédemment définis et $c. = \cos(.), s. = \sin(.)$ et $t. = \tan(.)$.

3.2 Dynamique

3.2.1 Forces exercées sur le véhicule

De manière générale, on considère que le repère NED est un repère galiléen bien qu'il soit fixe sur la surface de la Terre. En effet, les forces induites sur le véhicule par la rotation de la Terre sont négligeables par rapport aux forces hydrodynamiques.

■ Poids et poussée d'Archimède

La position relative des points d'application et l'amplitude de la force de gravité (poids) et de la poussée hydrostatique (poussée d'Archimède) ont un impact important sur la stabilité du véhicule. Sur les véhicules de surface, l'amplitude de la poussée hydrostatique est évidemment toujours très supérieure à celle du poids et l'on cherche à placer le centre de gravité le plus bas possible par rapport au centre de volume (point d'application de la force hydrostatique). Dans le cas des véhicules sous-marins, afin de minimiser l'énergie nécessaire à leur maintien en immersion, on a tendance à équilibrer le véhicule de sorte que le poids soit égal ou légèrement inférieur à la poussée d'Archimède (ce qui a comme avantage supplémentaire un retour spontané en surface en cas de panne). En outre, sur certains véhicules très manœuvrants, tels que les ROV V8 d'Ocean Modules, le centre de volume et le centre de gravité sont confondus, ce qui a pour conséquence que le véhicule est en équilibre instable permanent et n'a aucune direction de prédilection. Ceci permet une très grande manœuvrabilité, mais nécessite l'utilisation d'un asservissement performant des angles ϕ, θ et ψ . Si l'on note B (pour « Buoyancy », i.e. flottabilité) la norme de la poussée d'Archimède (en N) exercée sur le véhicule, W (pour

« Weight ») la norme du poids du véhicule (en N), (x_g, y_g, z_g) la position du centre de gravité du véhicule exprimée dans le repère R_b lié au véhicule et (x_b, y_b, z_b) la position du centre de volume du véhicule exprimée dans le repère R_b , le vecteur f_g des forces et couples hydrostatiques s'exprime dans le repère R_b de la façon suivante :

$$f_g = \begin{bmatrix} -(W-B)s\theta \\ (W-B)c\theta s\phi \\ (W-B)c\theta c\phi \\ (y_g W - y_b B)c\theta c\phi - (z_g W - z_b B)c\theta s\phi \\ -(x_g W - x_b B)c\theta c\phi - (z_g W - z_b B)s\theta \\ (x_g W - x_b B)c\theta s\phi + (y_g W - y_b B)s\theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

■ Amortissement hydrodynamique

Il existe trois formes d'amortissement. La première, appelée traînée de friction ou de frottement est due au frottements dans la couche limite (« skin friction »). Elle est linéaire aux faibles vitesses/fréquences et devient non linéaire lorsque les mouvements deviennent plus rapides. Elle correspond à une dissipation de l'énergie mécanique sous forme de chaleur. La deuxième est la traînée de forme (due à la viscosité du fluide, qui a pour conséquence une chute de pression entre l'avant et l'arrière du véhicule). Elle devient prépondérante par rapport à la traînée de frottement lorsque la vitesse augmente.

La troisième cause d'amortissement est la traînée induite, engendrée par les tourbillons créés par le véhicule, de façon analogue à ceux observés aux extrémités des ailes des avions.

Enfin, pour les navires de surface, il convient d'ajouter également l'amortissement dû aux vagues subies (« wave drift damping »), c'est-à-dire les vagues qui viennent frapper la coque du bateau mais aussi aux « vagues » créées par le véhicule lorsqu'il se déplace. Ces dernières vagues emportent en effet avec elles une certaine quantité d'énergie, contribuant ainsi à freiner le véhicule.

Il est difficile de dissocier toutes ces contributions et l'on exprime globalement f_h , l'ensemble de ces forces d'amortissement hydrodynamique sous la forme [13] :

$$f_h = -D(v)v = -(D_l + D_n(v))v \quad (7)$$

où $D_l \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est la matrice rassemblant les termes linéaires

d'amortissement, $D_n(v) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est la matrice rassemblant les termes non linéaires d'amortissement et $v = [u, v, w, p, q, r]^T$ est le vecteur des vitesses en translation et rotation, exprimé dans le repère lié au véhicule. Pour beaucoup de véhicules sous-marins, les termes diagonaux de la matrice $D(v)$ sont dominants et l'on néglige souvent les autres termes. Dans certains cas (grande vitesse ou géométrie irrégulière) des couplages apparaissent, faisant par exemple pivoter en tangage le véhicule lorsqu'il avance. C'est alors le signe que les termes non diagonaux ne sont plus négligeables. L'estimation des termes d'amortissement est difficile. Elle peut être réalisée par des outils logiciels de simulation hydrodynamique, ou encore plus précisément, par des essais en bassin instrumenté. Quoi qu'il en soit, la position du point d'application des forces d'amortissement hydrodynamique est très difficile à déterminer avec précision et, qui plus est, varie avec la vitesse de déplacement. Une approximation correcte utilisée fréquemment, consiste à considérer que la matrice $D(v)$ est diagonale. Ainsi, on a :

$$D_l = \begin{bmatrix} D_u & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_v & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_w & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_q & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_r \end{bmatrix} \quad (8)$$

où les D_i sont des coefficients constants, et :

$$\mathbf{D}_n = \begin{bmatrix} D_{nu}|u| & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{nv}|v| & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{nw}|w| & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{np}|p| & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{nq}|q| & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{nr}|r| \end{bmatrix} \quad (9)$$

où les D_{ni} sont des coefficients constants et où les termes en $| \cdot |$ sont les valeurs absolues des termes de vitesse linéaire et de rotation. Cela permet, lorsque l'on calcule $\mathbf{f}_h = -\mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}$, de retrouver le terme quadratique d'amortissement visqueux opposé au sens de déplacement du véhicule par rapport au fluide.

Une solution pour se dispenser de la connaissance précise des termes d'amortissement est d'utiliser une loi de commande robuste, ou une loi de commande adaptative qui estimera, ajustera ou compensera automatiquement les paramètres inconnus (§ 4).

■ Force d'inertie de Coriolis et force d'inertie d'entraînement

L'équation de la dynamique étant exprimée dans le repère mobile lié au véhicule (donc dans un référentiel non galiléen), il est nécessaire de tenir compte des forces d'inertie lors de l'application du principe fondamental de la dynamique. Il convient donc d'ajouter aux forces appliquées, la force d'inertie d'entraînement et la force d'inertie de Coriolis. L'expression de ces deux forces est assez complexe et le lecteur concerné se reportera au chapitre 3 de la référence [13].

L'effet \mathbf{f}_c de ces deux forces est représenté par le produit matriciel $\mathbf{f}_c = -\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v}$ dans l'équation de la dynamique du véhicule. La matrice $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v}) \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$, appelée « *Coriolis-centripetal matrix* », inclut en plus de la masse propre du véhicule, les effets d'entraînement et de Coriolis des masses ajoutées.

Les vitesses de déplacement et de rotation étant souvent faibles pour les véhicules marins (*a fortiori* pour les ROV), cette force est fréquemment négligée.

■ Masses ajoutées

Les masses ajoutées sont souvent interprétées à tort comme une quantité finie d'eau qui entourerait le véhicule et qui serait entraînée par ce dernier. En réalité, ce sont des masses virtuelles permettant de représenter certains effets hydrodynamiques de l'eau sur le corps du véhicule. L'accélération du véhicule dans l'eau a pour effet de créer des pressions induisant des forces et des couples sur le véhicule. Les masses ajoutées sont un moyen de les modéliser. De même que pour les effets hydrodynamiques, il est difficile de calculer la valeur numérique des masses ajoutées. On introduit habituellement les effets des masses ajoutées dans la matrice d'inertie \mathbf{M} et dans la matrice $\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})$.

■ Effets des actionneurs

Il existe plusieurs sortes d'actionneurs. Il peut s'agir notamment de voiles, d'hélices, d'hydrojets (pompes propulsant de l'eau), de surfaces orientables (safran, barres de plongée), de propulseurs magnétohydrodynamiques (on met l'eau en mouvement en faisant circuler un courant électrique dans l'eau salée en présence d'un fort champ magnétique), etc. Lorsqu'il s'agit de voiles ou de gouvernes, les forces dépendent de nombreux paramètres, dont l'angle d'orientation de l'actionneur par rapport à la direction d'écoulement du fluide, à sa densité et sa vitesse apparente d'écoulement, les dimensions de l'actionneur, etc. [14].

Dans ce qui suit, nous nous limiterons à l'étude des propulseurs (*thrusters*) à hélice, solution la plus fréquente pour les véhicules sous-marins. Le fonctionnement électromécanique des moteurs électriques est supposé connu et l'on considérera que les propulseurs sont commandés directement en vitesse de rotation. Le lecteur intéressé par le fonctionnement des moteurs électriques en trouvera une

présentation détaillée dans [15] [D 5 341] [D 5 342]. Des compléments d'information sur la propulsion des navires électriques pourront être trouvés dans les références [D 5 610] [D 5 615] [D 5 620].

• Propulseurs

La poussée f_p et le couple Γ_p exercés par un propulseur dépendent de nombreux paramètres. Ainsi par exemple, les couplages entre des propulseurs trop proches peuvent engendrer des variations de poussée et des forces transversales aux hélices, de même pour les interactions entre les flux des propulseurs et la coque. Bien que rare, la cavitation peut également affecter la poussée (particulièrement près de la surface, lorsque la charge est importante). Enfin, pour les véhicules de surface, plusieurs effets néfastes dus aux vagues et aux mouvements du bateau peuvent survenir. Ils sont détaillés dans [16].

