

# Pénétrer et agir dans le milieu marin profond

---

Lucien LAUBIER

La légende veut qu'Alexandre le Grand, de retour de sa dernière grande campagne de conquête en Inde, ait été le premier homme à pénétrer sous la mer abrité dans une cloche à plongeur rudimentaire. Cette plongée a eu lieu, nous indiquent les chroniqueurs du Moyen Âge, dans le Golfe Persique, à la fin de l'année 325 avant J.-C. A l'appui de cette relation, Aristote, dans un livre des *Problèmes*, mentionne qu'un vase retourné et enfoncé dans l'eau conserve l'air qu'il contient en surface, fournissant une réserve d'air frais grâce à laquelle des hommes peuvent séjourner sous la surface de la mer. Alexandre obéissait au même souci d'aller toujours plus loin qui l'avait mené jusqu'au bord de l'Indus.

Des mobiles plus communs animaient les plongeurs de l'Antiquité qui récoltaient le corail rouge de Méditerranée déjà apprécié pour la bijouterie ou les filaments dorés qui assurent la fixation au fond des grandes coquilles en forme de pointe de flèche des pinna dont on savait fabriquer des tissus légers et résistants, ou ces plongeurs militaires qui s'aident d'outres de peau de bête gonflées d'air pour échapper aux regards des adversaires sous les eaux troubles des fleuves et dont les exploits sont fidèlement décrits sur des bas-reliefs assyriens.

Exploiter les ressources naturelles de la mer, combattre : ces deux puissants moteurs de la conquête par l'homme de l'univers sous-marin se sont manifestés depuis plus longtemps encore. L'exploit de la jeune Grecque Cyana qui réussit, avec l'aide de son père Scyllias à trancher en plongée les câbles des mouillages des navires de Xerxès en l'An 480 avant J.-C., et contribua ainsi, à la défaite du Roi des Rois dans la baie de Salamine, a été rapporté par Hérodote : en hommage à son courage, un sous-marin profond français porte aujourd'hui son nom.

Ainsi, dès l'Antiquité, les hommes apprenaient à percer le mystère des profondeurs de l'océan, à en rapporter des ressources variées et à s'y affronter. Il faudra attendre la moitié du 19e siècle pour qu'une nouvelle motivation apparaisse avec la pose, en 1851, du premier câble sous-marin entre la France et l'Angleterre, suivie quinze ans plus tard par le premier câble transatlantique posé par le Great Eastern : les télécommunications sous-marines.

Au cours des siècles, au fur et à mesure que progressaient les connaissances scientifiques et les techniques de construction, deux méthodes principales furent explorées pour permettre à l'homme de séjourner et de travailler à quelques dizaines de mètres sous l'océan :

- la réalisation d'une enceinte rigide, résistante à la pression et dans laquelle le plongeur demeure à la pression atmosphérique;
- la fourniture au plongeur d'un mélange respiratoire porté à tout instant à la même pression que celle qui s'exerce sur son corps.

La première méthode a donné lieu à des réalisations surprenantes pour l'époque comme le tonneau de Lethbridge datant du 18e siècle ou au scaphandre rigide utilisé avant la dernière guerre mondiale à bord d'un navire spécialisé dans le relevage d'épaves et la récupération de chargements précieux, l'Artiglio. Dans son principe, c'est également l'origine des sous-marins, dont les premières réalisations

remontent au début du 17<sup>e</sup> siècle avec le sous-marin construit par le Hollandais DREBBEL d'après les principes définis dès 1578 par l'Anglais BOURNE.

