

Les robots dans les milieux extrêmes : l'émergence des robots sous-marins

Vincent Rigaud

De tout temps, l'homme a cherché à explorer les fonds marins et à intervenir sous la mer. Océanographes, archéologues, chasseurs de trésors, militaires, industriels, inventeurs et explorateurs ont ainsi fait preuve d'imagination pour découvrir les océans et exploiter « au mieux » leurs ressources.

La plongée « en scaphandre » fut l'un des moyens utilisés pour pénétrer ce milieu, hostile à l'organisme en raison des contraintes physiques et physiologiques liées à la pression. Celle-ci augmente en effet de 1 bar tous les 10 mètres. Très vite, savants, ingénieurs et inventeurs ont cherché des solutions pour protéger l'homme de ce milieu extrême afin qu'il puisse y réaliser des tâches de plus en plus complexes à de plus grandes profondeurs sans recourir à l'immersion de plongeurs.

L'histoire s'est construite autour d'une succession d'innovations, des premiers submersibles habités, inventés par les pionniers, aux sous-marins scientifiques modernes capables d'atteindre les fosses les plus profondes. Dans les années 1970, le développement de l'industrie pétrolière *offshore* a dynamisé l'apparition de robots téléopérés, reliés à la surface par un câble. Depuis plus d'une décennie, l'émergence de nouvelles filières d'engins autonomes a révolutionné la productivité des opérations sous-marines et a ouvert de nouveaux horizons, en permettant par exemple de longues plongées sous la glace des pôles. Ces robots sont les héritiers des premières torpilles « sous-marines autopropulsées » telles celle de l'ingénieur anglais Robert Whitehead (1864).

Les premiers « sous-marins » habités

Dès 1620, le Hollandais Cornelius Van Drebbel proposa une barque amphibie à des fins militaires dont les essais furent réalisés en subsurface de la Tamise. Il fut suivi en 1692 par Denis Papin avec son sous-marin l'*Urinator*, tonneau de bois cerclé de fer, étanche et résistant à la pression, lesté et suspendu sous un câble. Ce dispositif a inauguré le principe du recyclage d'air par pompe centrifuge. En 1776, David Bushnell inventa outre-Atlantique le premier sous-marin de combat, la *Tortue*, ainsi nommé en raison de la forme de sa coque, constituée de deux demi-« carapaces » assemblées pouvant accueillir un pilote. Pour la première fois, le « sous-marin » est équipé d'un système de ballast lui permettant de prendre la plongée, d'une pompe à air pour chasser l'eau, d'une propulsion par hélice manuelle et d'une tarière pour fixer une charge explosive sur les coques ennemies. En 1797, Robert Fulton, considéré comme l'inventeur du navire à vapeur, créa le *Nautilus*, premier sous-marin en acier recouvert de cuivre également équipé d'une charge explosive et source d'inspiration quelque soixante-dix ans plus tard pour Jules Verne.

Depuis, l'évolution technologique des sous-marins habités s'est poursuivie, en particulier avec le développement des submersibles militaires à propulsion mécanique (humaine), électrique, thermodynamique en circuit fermé (Diesel, Rankine, Sterling), hybride ou nucléaire, et avec la mise au point de coques étanches et de matériaux de flottabilité de plus en plus performants.

De la *Bathysphère* aux bathyscaphes

Au XX^e siècle, les pionniers furent William Beebe et Otis Barton, scientifiques-explorateurs américains qui atteignirent en 1934 la profondeur de 908 mètres avec leur *Bathysphère*. Cet engin était constitué d'une sphère d'acier, munie de hublots et de projecteurs, suspendue au bout d'un câble. La fragilité de ce dernier pouvait toutefois poser problème, et le physicien suisse Auguste Piccard (qui inspira le personnage du professeur Tournesol à Hergé) imagina en 1940 le bathyscaphe. Véritable « dirigeable sous-marin », ce submersible était constitué d'une sphère habitée en acier intégrant un ou plusieurs hublots coniques permettant aux pilotes d'observer le milieu marin. Une coque remplie d'hydrocarbures plus légers que l'eau assurait la flottabilité de l'ensemble. Cependant le volume et la masse de ce flotteur « liquide » étaient tels que les bathyscaphes pesaient plusieurs centaines de tonnes, ce qui excluait la possibilité de les charger à bord d'un navire et nécessitait leur remorquage en surface.