On le voit, de nombreux paramètres rendent délicate la modélisation de la poussée d'un propulseur. Pour une hélice dont le pas n'est pas variable (ce qui est le cas le plus courant), on peut néanmoins utiliser l'approximation quasi-stationnaire suivante [13], où l'on remarque que la poussée et le couple produits par l'hélice sont proportionnels au carré de la vitesse de rotation et diminués par la vitesse de l'eau environnante u_a :

$$f_p = k_1 |n|n - k_2 |n|u_a \quad (10)$$

$$\Gamma_p = k_3 |n|n - k_4 |n|u_a \quad (11)$$

où les termes k_i sont des coefficients constants, dépendants de la géométrie de l'hélice, n est la vitesse de rotation de l'hélice et u_a est la vitesse de l'eau environnante. Elle est définie comme étant la vitesse du fluide environnant par rapport au propulseur et est donc inférieure ou égale à la vitesse de déplacement du véhicule.

Pour mieux appréhender cette notion de perte de poussée en fonction de la vitesse d'écoulement du fluide ambiant, il suffit d'imaginer un moulin à eau sur une rivière. Imaginons que ce moulin ne soit pas entraîné par la rivière, mais par un moteur. On conçoit aisément que pour une vitesse de rotation donnée du moteur le couple résistif sur l'axe du moulin dépendra de la vitesse d'écoulement de la rivière. Il en va de même pour les hélices des propulseurs et l'on comprend que lorsque le véhicule se déplace à grande vitesse, la poussée exercée par les propulseurs est moins importante (à vitesse de rotation égale).

Pour déterminer les coefficients k_i , on utilise les caractéristiques fournies par le fabricant de l'hélice ou du propulseur, ou, à défaut, on relève la caractéristique expérimentalement. La connaissance des caractéristiques des propulseurs est un préalable indispensable à la conception ou à la commande d'un véhicule et ne doit pas être négligée.

Deux autres effets, la plupart du temps ignorés, affectent également les propulseurs et peuvent être pris en compte lors de l'étude des très petits véhicules. Il s'agit des effets dus à l'inertie d'accélération du rotor et de l'hélice des propulseurs (terme classiquement noté $J d\omega/dt$) et des effets gyroscopiques liés à la rotation du rotor et de l'hélice du propulseur. Pour plus de détails sur ce sujet, le lecteur se reportera à [17].

Enfin, lors de la conception d'un véhicule, on portera une attention particulière au choix du pas des hélices. Par exemple, si deux propulseurs d'axes parallèles agissent conjointement à parts égales selon un même axe, il faudra, dans la mesure du possible, les équiper d'hélices dont les pas sont opposés. Ainsi, les hélices devront tourner en sens opposés pour produire une force dans la même direction. Il en résultera que les couples générés par les hélices s'annuleront et n'induiront pas de rotation indésirable du véhicule.

• Matrice de configuration des actionneurs

Pour pouvoir commander les véhicules, il est nécessaire d'exprimer le vecteur des forces et couples appliqués au véhicule par les

actionneurs (propulseurs, gouvernes, voiles, etc.) et noté τ dans le repère R_b lié au véhicule. On a :

$$\tau = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \\ \Gamma_x \\ \Gamma_y \\ \Gamma_z \end{bmatrix} \quad (12)$$

où f_i représente la force exercée le long l'axe i par l'ensemble des actionneurs et où Γ_i représente le couple exercé autour de l'axe i par l'ensemble des actionneurs. Les trois premiers termes de ce vecteur sont bien sûr exprimés en Newton et les trois derniers en Newton.mètres.

Lorsque l'on souhaite appliquer une commande au véhicule (à partir d'une loi de commande ou directement d'un opérateur humain via un joystick par exemple), celle-ci est toujours exprimée en termes intuitifs de forces et de couples (avancer, reculer, tourner, cabrer, etc.), c'est-à-dire par le vecteur τ précédemment défini. Pour déterminer la force que doit exercer chaque moteur, il est donc nécessaire d'établir la relation qui existe entre τ et les forces et couples créés par les actionneurs (notés $f_{\text{actionneurs}}$). Cette relation s'exprime sous forme matricielle à l'aide d'une matrice dite de configuration des actionneurs et notée T , telle que :

$$\tau = T f_{\text{actionneurs}} \quad (13)$$

On trouvera un exemple de calcul de T dans l'encadré ci-après.

Lorsque le nombre d'actionneurs est égal au nombre de degrés de liberté commandés, il suffira pour déterminer les consignes des actionneurs de calculer :

$$f_{\text{actionneurs}} = T^{-1} \tau \quad (14)$$

En revanche, lorsque le nombre d'actionneurs est supérieur au nombre de degrés de liberté commandés, plusieurs solutions sont possibles. Afin de choisir la plus avantageuse (souvent en termes de consommation énergétique), on utilise une matrice de pondération notée W . Les termes de cette matrice diagonale sont inversement proportionnels à l'importance que l'on souhaite donner à l'actionneur correspondant. Les forces à appliquer aux propulseurs se calculent alors avec une méthode de type pseudo-inverse [13] :

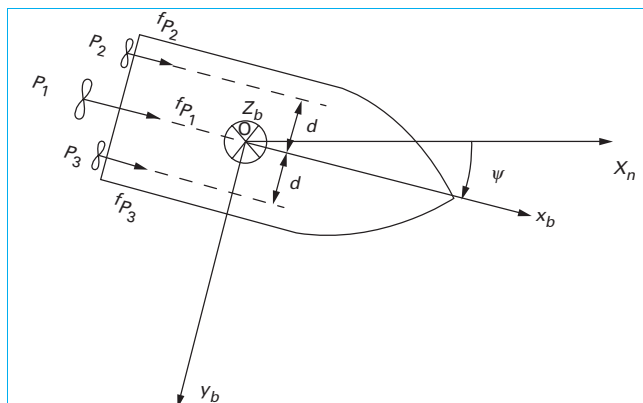
$$f_{\text{actionneurs}} = W^{-1} T^T [T W^{-1} T^T]^{-1} \tau \quad (15)$$

Dans la pratique, on affecte un poids prépondérant aux gouvernes et barres lorsque le véhicule est équipé de ces types d'actionneurs. En effet, une fois orientées, leur consommation énergétique est minimale (mais non nulle car elles augmentent la traînée).

Précisons enfin que dans le cas où les actionneurs sont des propulseurs orientables, la matrice T n'est plus constante, car elle dépend de l'orientation des propulseurs.

Exemple simple d'un navire sur-actionné

On considère le navire représenté en vue de dessus sur la figure suivante. Il est équipé de trois propulseurs arrières P_1 , P_2 et P_3 , dont les poussées respectives f_{P_1} , f_{P_2} et f_{P_3} s'exercent selon l'axe Ox_b du repère R_b . On néglige l'effet des couples résistifs Γ_{P_i} des hélices et l'on ne considère que les forces f_{P_1} , f_{P_2} et f_{P_3} .



P_1 est le propulseur principal. Il est puissant et possède un très bon rendement. Les propulseurs P_2 et P_3 sont des propulseurs secondaires destinés à commander la rotation du véhicule autour de l'axe Oz_b du repère R_b . Leur rendement est moins bon que celui de P_1 , mais on peut aussi les utiliser pour assurer une partie de la propulsion.

Les forces respectives f_{P_1} , f_{P_2} et f_{P_3} des trois propulseurs sont comptées positivement lorsqu'elles s'exercent dans le sens indiqué sur la figure. Le vecteur $f_{\text{actionneurs}}$ est défini tel que :

$$f_{\text{actionneurs}} = \begin{bmatrix} f_{P_1} \\ f_{P_2} \\ f_{P_3} \end{bmatrix}$$

Les seuls degrés de liberté commandés étant x et ψ (dans ce cas, c'est l'angle entre l'axe Ox_n du repère R_n lié à la Terre et l'axe Ox_b du repère R_b lié au véhicule), le vecteur de commande du véhicule se réduit à $\tau = [f_x \Gamma_z]^T$

La matrice de configuration du navire est donc :

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & d & -d \end{bmatrix}$$

Si l'on considère qu'il vaut mieux utiliser (dans un rapport 10) le propulseur P_1 , on choisit W telle que :

$$W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}$$

Dans ces conditions, si l'on souhaite appliquer une translation pure de 100 N longitudinalement ($\tau = [100 \ 0]^T$), en appliquant la formule :

$$f_{\text{actionneurs}} = W^{-1} T^T [T W^{-1} T^T]^{-1} \tau,$$

on obtient :

$$f_{\text{actionneurs}} = \begin{bmatrix} 83.3 \text{ N} \\ 8.33 \text{ N} \\ 8.33 \text{ N} \end{bmatrix}$$

et l'on retrouve le rapport 10 souhaité dans la répartition des forces sur les trois actionneurs.

Si l'on souhaite à présent appliquer une rotation pure de 20 N.m, on obtient :

$$f_{\text{actionneurs}} = \begin{bmatrix} 0 \text{ N} \\ 12.5 \text{ N} \\ -12.5 \text{ N} \end{bmatrix}$$

■ Perturbations extérieures

Les perturbations extérieures affectant un véhicule marin sont le vent (uniquement pour les véhicules de surface), les vagues (pour les véhicules de surface ou de *subsurface*), et le courant. Leur modélisation est souvent difficile, mais il existe toutefois de nombreux travaux dans ce domaine. Le chapitre 4 de la référence [13] permet d'approfondir ces points.