La seconde méthode a été longtemps limitée par l'absence d'une technologie adéquate à la cloche à plongeur; un des premiers chantiers sous-marins est celui qui permit de récupérer vers 1640 la plus grande partie des canons du navire suédois *Wasa*, coulé par 35 mètres de profondeur le jour même de son premier appareillage dans le port de Stockholm. Avec le développement au début du 19<sup>e</sup> siècle de scaphandres souples permettant de plonger à plusieurs dizaines de mètres, apparaissent des accidents de plus en plus fréquents, les accidents de décompression, dont l'explication est apportée au milieu du 19<sup>e</sup> siècle à la suite des remarquables travaux du Français Paul BERT qui identifia la cause des accidents subis par les scaphandriers et les ouvriers travaillant dans des caissons immergés : c'est la dissolution sous pression d'une certaine quantité des gaz respirés qui est à l'origine de ces accidents de décompression.

Jusqu'au début du 20<sup>e</sup> siècle, les profondeurs atteintes par les scaphandriers et les sous-marins restent inférieures à une cinquantaine de mètres. Guère plus en définitive que les profondeurs atteintes couramment par les plongeurs "nus" pour récupérer corail, huîtres perlières ou éponges dans les mers chaudes, en apnée, c'est-à-dire sans respirer au cours de la plongée. Et le plongeur français Mayol est même parvenu à atteindre en 1976 la stupéfiante profondeur de 101 mètres au cours d'une apnée de 3 minutes 10 secondes, en s'aidant, il est vrai, d'un lest de descente et d'un flotteur pour la remontée !

L'aventure moderne de l'intervention sous-marine de l'homme débute avec la conquête de l'océan profond; de façon arbitraire, on peut fixer à 100 mètres environ le début de cette zone caractérisée par l'obscurité presque totale qui y règne.

Nous examinerons successivement les trois moyens de pénétration ou d'intervention de l'homme dans l'océan profond à partir de cette profondeur :

- la plongée en scaphandre souple;
- la plongée en sous-marin ou en scaphandre rigide;
- l'intervention sous-marine par engins télécommandés inhabités et robots.

En même temps, nous évoquerons certaines des applications de chacun de ces moyens.

### *La plongée en scaphandre souple*

Le principe de la plongée en scaphandre souple repose sur la nécessité de fournir au plongeur le mélange gazeux respiratoire à une pression identique à celle du milieu environnant, pour de simples questions de résistance à la pression et de travail respiratoire. En effet, l'inspiration et l'expiration de l'air que nous respirons résultent d'une très faible variation de pression entre le milieu extérieur et le volume des poumons (quelques centièmes d'atmosphère) et il est impossible à un homme immergé de quelques décimètres seulement d'aspirer de l'air fourni à la pression atmosphérique, de la même manière qu'il lui est impossible de rejeter l'air expiré à travers un tuyau immergé à une profondeur identique.

Les appareils à scaphandre, depuis le scaphandre à casque inventé par SIEBE au début du 19e siècle jusqu'au scaphandre autonome moderne perfectionné successivement par DAVIES, LE PRIEUR, DRAEGER, COUSTEAU et GAGNAN et bien d'autres, permettent au plongeur de disposer d'air porté à la pression à laquelle il se trouve. Dans le scaphandre à casque, l'air comprimé en surface est insufflé dans l'habit étanche du plongeur, une soupape d'évacuation laissant sortir l'air en excès; dans le cas du scaphandre autonome, l'air comprimé à haute pression est contenu dans des bouteilles d'acier portées par le plongeur, un détendeur automatique à un ou deux étages permettant d'obtenir l'air à la pression hydrostatique locale. Le premier scaphandre autonome a été construit dès 1865 par deux Français, ROUQUAYROL et DENAYROUZE, mais cette découverte tomba dans l'oubli malgré l'usage qu'en fit Jules Verne dans son roman Vingt mille lieues sous les mers.