Une longue lignée d'ingénieurs militaires et civils français et américains engagèrent alors une course à la plongée habitée la plus profonde. En 1960, Auguste Piccard et Don Walsh, à bord du bathyscaphe *Trieste*

acheté par l'armée américaine, atteignirent 10 916 mètres de fond dans la fosse des Mariannes, record jusque-ici inégalé. Deux ans plus tard, le bathyscaphe français *Archimède*, de l'ingénieur Pierre Willm et du commandant Georges Houot, descendit à 9 545 mètres dans la fosse des Kouriles.

Année	Véhicule	Profondeur	Poids
1930-1934	<i>Bathysphère</i>	908 mètres	2,25 tonnes
1948	<i>FNRS II</i>	4 000 mètres	40 tonnes
1954-1961	<i>FNRS III</i>	4 000 mètres	90 tonnes
1954-1963	<i>Trieste</i>	10 916 mètres	150 tonnes
1961-1974	<i>Archimède Trieste II</i>	9 545 mètres	200 tonnes

Soucoupes plongeantes, submersibles « de poche » et sous-marins habités industriels

L'apparition des « mousses syntactiques » dans les années 1970 a été à l'origine d'une importante rupture technologique, révolutionnant l'architecture des submersibles. Ces mousses, constituées de microbilles de verre tenues dans une résine, résistent en effet à la pression tout en assurant une flottabilité positive. Il est alors possible de concevoir, sur la base de sphères habitées quasi-équivalentes à celles des premiers bathyscaphes, des sous-marins compacts et légers directement déployés depuis les navires.

Soucoupes plongeantes et submersibles succèdent alors aux bathyscaphes dans les années 1960-1970. La première soucoupe, la *SP 350*, du commandant Jacques-Yves Cousteau, peut descendre à 350 mètres à partir de la *Calypso*. La plupart de ces véhicules sont conçus pour explorer les mille premiers mètres de l'océan. Certains vont plus loin, comme les *Pisces* canadiens (2 000 mètres), le *Deep Quest*, de la société Lockheed, qui a atteint 2 400 mètres en 1967, ou la soucoupe plongeante *Cyana*, de l'Ifremer, qui descend jusqu'à 3 000 mètres.

Les progrès continus dans le domaine des batteries¹ et la capacité d'intégrer certains équipements en équipression² ont permis d'augmenter l'autonomie énergétique de ces engins. Les progrès sur les alliages à base d'aluminium et de titane ont par ailleurs contribué à optimiser les masses et la résistance à la pression des sphères habitées.

L'exploitation de champs pétroliers *offshore* de plus en plus profonds a temporairement conduit à utiliser des sous-marins habités à la place des plongeurs à saturation³. Le *Saga* (1987) a été le seul prototype de sous-marin industriel, de type « crache plongeur », capable de réaliser des opérations avec des plongeurs sur les sites *offshore*. Conçu par la Comex et l'Ifremer, il déplaçait 550 tonnes en plongée, accueillait six personnes et pouvait intervenir jusqu'à 600 mètres. Le *Saga* comprenait également un compartiment hyperbare pour six plongeurs en saturation. Son autonomie opérationnelle était d'environ deux semaines, soit 280 kilomètres sans faire surface, grâce à un générateur à cycle Stirling. Mais les sous-marins habités industriels, trop onéreux et limités en immersion, furent rapidement remplacés dans les années 1980 par des robots téléopérés appelés ROV (*Remotely Operated Vehicle*).

Des sous-marins habités profonds toujours d'actualité

À partir des années 1980, une nouvelle génération de sous-marins a permis d'atteindre les 6 000 mètres de profondeur grâce aux progrès constants des matériaux et aux nouveaux équipements. Le plus connu est le *Nautilus* (1984), sous-marin français de 18,5 tonnes de l'Ifremer. En 25 ans de service, il a réalisé plus de mille huit cents plongées. Il a permis des découvertes scientifiques majeures comme les sites hydrothermaux et a réalisé les premières plongées sur l'épave du *Titanic*. Font également partie de ce club très fermé le *Sea Cliff* américain (25,4 tonnes), les *Mir I* et *Mir II* soviétiques, connus pour avoir plongé sous la surface du pôle Nord et qui ont été utilisés par James Cameron pour son film *Titanic*, le *Shinkai* japonais (26 tonnes), capable de descendre à 6 500 mètres, et le *Jiaolong* chinois, en cours de qualification, élaboré pour atteindre 7 000 mètres. Ces engins, à la conception et aux performances très proches les uns des autres, ont en moyenne une dizaine d'heures d'autonomie et peuvent transporter plusieurs passagers (généralement deux pilotes et un scientifique). Ils sont équipés de projecteurs, d'appareils de prises de vues et de pinces qui leur

¹ Passage des batteries acide/plomb aux batteries nikel/cadmium, zinc/argent puis, de nos jours, lithium-ion.