Enfin, pour les véhicules sous-marins, on notera l'effet non négligeable de l'ombilical, en particulier en présence de courant fort. Comme tout câble libre, la modélisation de l'ombilical est extrêmement difficile. Les fabricants de ROV prennent donc des mesures technologiques permettant de limiter ses effets indésirables : ombilical à flottabilité neutre, mise en place d'un enrouleur (TMS). Il n'en demeure pas moins que la traction exercée par l'ombilical est imprévisible et non négligeable. Elle nécessite, pour les degrés de liberté automatisés, la mise en place de lois de commandes aptes à rejeter ce type de perturbations dans la limite de la capacité de propulsion du véhicule (par exemple la commande en mode glissant décrite au paragraphe 4.4).

3.2.2 Modèle dynamique du véhicule dans le repère lié au véhicule

Si l'on applique le principe fondamental de la dynamique au véhicule dans le repère R_b (non galiléen) lié au véhicule, en sommant les vecteurs des forces et couples listés précédemment, on obtient :

$$\mathbf{M}\mathbf{v} = \mathbf{f}_c + \mathbf{f}_g + \mathbf{f}_h + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{w} \quad (16)$$

où $\mathbf{v} = [\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}]^T$ est le vecteur des accélérations du véhicule, \mathbf{f}_c représente les forces et couples d'inertie d'entraînement et de Coriolis, \mathbf{f}_g représente les forces et couples induits par le poids et la poussée d'Archimède, \mathbf{f}_h représente les forces et couples hydrodynamiques, $\boldsymbol{\tau}$ est le vecteur des forces et couples produits par les actionneurs et \mathbf{w} est le vecteur des perturbations extérieures (vagues, ombilical, etc.).

$\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$ est la matrice de masse et d'inertie du véhicule et a pour expression :

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_g & -my_g \\ 0 & m & 0 & -mz_g & 0 & mx_g \\ 0 & 0 & m & my_g & -mx_g & 0 \\ 0 & -mz_g & my_g & I_x & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_g & 0 & -mx_g & -I_{yx} & I_y & -I_{yz} \\ -my_g & mx_g & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z \end{bmatrix} + \mathbf{M}_{\text{masses ajoutées}} \quad (17)$$

où m est la masse (en kg) du véhicule, (x_g, y_g, z_g) est la position du centre de gravité du véhicule exprimée dans le repère R_b . I_x , I_y et I_z sont les moments d'inertie du corps du véhicule selon les axes x , y et z du repère R_b et les I_{ij} sont les produits d'inertie définis tels que, par exemple, l'on ait $I_{xy} = \iiint_V xy \rho_m dV$, où V est le volume du véhicule et ρ_m la masse volumique au point concerné lors de l'intégration. Si, comme souvent, l'origine du repère R_b n'a pas été choisie au centre de gravité du véhicule, on calcule la matrice d'inertie au centre de gravité (calcul souvent plus aisé pour des raisons de symétrie) et l'on applique ensuite le théorème de Huygens (ou théorème des axes parallèles) pour calculer sa valeur dans le repère R_b .

Enfin, la matrice $\mathbf{M}_{\text{masses ajoutées}}$ est soit estimée par simulation hydrodynamique, soit déterminée expérimentalement, soit négligée si l'on utilise une commande robuste.

Avec la notation très largement répandue du modèle de la SNAME, les termes $\mathbf{f}_c = -\mathbf{C}_{RB}(\mathbf{v})\mathbf{v}$, $\mathbf{f}_h = -\mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v}$ et $\mathbf{f}_g = -\mathbf{g}(\eta)$ sont

déplacés dans le membre de gauche et l'équation (16) décrivant la dynamique du véhicule devient :

$$\mathbf{M}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\eta) = \boldsymbol{\tau} + \mathbf{w} \quad (18)$$

3.2.3 Modèle dynamique du véhicule dans le repère fixe

Nous l'avons vu, l'expression du modèle dynamique du véhicule est habituellement calculée dans le repère R_b lié au véhicule en raison de la plus grande simplicité d'expression dans ce repère des forces appliquées au véhicule (à l'exception des forces de gravité et d'Archimède, mais ces dernières sont précisément connues).

Pour certaines applications, il peut néanmoins être nécessaire d'exprimer l'équation dynamique du véhicule dans le repère fixe R_n , c'est-à-dire en fonction de $\eta = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi]^T$ le vecteur d'état représentant la position et l'orientation du véhicule dans ce repère.

Pour cela, comme expliqué en détails dans [13], il suffit de dériver la relation (2), puis de l'utiliser pour transformer les termes de l'équation (18).

Ainsi,

$$\dot{\eta} = \mathbf{J}(\eta)\mathbf{v} \quad (19)$$

devient :

$$\ddot{\eta} = \mathbf{J}(\eta)\dot{\mathbf{v}} + \dot{\mathbf{J}}(\eta)\mathbf{v} \quad (20)$$

et l'on a donc :

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{J}^{-1}(\eta) [\ddot{\eta} - \dot{\mathbf{J}}(\eta)\mathbf{J}^{-1}(\eta)\dot{\eta}] \quad (21)$$

puisque :

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}^{-1}(\eta)\dot{\eta} \quad (22)$$

En remplaçant les termes \mathbf{v} et $\dot{\mathbf{v}}$ dans (18), l'équation dynamique exprimée dans le repère R_n devient donc :

$$\mathbf{M}^*(\eta)\ddot{\eta} + \mathbf{C}^*(\eta, \mathbf{v})\dot{\eta} + \mathbf{D}^*(\eta, \mathbf{v})\dot{\eta} + \mathbf{g}^*(\eta) = \mathbf{J}^{-T}(\eta)(\boldsymbol{\tau} + \mathbf{w}) \quad (23)$$

avec :

$$\mathbf{M}^*(\eta) = \mathbf{J}^{-T}(\eta)\mathbf{M}\mathbf{J}^{-1}(\eta) \quad (24)$$

$$\mathbf{C}^*(\eta, \mathbf{v}) = \mathbf{J}^{-T}(\eta) [\mathbf{C}(\mathbf{v}) - \mathbf{M}\dot{\mathbf{J}}^{-1}(\eta)\mathbf{J}(\eta)] \mathbf{J}^{-1}(\eta) \quad (25)$$

$$\mathbf{D}^*(\eta, \mathbf{v}) = \mathbf{J}^{-T}(\eta)\mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{J}^{-1}(\eta) \quad (26)$$

$$\mathbf{g}^*(\eta) = \mathbf{J}^{-T}(\eta)\mathbf{g}(\eta) \quad (27)$$

On portera une attention particulière au fait que ces matrices varient en fonction de l'attitude et de la vitesse du véhicule, ce qui peut compliquer leur utilisation.

Ayant terminé de modéliser le véhicule marin, nous pouvons à présent étudier la commande de ce système.

4. Commande des véhicules

Dans les paragraphes précédents, nous avons établi un modèle à 6 degrés de liberté pour le véhicule marin. Dans de nombreuses applications, par exemple lorsque l'on souhaite commander un navire de surface, il n'est pas nécessaire que les 6 degrés de liberté du véhicule soient contraints. On a alors recours à un modèle simplifié dans lequel, par exemple, le roulis ou la profondeur ne sont pas commandés. Les équations sont alors simplifiées et certains termes peuvent être linéarisés. Dans ce qui suit, nous traiterons du cas général à 6 degrés de liberté à partir duquel il est aisé de déduire le modèle minimal selon le nombre de degrés de liberté nécessaires à l'application.

4.1 Introduction

Les véhicules marins sont des systèmes non linéaires pour lesquels plusieurs paramètres du modèle sont peu connus ou inconnus *a priori* (termes de la matrice d'amortissement, masses ajoutées, etc.) et sont susceptibles de varier au cours d'une mission (flottabilité lorsque la salinité varie, emport ou largage d'échantillons, etc.).

De plus, certains effets ne peuvent être intégrés correctement au modèle (effet de l'ombilical, effets d'écoulements tourbillonnaires, etc.). Enfin, le véhicule est soumis à des perturbations fréquentes (vagues, chocs, etc.). Ces termes mal connus et ces perturbations ont un effet plus ou moins important sur le véhicule en fonction de leur influence relative. Sur les petits véhicules marins (robots voiliers, mini-ROV, mini-AUV) les approches de commande traditionnellement utilisées sur les véhicules à forte inertie ne suffisent pas à garantir des performances acceptables, c'est-à-dire, principalement, un retour rapide à la stabilité en cas de perturbation (par exemple un choc) et un fonctionnement peu sensible aux variations des paramètres du système (par exemple une variation de la charge embarquée, des caractéristiques d'un moteur, etc.). Il est alors nécessaire de mettre en œuvre des commandes robustes capables de s'adapter à la variabilité et à l'incomplétude du modèle, mais aussi aptes à rejeter correctement les perturbations.

Dans cette partie nous présenterons tout d'abord la commande PID (proportionnelle intégrale dérivée), très utilisée sur les véhicules marins commerciaux et qui permet d'obtenir simplement d'assez bonnes performances. Après avoir observé les limites de cette commande, nous étudierons la commande adaptative par retour d'état non linéaire (*Nonlinear Adaptive State Feedback*), classique en recherche et pourtant peu utilisée pour des applications industrielles. Elle permet d'obtenir de meilleures performances en termes de robustesse et de simplicité de réglage. Enfin, nous étudierons la commande en mode glissant, plus simple à régler et qui présente une très bonne robustesse.