*La respiration sous pression ou respiration hyperbare*

Les limites physiologiques de la plongée en scaphandre souple tiennent aux conséquences de la dissolution dans le milieu intérieur des gaz respirés sous pression. L'air atmosphérique est composé pour l'essentiel de 79 % d'azote et de 21 % d'oxygène. A chaque inspiration, les alvéoles pulmonaires se remplissent et une partie de l'oxygène passe dans le sang; en même temps, le sang libère une partie du gaz carbonique qu'il véhicule. Ce double échange fait intervenir le caractère semi-perméable du tissu alvéolaire, les pressions partielles d'oxygène et de gaz carbonique dans l'air respiré tendant à égaler les tensions correspondantes de ces deux gaz dans le sang. L'azote, par contre, n'est l'objet, à la pression atmosphérique, d'aucun échange.. L'azote est un gaz chimiquement neutre, comme l'hélium; il ne peut contracter de liaison chimique. Au cours de la plongée et de l'augmentation de pression du mélange respiratoire, la pression partielle de l'azote augmente et une quantité correspondante se dissout dans le sang, entraînant à partir d'une soixantaine de mètres des troubles physiologiques réversibles connus sous le nom de *narcose* ou *ivresse des profondeurs*. Surtout, lors de la remontée à la fin de la plongée, la sursaturation du sang peut entraîner l'apparition de microbulles d'azote dans le sang et par conséquent des risques d'embolie gazeuse qui peuvent entraîner la mort.

Un second aspect de la respiration sous pression (la *respiration hyperbare*) concerne l'oxygène. Nous savons depuis Paul Bert que la respiration nécessite une concentration minimale de 17 % d'oxygène (soit une pression partielle en surface de 170 millibars) et que ce gaz devient toxique lorsqu'il est respiré sous des pressions partielles supérieures à 1700 millibars, pour une exposition de courte durée. Lors de séjours prolongés sous pression, des troubles se manifestent pour des pressions partielles bien inférieures; les expériences récentes permettent de fixer les limites de pression partielle d'oxygène dans le mélange respiré admissibles pendant de longues durées entre 200 et 400 millibars.

Ces quelques éléments sont indispensables pour comprendre le développement récent de la plongée profonde. Pour supprimer les risques d'embolie gazeuse par l'azote à la remontée, on doit respecter une durée maximale pour une profondeur donnée. A partir du coefficient de sursaturation admissible sans dégagement gazeux dans le sang, on a pu établir des *tables de décompression* comportant des paliers ou séjours de quelques minutes à quelques heures pour des profondeurs ordinaires, au cours desquels l'organisme élimine par voie respiratoire les gaz en sursaturation dans le sang. Néanmoins, avec de l'air ordinaire, il est dangereux en pratique de dépasser la profondeur de 60 mètres compte tenu des risques de narcose inhérents à la profondeur atteinte.

Pour aller plus profondément, on a donc cherché à remplacer pour tout ou partie l'azote du mélange respiratoire par un autre gaz moins dangereux et ayant des propriétés physico-chimiques supérieures, en particulier du point de vue de l'abaissement de la densité du mélange respiratoire sous pression. Rappelons à ce sujet que l'air respiré sous une pression de 70 bars a une densité 8 fois supérieure à celle de l'air atmosphérique et entraîne un travail musculaire ventilatoire rapidement insupportable. On s'est donc orienté vers l'emploi de l'hélium, gaz neutre plus léger et plus diffusible que l'azote, et de l'hydrogène, encore plus léger que l'hélium mais dangereux à utiliser en présence d'oxygène et qui surtout n'est pas parfaitement inerte vis-à-vis des constituants biochimiques de notre organisme. Si les mélanges hydrogène-oxygène (hydrox) connaissent actuellement un regain d'intérêt, l'utilisation de l'hélium en remplacement total (mélange binaire: héliox) ou partiel (mélange ternaire: oxygène-azote-hélium) a permis à l'homme d'effectuer des travaux sous-marins importants dès 1939 (date du renflouement par la marine américaine du sous-marin Squalus perdu par 70 mètres de profondeur au large des côtes de Nouvelle-Angleterre).