² Utilisation de capacités non résistantes à la pression remplies d'une huile incompressible évitant l'usage de coques résistantes lourdes.

³ On parle de plongée à saturation quand le scaphandre est alimenté d'un mélange gazeux pour augmenter le temps de travail ; le plongeur doit subir une décompression à l'issue de ses travaux sous l'eau.

permettent de faire des manipulations *in situ*.

Très récemment, des explorateurs fortunés ont renoué avec l'esprit des pionniers en cherchant à dépasser la performance du *Trieste* de 1960. En mars 2012, James Cameron a ainsi établi un record de profondeur en solitaire à bord du *DeepSea Challenger*, recroquevillé dans une sphère d'environ 1 mètre de diamètre. Le réalisateur a atteint 10 898 mètres, sans toutefois battre le record de Piccard et Walsh et sans révolution technologique majeure. Richard Branson, créateur de Virgin, a dernièrement dévoilé son futuriste *Virgin Oceanic*, dont les tests sont en cours. Ce véritable « avion sous-marin » repose sur une conception audacieuse, avec une sphère habitée « grand angle », réalisée en matériaux composites, qui contraste avec les petits hublots des submersibles profonds traditionnels.

Les robots téléopérés

Malgré ces exploits individuels, les fonds océaniques restent encore peu connus. Le temps cumulé des plongées à grandes profondeurs par des sous-marins habités ne totalise que quelques dizaines de milliers d'heures, ce qui est inférieur au temps passé par l'homme dans l'espace depuis la mise en service des premiers véhicules spatiaux⁴. Dans ces milieux inhospitaliers, l'exploration doit associer sécurité, fiabilité et économie. C'est dans ce contexte que se sont développés les robots sous-marins inhabités appelés ROV⁵.

Les ROV sont des engins robotisés téléguidés depuis la surface à l'aide d'un câble. Ils envoient leurs informations, images et mesures diverses en temps réel par ce câble et reçoivent les ordres de pilotage de leurs équipements, propulseurs et télémanipulateurs robotisés depuis un poste de commande embarqué sur un navire porteur. Le câble permet également de les alimenter en énergie électrique depuis le navire. Ils peuvent, dans ces conditions, plonger pour de longues périodes.

Les ROV forment aujourd'hui la majorité des robots sous-marins opérationnels. Depuis plus d'une trentaine d'années, ces robots sous-marins ont été mis au point principalement sous la poussée des applications de l'industrie pétrolière *offshore*. On dénombre plusieurs milliers de ROV pouvant intervenir jusqu'à 3 000 mètres (installation, inspection-maintenance-réparation d'équipements sous-marins, assistance au forage, à la pose de câbles ou de conduites...). On parle d'ObsROV dans le cas de ROV dédiés à l'observation, et de WorkROV pour désigner les engins « de travail », en général plus lourds et plus puissants que les précédents, équipés de bras télémanipulateurs.

L'architecture de ces sous-marins est très largement dominée par le dimensionnement du câble, en fonction de l'immersion et de la puissance nécessaire. Certains ROV équipés de roues, de chenilles ou de vis d'Archimède, sont spécialisés dans l'ensouillage (protection) et la maintenance de câbles.

Dans le domaine scientifique, tous les robots téléopérés sont représentés, du plus petit au plus gros. Mais l'intérêt pour l'exploration de la majeure partie des fonds océaniques c'est accompagné du développement de ROV pouvant atteindre 6 000 mètres et plus. Le record a été réalisé par le *Kaiko* japonais, capable de plonger à 11 000 mètres. Malheureusement, celui-ci a été perdu à la suite d'une rupture de câble lors du passage d'un cyclone en 2003. L'engin téléopéré *Victor 6000* de l'Ifremer est un équipement opérationnel jusqu'à 6 000 mètres de profondeur. Il réalise des missions équivalentes à celles confiées au *Nautile*, mais sans la présence de l'homme et sur des périodes pouvant atteindre trois journées au fond, les pilotes se relayant en surface en quart dans le poste de commande. Ce véhicule de 4 tonnes est équipé de moyens de télémanipulation très performants et peut embarquer jusqu'à 600 kilogrammes de charge utile scientifique répartie dans des modules interchangeables en mer en fonction des missions. Il peut être doté d'une instrumentation spécifique pour des opérations de cartographie à très haute résolution. *Victor 6000* a ainsi réalisé le suivi d'un grand escarpement sur 300 kilomètres en mer de Marmara, découvert des récifs coralliens froids et profonds au large de l'Irlande, cartographié un volcan de boue au large des côtes norvégiennes, et il a contribué à découvrir des sources sous-marines d'hydrogène jusque-là inconnues.