4.2 Commande PID

4.2.1 Présentation

Cette commande étant probablement la commande la plus classique dans tous les domaines de l'automatique, nous ne nous attarderons pas à la décrire en détail. Mentionnons cependant que, pour les véhicules sous-marins, il est recommandé de compenser les effets de la force de gravité et de la poussée d'Archimède (ces dernières étant souvent connues avec précision, car faciles à mesurer). Cela consiste simplement à ajouter à la commande le terme $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ du modèle dynamique afin d'en annuler les effets. On ajoute également parfois à la commande un retour d'accélération $-\mathbf{K}\dot{\mathbf{v}}$ afin d'augmenter virtuellement l'inertie du véhicule pour le rendre plus stable.

L'expression de la commande PID est :

$$\boldsymbol{\tau}_{PID} = \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) - \mathbf{K}\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{K}_p\tilde{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{K}_i \int_0^t \tilde{\boldsymbol{\eta}}(t)dt + \mathbf{K}_d\dot{\tilde{\boldsymbol{\eta}}} \quad (28)$$

où $\mathbf{g}(\boldsymbol{\eta})$ est le terme optionnel de compensation des forces de gravité et d'Archimède (recommandé), où $-\mathbf{K}\dot{\mathbf{v}}$ est le terme optionnel de retour d'accélération (avec \mathbf{K} sa matrice de gain), où $\tilde{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\eta} - \boldsymbol{\eta}_{des}$ est l'erreur mesurée entre $\boldsymbol{\eta}$ l'état du système et $\boldsymbol{\eta}_{des}$ l'état désiré, et où \mathbf{K}_p , \mathbf{K}_i et \mathbf{K}_d sont des matrices de gain du PID. Le terme dérivé du PID est souvent supprimé, dans la mesure où les forces d'amortissement hydrodynamique assurent la même fonction.

4.2.2 Réglage et propriétés

De nombreuses méthodes de réglage des correcteurs PID existent (Ziegler-Nichols, placement de pôles, etc.) et sont détaillées par exemple dans [R 7 416].

Cependant, l'application de ces méthodes sur les véhicules sous-marins ne donne pas immédiatement un résultat satisfaisant. Un réglage fin est souvent nécessaire et peut prendre plusieurs heures. Le caractère intuitif et familier du réglage de cette commande fait qu'elle est pourtant utilisée sur de nombreux véhicules commercialisés. Ainsi, on trouve des fonctions de régulation en profondeur (*auto-depth*), en cap (*auto-heading*) ou encore en altitude (hauteur par rapport au fond) sur de nombreux véhicules sous-marins.

Dans les expérimentations présentées au paragraphe 4.5, on observera que cette commande permet d'obtenir un asservissement précis, mais supporte mal les variations du modèle du véhicule, que ces dernières soient liées à des paramètres environnementaux (comme la variation de salinité modifiant la flottabilité) ou à des modifications du robot (comme celle de la charge embarquée par prélèvement d'un échantillon ou par remplacement d'un capteur). Pour prendre en compte ce type de changements, on peut par exemple avoir recours à une commande adaptative telle que celle décrite ci-après.

4.3 Commande adaptative à retour d'état

4.3.1 Présentation

La commande adaptative à retour d'état permet de prendre en compte les variations temporelles de paramètres du modèle dynamique du véhicule (flottabilité, position du centre de gravité, coefficients d'amortissement hydrodynamique, etc.) ou tout simplement d'adapter des paramètres mal connus du système (masses ajoutées, etc.).

Pour bien comprendre le fonctionnement de cette commande, rappelons le fonctionnement de la commande à retour d'état classique (non adaptative). Il s'agit, pour commander le véhicule, d'envoyer un vecteur de commande $\boldsymbol{\tau}$ qui compense tous les paramètres du système et fixe directement la dynamique de l'erreur. Ainsi, d'après (13), en choisissant le vecteur $\boldsymbol{\tau}$ tel que (figure 23) :

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{M}\mathbf{a}^b + \mathbf{C}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{D}(\mathbf{v})\mathbf{v} + \mathbf{g}(\boldsymbol{\eta}) \quad (29)$$

et en remplaçant $\boldsymbol{\tau}$ dans l'équation (18) de la dynamique du système (en négligeant le terme de perturbation \mathbf{w}), on obtient après simplification :

$$\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{a}^b \quad (30)$$

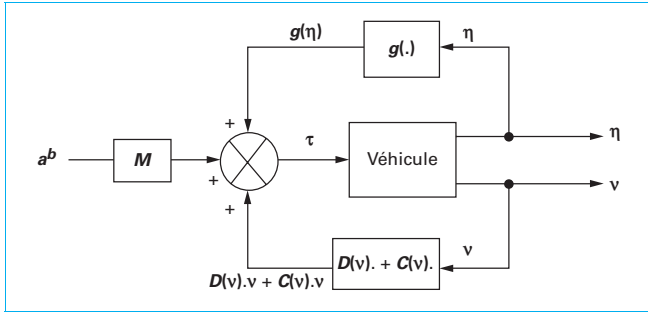


Figure 23 – Schéma-bloc de la commande à retour d'état classique

où a^b est la commande (accélération) exprimée dans le repère R_b lié au véhicule et est déduite de la commande a^n exprimée dans le repère R_n en appliquant l'équation (20), c'est-à-dire :

$$a^b = J^{-1}(\eta) [a^n - \dot{J}(\eta)v] \quad (31)$$

On peut ainsi choisir la dynamique de l'erreur d'état $\tilde{\eta} = \eta - \eta_{des}$ ($\ddot{\eta}_{des}$ étant l'accélération désirée) en choisissant :

$$a^n = \ddot{\eta}_{des} - K_d \dot{\tilde{\eta}} - K_p \tilde{\eta} - K_i \int_0^t \tilde{\eta}(t) dt \quad (32)$$

Lorsque l'on remplace (32) dans (29) en utilisant (20) et en l'appliquant à (18), on obtient la dynamique de l'erreur d'état suivante :

$$\ddot{\tilde{\eta}} - K_d \dot{\tilde{\eta}} - K_p \tilde{\eta} - K_i \int_0^t \tilde{\eta}(t) dt = 0 \quad (33)$$

Les coefficients K_d , K_p et K_i sont des matrices diagonales constantes qui permettent de régler la dynamique de chaque terme du vecteur d'état comme on le souhaite (par exemple par placement de pôles).

Maintenant que nous avons rappelé l'expression de la commande à retour d'état classique, voyons comment procéder quand les termes M , $C(v)$, $D(v)$ et $g(\eta)$ de l'équation (29) varient ou sont tout simplement mal connus. La commande doit adapter les paramètres du modèle et l'on parle alors de commande **adaptative** à retour d'état.

Pour pouvoir réaliser cette adaptation, il est nécessaire de remplacer le vecteur τ défini en (29) par la relation linéaire suivante [13] :

$$\tau = \Phi(a^b, v, \eta) \hat{\theta} \quad (34)$$

où $\Phi(a^b, v, \eta) \in \mathbb{R}^{6 \times n}$ est une matrice variable appelée « régresseur » et $\hat{\theta} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ est le vecteur rassemblant les valeurs estimées des n paramètres du système (voir exemple dans l'encadré ci-après).

D'après (29) et (34), $\Phi(a^b, v, \eta)$ est tel que :

$$\Phi(a^b, v, \eta) \hat{\theta} = M a^b + C(v)v + D(v)v + g(\eta) \quad (35)$$

avec, comme précédemment, a^b défini par la relation (31) et a^n tel que :

$$a^n = \ddot{\eta}_{des} - K_d \dot{\tilde{\eta}} - K_p \tilde{\eta} \quad (36)$$

où $\ddot{\eta}_{des}$ est l'accélération désirée et K_d et K_p sont des matrices diagonales constantes qui permettent de régler la dynamique de chaque terme du vecteur d'état.

À chaque itération de la commande, on mesure l'erreur combinée de sortie :

$$y = c_0 \tilde{\eta} - c_1 \dot{\tilde{\eta}} \quad (37)$$

où c_0 et c_1 sont deux constantes positives dont les valeurs doivent vérifier les trois relations suivantes :

$$\left. \begin{aligned} (c_0 K_d + c_1 K_p) c_1 &> \begin{bmatrix} c_0^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & c_0^2 \end{bmatrix} \\ 2c_0 K_p &> \begin{bmatrix} \beta & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \beta \end{bmatrix} \\ 2 \left(c_1 K_d - \begin{bmatrix} c_0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & c_0 \end{bmatrix} \right) &> \begin{bmatrix} \beta & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \beta \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

β étant une petite constante positive.

On fait ensuite évoluer les valeurs estimées des paramètres (c'est-à-dire le vecteur $\hat{\theta}$) en fonction de l'erreur combinée y et d'une matrice diagonale Γ dont chaque terme est la constante définissant la vitesse d'adaptation du paramètre correspondant (dans $\hat{\theta}$). La matrice Γ est appelée matrice de gain d'adaptation et la loi d'adaptation appliquée à chaque itération est définie par la relation ci-dessous :

$$\dot{\hat{\theta}} = -\Gamma \Phi^T(a^b, v, \eta) J^{-1}(\eta) y \quad (39)$$

La preuve de stabilité ainsi que le détail du choix des diverses constantes peuvent être trouvés au chapitre 7.3 de la référence [13].

Exemple simple de calcul de régresseur pour une commande adaptative à retour d'état

Considérons un véhicule sous-marin de type ROV sur lequel on souhaite appliquer une commande adaptative à retour d'état pour asservir la profondeur d'immersion z et l'angle de tangage θ . L'origine O du repère R_b lié au véhicule est prise au centre de volume.

On suppose que les mouvements sont suffisamment lents pour pouvoir négliger les termes d'inertie d'accélération et de Coriolis. On suppose également que les termes non diagonaux de la matrice d'inertie sont négligeables et que l'angle de roulis est nul. Le modèle dynamique réduit de ce véhicule est le suivant :

$$M \dot{v} + D(v)v + g(\eta) = \tau$$

avec :

$$v = \begin{bmatrix} w \\ q \end{bmatrix} \text{ et } \eta = \begin{bmatrix} z \\ \theta \end{bmatrix}$$

Pour trouver l'expression du régresseur $\Phi(a^b, v, \eta)$ nécessaire à la commande, on écrit le détail de ce modèle réduit :

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I_y \end{bmatrix} \dot{v} + \begin{bmatrix} D_w(v) & 0 \\ 0 & D_q(v) \end{bmatrix} v + \begin{bmatrix} (B-W)c\theta \\ z_g W s\theta \end{bmatrix} = \tau$$

où m est la masse du véhicule, I_y est son moment d'inertie autour de l'axe O_y , $D_w(v)$ et $D_q(v)$ sont les coefficients d'amortissement hydrodynamique respectivement en translation selon l'axe O_z et en rotation autour de l'axe O_y . B est la norme de la poussée d'Archimède, W est la norme du poids et z_g est la position du centre de gravité dans le repère R_b (on suppose que le centre de gravité est situé sur l'axe O_z).

On déduit de cette expression le vecteur des paramètres estimés $\hat{\boldsymbol{\theta}}$:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = [\hat{m} \quad \hat{D}_w \quad \hat{B-W} \quad \hat{I}_y \quad \hat{D}_q \quad \hat{z_g W}]^T$$

et le régresseur $\Phi(\mathbf{a}^b, \mathbf{v}, \eta)$ tel que :

$$\Phi(\mathbf{a}^b, \mathbf{v}, \eta) = \begin{bmatrix} a_z^b & w & c\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_\theta^b & q & s\theta \end{bmatrix}$$

Une fois ces deux derniers éléments formulés, il suffit d'appliquer la commande définie dans le paragraphe 4.3.1 pour contrôler le véhicule.

4.3.2 Réglage et propriétés

Plusieurs points importants doivent être soulignés concernant la commande adaptative. Premièrement, les paramètres doivent être grossièrement initialisés à une valeur voisine de leur véritable valeur ou à une valeur permettant la convergence, faute de quoi la commande risque de diverger. Deuxièmement, même si les conditions de stabilité sont vérifiées, la convergence des paramètres n'est jamais garantie. En revanche, il est prouvé que ce vecteur est borné [13]. En outre, les paramètres vont se stabiliser vers un jeu de valeurs qui garantit la convergence de l'erreur, mais ces valeurs ne correspondent pas nécessairement aux véritables valeurs des paramètres. Il faut ajouter qu'un paramètre n'évoluera que s'il est excité par une trajectoire de commande suffisamment riche spatialement et fréquemment. Le fait qu'il n'évolue pas n'est cependant pas inquiétant, dans la mesure où cela signifie souvent que la trajectoire suivie ne nécessite pas la connaissance de ce paramètre. Troisièmement, la vitesse de variation des paramètres est liée à la matrice de gain Γ . On peut être tenté d'utiliser des grands gains pour faire converger plus rapidement la commande. Cela risque cependant d'entraîner des oscillations croissantes des paramètres, causant une instabilité du système.

Depuis 2010, une nouvelle commande adaptative a été développée, d'abord dans le domaine aérien, puis, entre autres, en sous-marin. Il s'agit de la commande adaptative en norme L1. Cette commande découple l'adaptation et la robustesse. Elle permet ainsi une adaptation très rapide (très grands gains), tout en garantissant que les paramètres ne divergeront pas. Mieux, elle ne nécessite aucune connaissance *a priori* des paramètres (qui peuvent être initialisés à 0). Le lecteur intéressé se reportera à la référence [18].

4.4 Commande en régime glissant

La commande en régime glissant est une commande robuste. L'article [S 7 435] en propose une présentation détaillée, ainsi que le livre [19]. La commande en régime glissant est formée d'une partie continue (dite « commande équivalente » en glissement) et d'une partie discontinue. Cette dernière assure l'attraction puis le maintien sur la surface de glissement (la surface de glissement permet de définir la dynamique désirée du système). On reproche souvent à cette commande de consommer beaucoup d'énergie et de solliciter violemment les actionneurs en raison du risque d'apparition du phénomène de réticence (battements à haute fréquence, ou encore « *chattering* »). Il existe pourtant plusieurs méthodes permettant d'adoucir le terme discontinu (linéarisation au voisinage de la surface de glissement, tangente hyperbolique, etc.).

Prenons l'exemple simple de la régulation en cap d'un ROV, en utilisant le modèle très simplifié suivant :

$$\begin{cases} \dot{\psi} = r \\ I_z \dot{r} + D_r r = u \end{cases} \quad (40)$$

où ψ est le cap, r est la vitesse de rotation autour de l'axe O_z , I_z est le moment d'inertie du corps du véhicule autour de l'axe O_z , D_r est le coefficient d'amortissement en rotation (à faible vitesse) autour

de l'axe O_z et où u est l'entrée de commande, c'est-à-dire le couple exercé par les propulseurs autour de l'axe O_z (souvent il s'agit de deux propulseurs situés de part et d'autre du ROV et dont les pous-sées sont antagonistes).

Soit \mathbf{x} le vecteur d'état du système tel que :

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \psi \\ r \end{bmatrix} \quad (41)$$

L'équation d'état du système s'écrit donc :

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (42)$$

avec $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{D_r}{I_z} \end{bmatrix}$ et $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ I_z \end{bmatrix}$

On définit une surface de glissement $s(\mathbf{x})$ telle que $s(\mathbf{x}) = \sigma\mathbf{x} = 0$.

Si l'on choisit pour σ un vecteur constant $\sigma = [\sigma_0 \quad 1]$, la surface de glissement peut alors s'écrire :

$$s(\mathbf{x}) = \sigma_0\psi + r \quad (43)$$

Dans ce cas, la surface de glissement est une droite dans le plan de phase, qui définit la dynamique du système. On choisira le paramètre σ_0 en fonction de la dynamique souhaitée lorsque le système a rejoint la surface de glissement. Il est évident que σ_0 doit respecter une dynamique physiquement réalisable par les actionneurs du ROV.

La commande u est enfin obtenue en appliquant la relation suivante :

$$u = -(\sigma\mathbf{B})^{-1}\sigma\mathbf{A}\mathbf{x} - k(\sigma\mathbf{B})^{-1}\text{sign}(s(\mathbf{x})) \quad (44)$$

soit, pour notre ROV :

$$u = -(I_z\sigma_0 - D_r)r - kI_z\text{sign}(\sigma_0\psi + r) \quad (45)$$

où le premier terme est la commande équivalente (permettant théoriquement au système, par retour d'état, de respecter spontanément la dynamique imposée par la surface de glissement et donc de demeurer sur cette dernière) et le deuxième terme est la partie discontinue de la commande. La fonction $\text{sign}()$ correspond au signe de $s(\mathbf{x})$, c'est-à-dire vaut +1 si $s(\mathbf{x})$ est positive, 0 si $s(\mathbf{x})$ est nulle et -1 sinon. Le coefficient constant k est un nombre positif qui doit être suffisamment grand pour « ramener » le système sur la surface de glissement en dépit de l'état initial du système, des perturbations et de la variabilité du modèle. Le réglage de ce terme de robustesse dépend donc étroitement de l'application et de la connaissance du système. Plus k est grand, plus l'attractivité de la surface est importante et donc plus la surface est suivie avec précision, même en présence de perturbations. En revanche une grande valeur de k entraîne une augmentation du phénomène indésirable de réticence.

Pour diminuer la réticence, on définit un domaine au voisinage de la surface $s(\mathbf{x})$, à l'intérieur duquel le terme discontinu est linéarisé. Pour cela, il suffit de remplacer la fonction sign par une fonction de saturation et on obtient :

$$u = -(I_z\sigma_0 - D_r)r - kI_z\text{sat}\left(\frac{s(\mathbf{x})}{\Phi}, 1\right) \quad (46)$$

$$\text{ou } \text{sat}\left(\frac{s(\mathbf{x})}{\Phi}, 1\right) = \begin{cases} \frac{s(\mathbf{x})}{\Phi} & \text{si } \left|\frac{s(\mathbf{x})}{\Phi}\right| < 1 \\ \text{sign}\frac{s(\mathbf{x})}{\Phi} & \text{sinon.} \end{cases} \quad (47)$$

et où Φ est un nombre très petit, dont l'inverse définit la pente de la fonction de saturation. Ce paramètre Φ doit être choisi suffisamment petit pour maintenir l'attractivité de la surface (au prix cependant d'une augmentation de la réticence) et suffisamment grand pour maintenir la réticence sous un seuil acceptable (au prix d'un moins bon rejet des perturbations).

Dans le cas général, lorsque les degrés de liberté sont découplés, on peut appliquer le même type de commande sur chacun d'entre eux. Il existe cependant des situations où plusieurs degrés de liberté sont couplés. C'est le cas, par exemple, lorsque l'on souhaite commander la dynamique de plongée d'un véhicule allongé non holonome. En effet, le tangage, la vitesse angulaire autour de l'axe de tangage, la vitesse selon l'axe Oz et la profondeur d'immersion sont liées. La commande en mode glissant peut néanmoins être appliquée et le lecteur intéressé se reportera au chapitre 13 de la référence [13].

4.5 Comparaison expérimentale des trois méthodes proposées

Afin d'illustrer et de comparer les trois approches présentées dans ce paragraphe (commande PID, commande adaptative à retour d'état, commande en régime glissant), nous avons procédé à des expérimentations sur le véhicule sous-marin L2ROV (Languedoc Roussillon ROV, projet ARPE MiniROV, financé par la Région Languedoc-Roussillon) (figure 24) du LIRMM (Laboratoire d'informatique de robotique et de microélectronique de Montpellier – UMR 5506 CNRS/université Montpellier 2). Ce véhicule de 28 kg est équipé de 6 propulseurs actionnant les 6 degrés de liberté. Il mesure 50 cm x 48 cm x 40 cm et peut descendre à 100 mètres de profondeur.