Véhicules autonomes

Pour augmenter la productivité, une solution consiste à construire des submersibles de plus en plus autonomes et indépendants du navire, pour lesquels le « cordon ombilical » est supprimé. Ceci est encore plus crucial pour les opérations difficiles, en particulier sous la glace ou dans des zones très encombrées où le déploiement des « laisses » est complexe voire impossible. Couper l'ombilical revient à rendre le système

⁴ Hors temps passé à bord de la Station spatiale internationale (ISS).

⁵ Remotely Operated Vehicle : Engin Téléopéré à distance

autonome sur les plans énergétique (en utilisant des batteries), décisionnel (en automatisant le pilotage) et de la communication « sans fil » (avec le recours à des équipements acoustiques). Cette émancipation de la surface est réalisée avec les sous-marins autonomes (AUV – *Autonomous Underwater Vehicles*) ou supervisés et téléopérés par acoustique (SUV – *Supervised Underwater Vehicles*). Ces robots sont actuellement en plein essor. Ils ont mûri technologiquement dans le cadre de programmes de recherches militaires, en particulier aux États-Unis, et sont aujourd'hui en voie d'utilisation opérationnelle pour des tâches de « cartographie » (*survey* au sens large) dans l'industrie *offshore*, offrant ainsi une alternative économique aux engins remorqués.

Typologie des engins sous-marins robotisés autonomes

Avec les progrès de l'automatisation, des submersibles capables de trouver seuls une cible, de s'en approcher et de l'inspecter ont été créés. On parle dans ce cas de véhicules « d'inspection ». Des prototypes ont démontré qu'un engin autonome pouvait aller jusqu'à réaliser des tâches complexes de télémanipulation (avec des bras robots) comparables à celles réalisées avec un pilote sur un ROV. On parle alors d'AUV « d'intervention ».

Les enjeux économiques, scientifiques et sociaux liés par exemple à l'influence du climat, à l'exploitation durable des ressources (halieutiques⁶, minérales et pétrolières) et aux préoccupations environnementales, donnent une impulsion nouvelle à l'observation et à la surveillance « intensive » du milieu marin, dans le cadre de programmes scientifiques. Ces constatations ont conduit l'Ifremer à développer une filière d'engins de surveillance autonomes reconfigurables, d'un fonctionnement simple et économique. Dans ce cadre, deux sous-marins de type AUV de « survey » baptisés *Aster^X* et *Idef^X* ont déjà cartographié plus de 14 000 kilomètres avec divers capteurs (sonars, sondeurs, etc.). Ces véhicules de forme torpille peuvent plonger jusqu'à 3 000 mètres et parcourir 100 kilomètres sur le fond en toute autonomie grâce à des batteries lithium-ion très performantes. Assimilés à de « gros porteurs » en termes de « fret scientifique », puisqu'ils peuvent embarquer jusqu'à 200 kilogrammes de « charges utiles » interchangeable d'une mission à l'autre, ces robots sont comparables à une navette spatiale qui emporte dans sa soute divers instruments à chaque lancement. Ils ont servi à cartographier des monts et des volcans sous-marins, des glissements de terrains, des sources de méthane et de gaz, des zones de production de minerais, de pétrole ou de gaz, mais ils ont été également utilisés par des physiciens pour mesurer des indicateurs physicochimiques et biologiques (température, salinité, courant, paramètres chimiques, couches planctoniques), et par des halieutes pour évaluer des densités de ressources. Ils ont par ailleurs exploré des épaves comme la *Lune*, trois-mâts de Louis XIV coulé en 1664 au large de Toulon.