Nous avons réalisé un asservissement en profondeur (z) en faisant varier la consigne de sorte que la trajectoire présente un premier palier à 100 cm, puis un second à 50 cm. Pour chaque commande, nous avons testé le comportement nominal (c'est-à-dire avec la commande réglée au mieux), puis nous avons augmenté de 7 N la flottabilité du véhicule (soit une augmentation de 63 %) et procédé à un deuxième test sans modifier les réglages. Pour chaque commande, les courbes obtenues sont représentées sur la figure 25. Dans la colonne de gauche, on voit en pointillés rouges la trajectoire de consigne, en noir la trajectoire réalisée en condition nominale et en bleu la trajectoire obtenue lorsque la flottabilité a été augmentée. Dans la colonne de droite, on a représenté la force verticale exercée par les propulseurs.

On constate qu'en régime nominal, les trois commandes ont des performances équivalentes en ce qui concerne le suivi de la trajectoire de référence. On note tout de même que, pour le PID et la commande adaptative, le suivi de trajectoire présente de légères ondulations de basse fréquence, que l'on retrouve naturellement au niveau de la commande. La commande en mode glissant permet, quant à elle, d'obtenir un suivi plus précis de la trajectoire, mais au prix de l'apparition de petites oscillations de haute-fréquence sur la commande (phénomène de réticence ou *chattering*). Une commande en régime glissant d'ordre supérieur permettrait néanmoins de pallier cet inconvénient.

Lorsque l'on modifie la flottabilité, on constate que les commandes PID et adaptative mettent un certain temps à rejoindre la trajectoire de consigne. Cela est dû, pour le PID, à l'intégration plus longue nécessaire à la compensation d'une flottabilité accrue. Pour la commande adaptative, cela est dû à l'adaptation du paramètre de flottabilité ($\widehat{W-B}$) (figure 26). Pour ces deux premières commandes, on observe également l'accroissement des ondulations autour de la trajectoire désirée. L'allure de la force exercée par les propulseurs ne change pas, mais est



Figure 24 – Le véhicule sous-marin L2ROV du LIRMM lors d'une inspection de paroi par caméra stéréoscopique à Banyuls. On distingue les deux propulseurs verticaux avant, le propulseur arrière bâbord et un des deux projecteurs (crédit : Observatoire d'Océanologie de Banyuls / LIRMM)

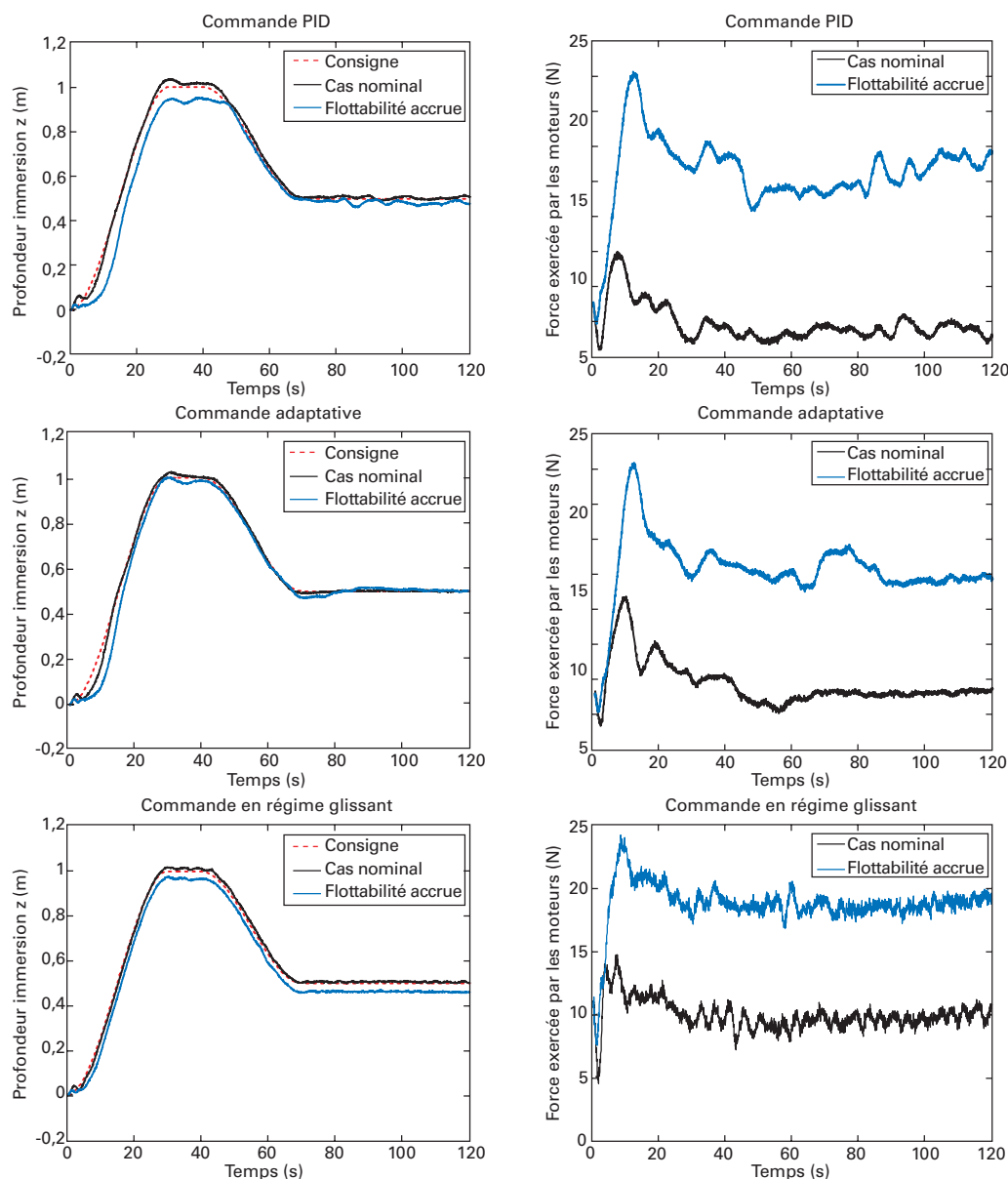


Figure 25 – Résultats expérimentaux d’asservissement de profondeur avec les commandes : PID (en haut), adaptative à retour d’état (au milieu) et en régime glissant (en bas). Dans la colonne de gauche, on visualise l’évolution de la profondeur d’immersion z , et dans la colonne de droite, on visualise la force verticale exercée par les propulseurs

simplement augmentée de la poussée requise pour compenser l’accroissement de flottabilité.

Dans le cas de la commande en mode glissant, on observe un suivi toujours aussi stable, mais décalé de 4 cm au-dessus de la trajectoire de référence. Cela est dû au domaine de linéarisation du terme discontinu au voisinage de la surface de glissement. Si l’on

souhaitait diminuer cet écart, il suffirait de diminuer le paramètre Φ évoqué au paragraphe 4.4, ce qui se traduirait par une augmentation de la réticence et donc une sollicitation plus brutale des moteurs. Des versions améliorées de la commande en régime glissant (commande en régime glissant adaptative) permettent de traiter ce problème.

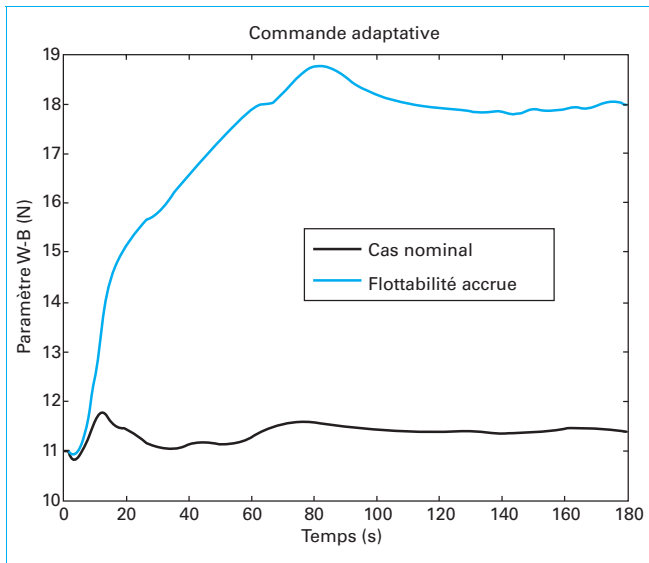


Figure 26 – Évolution temporelle du paramètre estimé de flottabilité $W-B$ dans le cas de la commande adaptative à retour d'état

5. Conclusion

Dans cet article, nous avons vu qu'il existait une grande variété de véhicules marins et sous-marins et de matériels associés. Les contraintes sont fortes (modèles difficiles à caractériser, nombreuses perturbations) et la densité d'informations (position, perception, communication) est faible. Malgré ces contraintes, les progrès technologiques et scientifiques réguliers qu'ont connus les robots marins et sous-marins depuis plusieurs décennies en permettent aujourd'hui une utilisation fiable et efficace. Le nombre d'unités vendues ne cesse d'augmenter chaque année, aussi bien pour des applications industrielles, que scientifiques ou militaires. Les véhicules capables d'opérer à 6 000 mètres sont de plus en plus courants et l'autonomie des AUVs ne cesse de s'accroître. L'heure est désormais au développement du premier robot humanoïde sous-marin (universités de Stanford et KAUST) et des flottilles de véhicules. Plusieurs projets ambitieux sont actuellement à l'étude dans ce dernier domaine, pour l'observation, mais aussi pour l'intervention (manipulation faisant coopérer plusieurs véhicules, éventuellement de façon entièrement autonome). Certaines de ces flottilles sont hétérogènes (véhicule sous-marin, véhicule de surface, véhicule aérien), reconfigurables en cours de mission, etc. L'intérêt des flottilles est évident, que ce soit en océanographie (simultanéité de plusieurs mesures), ou pour des applications militaires (rapidité opérationnelle et redondance). Elles posent de nouveaux problèmes scientifiques (coordination, génération de trajectoires, co-manipulation, supervision, etc.), technologiques (communications, etc.) et opérationnels (déploiement...).

La résolution de ces problèmes, mais aussi l'autonomie croissante demandée aux véhicules marins isolés, constituent les défis industriels et scientifiques des prochaines décennies.

Robots marins et sous-marins

Perception, modélisation, commande

par **Vincent CREUZE**

Maître de conférences

LIRMM, UMR5506 CNRS / université Montpellier 2, Montpellier, France

Sources bibliographiques

- [1] JAULIN (L.) et LE BARS (F.). – *An interval approach for stability analysis, Application to sailboat robotics*, IEEE Transaction on Robotics. Volume 27, Issue 5 (2012).
- [2] BRIERE (Y.). – *IBOAT, An autonomous robot for long-term offshore operation*. Electro-technical Conference, MELECON 2008, the 14th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, pages 323-329 (2008).
- [3] BOYER (F.), GOSSIAUX (P.-B.), JAWAD (B.), LEBASTARD (V.) et POREZ (M.). – *Model for a sensor inspired by electric fish*. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 52, 2, pp. 492-505 (2012).
- [4] BOYER (F.) et LEBASTARD (V.). – *Exploration of Objects by an Underwater Robot with Electric Sense*. Living Machines, 50-61. Biomimetic and Biohybrid Systems, Springer Berlin Heidelberg, Lecture Notes in Computer Science, v : 7375 (2012).
- [5] BOYER (F.), LEBASTARD (V.), CHEVALLE-REAU (C.) et SERVAGENT (N.). – *Underwater reflex navigation in confined environment based on electric sense*. IEEE Transactions on Robotics, Vol. 29 (4), pp. 945-956 (2013).
- [6] CRESPI (A.), KARAKASILLOTIS (K.), GUIGNARD (A.) et IJSPEERT (A.J.). – *Salamanca Robotica II : An Amphibious Robot to Study Salamander-Like Swimming and Walking Gaits*. IEEE Transactions on Robotics, vol. 29, n° 2, pp. 308-320 (2012).
- [7] Site web du programme international ARGO (profileurs) : <http://www.argo.net/>.
- [8] VINCENT (A.G.), PESSEL (N.), BORGETTO (M.), JOUFFROY (J.), OPDERBECKE (J.) et RIGAUD (V.). – *Real-time geo-referenced video mosaicking with the MATISSE system*. IEEE. OCEANS 2003. Vol. 4, pp. 2319-2324 (2003).
- [9] LURTON (X.). – *Acoustique sous-marine – Présentation et applications*. Éditions Ifremer, 110 pages (1998).
- [10] LURTON (X.). – *An Introduction to Underwater Acoustics – Principles and Applications*. Springer Praxis Books (Geophysical Sciences), 724 pages, 2nd ed. (2010).
- [11] QUIDU (I.), JAULIN (L.), BERTHOLOM (A.) et DUPAS (Y.). – *Robust Multitarget Tracking in Forward Looking Sonar Image Sequences using Navigational Data*. IEEE Journal of Oceanic Engineering. Volume : 37, Issue : 3, Pages : 417-430 (2012).
- [12] DONIEC (M.) et al. – *Using Optical Communication for Remote Underwater Robot Operation*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pp. 4017-4022 (2010).
- [13] FOSSEN (T.I.). – *Marine Control Systems : Guidance, Navigation and Control of Ships, Rigs and Underwater Vehicles*. Marine Cybernetics, As Trondheim (2002).
- [14] PETRES (C.), ROMERO-RAMIREZ (M.-A.), PLUMET (F.) et ALESSANDRINI (B.). – *Modeling and reactive navigation of an autonomous sailboat*. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), pages 3571-3576 (2011).
- [15] LASNE (L.). – *Électrotechnique et énergie électrique – Notions fondamentales – Machines – Réseaux*. Collection : Sciences Sup, Dunod Éditeur, 2^e édition, 304 pages (2013).
- [16] NEWMAN (J.N.). – *Marine Hydrodynamics*. MIT Press, Cambridge, 418 pages (1977).
- [17] MAALOUF (D.), CREUZE (V.) et CHEMORI (A.). – *Feedforward Inertial Actuation for Roll Stabilization of an Underactuated Underwater Vehicle*. International Journal of Robotics and Automation (2014).
- [18] MAALOUF (D.), CREUZE (V.) et CHEMORI (A.). – *A Novel Application of Multivariable L1 Adaptive Control : from Design to Real-Time Implementation on an Underwater Vehicle*. IROS 2012, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vilamoura, Portugal, pages 76-81 (2012).
- [19] SLOTINE (J.J.) et LI (W.). – *Applied nonlinear control*. Prentice-Hall, première édition (1991).

À lire également dans nos bases

BOYER (F.), ALAMIR (M.), CHABLAT (D.), KHALIL (W.), LEROYER (A.) et LEMOINE (P.). – *Robot anguille sous-marin en 3D*. [S 7 856] (2006).

ESCHER (A.-C.). – *Intégration du GPS avec les systèmes de navigation inertielle*. [TE 6 725] (2009).

FAYET (M.). – *Simulation des mécanismes – Topologie, géométrie, cinématique*. [AF 5 050] (2006).

FILLIAU (G.), BONDU (A.) et MAZODIER (L.). – *Le navire tout électrique – Propulsion et production d'énergie*. [D 5 610] (2000).

FILLIAU (G.), BONDU (A.) et MAZODIER (L.). – *Le navire tout électrique – État de l'art des composants*. [D 5 615] (2001).

LETELLIER (P.) et BONDU (A.). – *Navire tout électrique – Évolutions et systèmes de conduite*. [D 5 620] (2012).

BESANÇON-VODA (A.) et GENTIL (S.). – *Régulateurs PID analogiques et numériques*. [R 7 416] (1999).

BIANNIC (J.-M.) et FOSSARD (A.). – *Commande en régime glissant*. [S 7 435] (2005).

Événements

Salon/conférence : SeaTech Week – Cet évènement se tient tous les deux ans (années paires), à l'automne, à Brest (France). Il rassemble plusieurs séminaires et *workshops* scientifiques et technologiques, ainsi qu'une exposition importante de matériels dédiés à l'industrie marine et sous-marine.

<http://www.seatechweek.com/>

Salon/conférences : Oceanology International – Cet évènement se tient tous les deux ans à Londres (Royaume-Uni).

<http://www.oceanologyinternational.com>

Conférence : OCEANS IEEE/MTS Conference – Organisée par l'IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) et la MTS (*Marine Technology Society*), cette conférence internationale se tient deux fois par an. Elle rassemble des présentations scientifiques et une importante exposition de matériels. La sélection des présentations est faite sur résumé.

<http://www.oceansconference.org/>

Compétition/conférence : WRSC / IRSC (*World Robotic Sailing Championship and International Robotic Sailing Conference*) – Championnat du monde de robots voiliers et conférence internationale sur les robots voiliers (évènement annuel à localisation géographique variable).

<http://www.roboticsailing.org/>

Course transatlantique pour robots voiliers autonomes : *The Microtransat Challenge* est une compétition ouverte en permanence, aussi bien dans le sens Europe-Amérique que dans le sens Amérique-Europe.

<http://www.microtransat.org/>

Annuaire

Constructeurs – Fournisseurs – Distributeurs (liste non exhaustive)

Positionnement et communication acoustiques

ACSA (bouées de positionnement GIB-Lite), France :

<http://www.acsa-alcen.com/positioning-acoustics/gib-lite>

iXBlue (positionnement), France :

http://www.ixsea.com/en/subsea_positioning/1/gaps.html

Evo Logics (modem et positionnement acoustique), Allemagne :

<http://www.evologics.de>

Sonardyne (positionnement) (Royaume-Uni) :

<http://www.sonardyne.com>

Véhicules (USV, AUV, ROV, Gliders, etc.)