Aujourd'hui, les recherches se poursuivent pour augmenter l'autonomie et l'intelligence embarquée de ces AUV. Une pile à combustible utilisant de l'hydrogène et de l'oxygène a par exemple été installée sur une version plus volumineuse d'*Aster^X*, portant son autonomie à plus de 300 kilomètres. Dans le domaine des engins à grande autonomie, il faut noter le cas des planeurs sous-marins dits *gliders*. Ces submersibles, généralement de petite taille, sont dépourvus d'hélice. Ils se déplacent à l'aide d'un ballast mobile où s'opère un transfert d'huile d'une coque humide à une coque étanche. Avec ses ailes, le *glider* peut se déplacer plusieurs mois sur de très grandes distances⁷, avec un minimum d'énergie. Il revient régulièrement à la surface et utilise un satellite pour se positionner et dialoguer avec la terre. Un « pilote » peut modifier la trajectoire à chaque retour en surface en jouant sur des gouvernes ou sur la position du centre de gravité des batteries. Cependant, les *gliders* peuvent dériver entre deux cycles et ils ne sont visibles par l'opérateur que par intermittence. Ils ont également une capacité de charge utile limitée, mais leur emploi pour cartographier les paramètres physiques et chimiques est potentiellement riche d'enseignements sur la circulation océanique.

Robots hybrides

Actuellement, des versions hybrides de *gliders* et d'AUV de grande autonomie (1 000 kilomètres) utilisant des piles plus denses que les batteries sont en développement, de même que de nouveaux concepts d'engins hybrides. Ces derniers combinent les avantages des véhicules autonomes et des systèmes téléopérés. Citons par exemple le *Swimmer*, un robot sous-marin de type AUV transportant un engin téléopéré de type ROV. La

⁶ Qui concerne la pêche.

⁷ suivant des profils cycliques de montée et de descente en « V », dans la colonne d'eau,

navette *AUV-Swimmer* va installer ce ROV sur le fond et le connecter sur une station sous-marine reliée par un câble à un navire pétrolier ou à une plate-forme. Il est alors possible de passer des signaux entre le fond et la surface et de transmettre de l'énergie de la surface vers le fond.

La Wood Hole Oceanographic Institution a créé un robot hybride pour des missions ultra profondes (jusqu'à 11 000 mètres) nommé *Nereus*. Ce véhicule à batterie plonge en déroulant une fibre optique de quelques millimètres de diamètre comme un ROV. En fin de plongée, le lien haut débit de la fibre optique est cassé et l'engin revient à la surface en mode libre comme un AUV.

L'Ifremer étudie aussi une nouvelle génération de sous-marins hybrides, capables de plonger soit en mode autonome, soit en mode téléopéré à l'aide d'une fine fibre optique dont la longueur est gérée en permanence depuis le véhicule. Ces sous-marins, baptisés H-ROV, pourront être déployés à partir de navires de petite taille pas nécessairement spécialisés (navires sans positionnement dynamique), ce qui permet d'optimiser les coûts d'opération et la disponibilité de ces robots.

Conclusions

Les évolutions technologiques et la robotisation croissante ont contribué à améliorer nos capacités d'intervention sous la mer. Comme dans l'espace, la question de la place de l'homme dans le milieu continue de se poser. En exploration en *terra incognita*, la proximité de l'homme avec l'environnement apparaît séduisante, car la présence au fond reste intuitivement utile aux explorateurs.

La vision directe au travers d'un hublot dans un submersible et l'intégration spatiotemporelle de la plongée dans le cerveau d'un océanographe expérimenté n'est pas encore concurrencée par la reconstruction stéréoscopique d'une scène réalisée par un robot distant ou par la vision au travers d'écrans multiples. Les deux modes d'exploration et de compréhension qualitative et quantitative se complètent et s'enrichissent mutuellement. L'usage des AUV durant la nuit pour préparer une plongée du *Nautilus* la journée suivante est ainsi souvent pratiqué pour optimiser l'organisation des campagnes océanographiques. Pour des opérations longues ou répétitives, les robots apportent un gain majeur en termes de capacité et de productivité.

Par certains aspects, l'exploration des océans signifie conquête ou maîtrise de ses ressources par l'homme. La recherche scientifique et les intérêts géostratégiques et économiques se juxtaposent, voire cohabitent. Il existe dans ce domaine le syndrome du « planté de drapeau », du « marquage humain », bien plus porteur de symbole quand l'homme est le plus proche possible du milieu. Le regain d'intérêt des grands pays émergents pour les submersibles profonds habités illustre cet aspect de plus en plus fortement dans un contexte d'intense compétition à l'échelle internationale.