France :

ACSA (*Glider SeaExplorer*), France :

<http://acsa-alcen.com/robotics/seaexplorer>

CISCREA (ROV, éclairage, etc.), Toulon, France :

<http://ciscrea.net/>

Cybernetix, Marseille, France :

<http://www.cybernetix.fr/>

DCNS (sous-marins, etc.), France :

<http://fr.dcnsgroup.com/>

ECA Robotics (USV, AUV, ROV), Toulon, France :

<http://www.eca-robotics.com>

ECA Hytec (ROV), France :

<http://www.ecahytec.com/>

Robotswim (Poisson Jessiko) :

<http://www.robotswim.com/>

RTSys (projet COMET), France :

<http://www.rtsys.eu/en/>

Subsea Tech (ROV), Marseille, France :

<http://www.subsea-tech.com/>

International :

Bluefin Robotics (AUV) :

<http://www.bluefinrobotics.com/>

Festo (méduse Aquajelly) :

<http://www.festo.com/>

iRobot (*SeaGlider*) :

<http://seaglider.washington.edu/products.html>

Kongsberg (*AUV Remus et Hugin*) :

<http://www.km.kongsberg.com/>

Liquid Robotics (*wave gliders*) :

<http://liquidr.com/>

OceanServer (AUV Iver 2) :

<http://www.ocean-server.com/>

Ocean Modules (ROV à 6 ddl) :

<http://www.ocean-modules.com/rov.html>

SeaRobotics (USV) :

<http://www.searobotics.com/index.php/products/unmanned-surface-vehicles>

Teledyne (Gavia AUV) :

<http://www.teledynegavia.com/>

Woods Hole Oceanographic Institution (Slocum Glider) :

<http://www.whoi.edu/main/slocum-glider>

Sonars et perception acoustique

BlueView (sonars) :

<http://www.blueview.com/>

EdgeTech (sonar lateral) :

<http://www.edgetech.com/edgetech/gallery/category/side-scan-sonar-systems>

Imagenext (sonars) :

<http://www.imagenex.com/>

IxSea (Sonar synthétique), France :

<http://www.ixsea.com/en/geophysics/3/shadows.html>

Kongsberg (sonars) :

<http://www.km.kongsberg.com/>

L3-Klein (sonar lateral) :

<http://www.l-3mps.com/klein/sidescansonar.aspx>

MarineSonic (sonar lateral) :

<http://www.marinesonic.com/index.html>

Tritech (sonars) :

<http://www.tritech.co.uk/>

Marine Electronics Ltd (sonars) :

<http://www.marine-electronics.co.uk>

Centrales inertielles (type MEMS)

SBG Systems, France :

<http://www.sbg-systems.com/>

XSens, Pays-Bas, distribué en France par Cadden :

<http://www.xsens.com/>

Centrales inertielles (à gyroscopes à fibre optique)

Safran (Sagem), France :

<http://www.sagem.com/spip.php?rubrique5&lang=en>

ixBlue, France :

<http://www.ixblue.com/business/area/inertial-products>

Optiques sous-marines asphériques

Société Etrex'Vision, France :

<http://extrem-vision.com/objectif-plongee-thalaceter/>

Organismes – Fédérations – Associations (liste non exhaustive)

GDR Robotique, Axe Robotique Marine et Sous-Marin du GT2

Ce groupement de recherche du CNRS (Centre nationale de la recherche scientifique) a pour objectif de faciliter les échanges entre scientifiques, mais également avec l'industrie. Plusieurs réunions thématiques sont organisées chaque année (participation libre). Possibilité de s'inscrire au GT2 pour recevoir les actualités et les dates de réunion.

http://www.gdr-robotique.org/groupes_de_travail/?id=22

euRobotics AISBL, Marine Robotics Topic Group

L'association euRobotics organise des échanges scientifiques/industries (*European Robotics Forum*) et assure la promotion de la robotique (semaine européenne de la robotique notamment) auprès du grand public et des institutions européennes. En son sein, le *Topic Group* (groupe d'intérêt) *Marine robotics* rassemble industriels et chercheurs autour du thème de la robotique marine.

<http://www.eurobotics-project.eu/>

IEEE Oceanic Engineering Society

Cette association professionnelle internationale est une branche de l'IEEE. Elle publie l'excellent *IEEE Journal of Oceanic Engineering* et participe à l'organisation de plusieurs conférences internationales (dont OCEANS).

<http://www.oceanicengineering.org/>

SNAME – Society of Naval Architects and Marine Engineers

Depuis 1893, cette association professionnelle a pour objet la diffusion de connaissance et les échanges professionnels dans le domaine de la construction navale et l'ingénierie marine.

<http://www.sname.org/home>

Laboratoires – Bureaux d'études – Écoles – Centres de recherche (liste non exhaustive, ordre alphabétique)

En France

Becom-d (Bureau d'études en conception mécanique & design), St Jean de la Blaquière

<http://www.becom-d.fr/>

Biorob, BioRobotics Laboratory, École polytechnique fédérale de Lausanne (suisse)

<http://biorob.epfl.ch/research/amphibious>

ENIB, École nationale d'ingénieurs de Brest, département Informatique Industrielle, Brest

<http://www.enib.fr/>

ESIEA (École supérieure informatique électronique automatique), Ivry-sur-Seine

<http://www.esiea.fr/Esiea.cml>

GeorgiaTech Lorraine, UMI 2958 CNRS / *Georgia Institute of Technology* (Atlanta), Metz

<http://www.lorraine.gatech.edu/>

GIPSA-LAB (Grenoble images parole signal automatique), UMR5216, CNRS, université de Grenoble, Grenoble

<http://www.gipsa-lab.fr/>

I3S (Laboratoire d'informatique signaux et systèmes de Sophia Antipolis), UMR7271, CNRS, université de Nice-Sophia Antipolis

<http://www.i3s.unice.fr/>

Ifremer, unité Systèmes sous-marins, La Seyne-sur-mer

<http://www.ifremer.fr/cmsm>

Ifremer, REM/RDT recherches et développements technologiques, Brest

<http://www.ifremer.fr/>

IRCCyN (Institut de recherche en communication et cybernétique de Nantes, département Robotique), UMR6597, CNRS, École centrale de Nantes, École des mines de Nantes, université de Nantes

<http://www.irccyn.ec-nantes.fr/>

ISAE (Institut supérieur de l'aéronautique et de l'espace), département Math info automatique (DMIA), département Aérodynamique énergétique propulsion (DAEP), Toulouse

<http://www.isae.fr/>

ISIR : Institut des systèmes intelligents et de robotique, UMR7222, CNRS, université Pierre et Marie Curie, Paris

<http://www.isir.upmc.fr/>

LAAS (Laboratoire d'analyse et d'architecture des systèmes), Groupe RIS : *Robotics and InteractionS*, UPR8001 CNRS, Toulouse

<http://www.laas.fr/>

Laboratoire Brest ISEN, ISEN (Institut supérieur de l'électronique et du numérique), Brest

<http://www.isen.fr/>

LABSTICC (Laboratoire en sciences et techniques de l'information, de la communication et de la connaissance), UMR6285 CNRS, Télécom Bretagne, université de Bretagne Occidentale (UBO), départements IHSEV et TASM, Brest

<http://www.labsticc.fr/>

LIRMM (Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier), UMR5506, CNRS, université de Montpellier

<http://www.lirmm.fr/>

LOV, (Laboratoire d'océanographie de Villefranche), Groupe de travail OAO (*Oceanographic Autonomous Observations*), équipe optique marine et télé-détection, UMR7093 au sein de l'Observatoire océanologique de Villefranche, CNRS, université Pierre et Marie Curie, Villefranche-sur-mer

<http://www.obs-vlfr.fr/LOV/>

OBLiC (Observatoire de la biodiversité littorale et côtière), Station biologique de Roscoff, UMR 7139, 7144, 7150 et USR3151, CNRS, université Pierre et Marie Curie, Roscoff

<http://www.sb-roscoff.fr/observation-du-milie.html>

ONERA (Office national d'études et de recherches aérospatiales), Toulouse

<http://www.onera.fr/>

Tecnalia France, fondation de recherche privée à but non lucratif, Montpellier

<http://www.tecnalia.com>

À l'étranger :

AQUA research project, McGill University (Montreal), York University et Dalhousie University (Halifax), Canada

<http://www.aquarobot.net/>

Australian Centre for Field Robotics, University of Sydney, Australie

<http://www.acfr.usyd.edu.au/index.shtml>

AUV lab, Massachusetts Institute of Technology, USA

<http://auvlab.mit.edu/>

Centre for Biorobotics, Tallinn University of Technology, Estonie

<http://www.ttu.ee/en/?id=52131>

ROBOTS MARINS ET SOUS-MARINS

CIRS – Underwater vision and Robotics, University of Girona, Espagne
<http://vicorob.udg.edu/research/cirs-uw-vision-robotics/>
 DSOR-Dynamical Systems and Ocean Robotics Lab, Lisboa Institute for Systems and Robotics
<http://dsor.isr.ist.utl.pt/>
 Field Robotics Laboratory, University of Hawaii at Manoa, USA
<https://sites.google.com/a/hawaii.edu/fri/>
 GRAAL, Genoa Robotics and Automation Laboratory, Engineering Faculty of Genoa, Italie
<http://www.graal.dist.unige.it/>
 ISSIA – Institute of Intelligent Systems for Automation, CNR, Italie
<http://www.issia.cnr.it/wp/>
 LAFMIA, CINVESTAV, Mexique
<http://lafmia.imag.fr/>
 MBARI : Monterey Bay Aquarium Research Institute, USA
<http://www.mbari.org/>
 Naro Nautical Robot, ETH Zurich (Swiss Federal Institute of Technology), Suisse
<http://www.naro.ethz.ch/p2/index.html>

NATO Undersea Research Center, Italie
<http://www.cmre.nato.int/>
 Ocean Systems Group, Universidade do Porto, Portugal
<http://oceansys.fe.up.pt/>
 Ocean Systems Laboratory, Heriot Watt University, Royaume-Uni
<http://osl.eps.hw.ac.uk/>
 Seatech – The Institute for Ocean & Systems Engineering, Florida Atlantic University, USA
<http://www.ome.fau.edu/seatech-the-institute-for-ocean-systems-engineering>
 Stanford Robotics – Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, USA
<http://cs.stanford.edu/groups/manips/>
 URA Laboratory, Underwater Technology Research Center, Institute of Industrial Science, The University of Tokyo, Japon
<http://underwater.iis.u-tokyo.ac.jp/Welcome-e.html>
 WHOI : Woods Hole Oceanographic Institution, USA
<http://www.whoi.edu/>

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre**, **leurs compléments et mises à jour**, et bénéficiez des **services inclus**.



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com