### *La plongée en saturation*

La mise au point au cours des années 1960 d'une nouvelle méthode de plongée, la plongée en saturation, a permis de tirer tout

le parti possible de l'utilisation de l'hélium. En effet, quelle que soit la méthode de décompression utilisée, le temps nécessaire à la décompression est d'autant plus grand que la durée de séjour au fond et la profondeur atteinte sont grandes. La quantité de gaz dissous dans les tissus dépend en effet de ces deux facteurs, le temps passé et la pression atteinte. Mais cette quantité ne croît pas indéfiniment : dès que la saturation est atteinte, le temps nécessaire à la décompression reste constant quel que soit le temps de séjour au fond et le "rendement" de la plongée défini comme le rapport entre le temps de séjour au fond et le temps total en plongée tend vers l'unité.

Cette méthode de la plongée à saturation a conduit au développement d'une impressionnante série d'expériences d'abord menées chez l'animal puis reprises chez l'homme avec le développement d'habitats sous-marins et de systèmes de caissons de plongée installés à bord des navires.

L'utilisation de l'hélium combiné avec la méthode de plongée à saturation a enfin permis de pénétrer dans l'océan profond. Après les célèbres plongées fictives en caisson humide du Suisse KELLER à 250 mètres en 1961 et en pleine eau pendant quelques minutes à 300 mètres en 1962, l'introduction de la plongée à saturation permit des progrès rapides avec la résolution du problème de la décompression. Pour la France, rappelons quelques performances significatives :

- Janus II, 1970 : 4 plongeurs ont passé 7 jours à 250 mètres en mer, avec travail au fond;
- Physalie V, 1970 : 2 plongeurs ont passé 77 minutes à 520 mètres en caisson humide à terre;
- Sagittaire II, 1972 : 2 plongeurs ont passé 4 jours à 500 mètres en caisson à terre;
- Janus III, 1974 : 3 plongeurs ont passé 6 jours à 460 mètres en caisson humide à terre;
- Janus IV, 1977 : 6 plongeurs ont passé 6 jours à 450 mètres en mer, 1 plongeur a atteint 501 mètres;

- Entex V, 1981 : 4 plongeurs ont passé 11 jours à 450 mètres en caisson humide à terre;
- Entex IX, 1983 : 4 plongeurs ont passé 5 jours à 610 mètres en caisson humide à terre.

On le voit, profondeur, durée du séjour à cette profondeur et nombre de plongeurs constituent trois éléments complémentaires. Il importe de distinguer les plongées en caisson humide à terre, dites aussi plongées simulées, et les plongées en mer : les plongeurs doivent alors lutter contre d'autres facteurs de l'environnement, en particulier la température basse, d'autant plus redoutable que la perte de chaleur de l'organisme par la respiration est notablement accrue par l'accroissement de densité du mélange respiratoire. Le record de profondeur est actuellement détenu par une équipe américaine qui atteint en caisson sec à terre la profondeur simulée de 686 mètres.

#### *Les limites de la plongée hyperbare*

Depuis plusieurs années, la recherche en physiologie hyperbare se heurte à partir de cette gamme de profondeur à de nouveaux obstacles; les expérimentations animales sur le singe, le bouc, le chat, ont permis de préciser l'existence d'une série d'effets qui tendent à limiter aux alentours de 800 à 900 mètres les possibilités physiologiques de plongée chez les mammifères terrestres (on sait en effet par ailleurs que des mammifères comme les cachalots peuvent dépasser sensiblement le niveau 1000 mètres) :

- à partir de 300 à 400 mètres de profondeur, il apparaît fréquemment chez l'homme et l'animal soumis à une compression rapide un ensemble de désordre du comportement et des troubles divers connus sous le nom de *syndrome nerveux des hautes pressions* (SNHP) : réduction du niveau d'activité, tremblements, convulsions, crises à caractère épileptique qui constituent la forme paroxysmique du SNHP. Ce phénomène est bien distinct de la narcose aux gaz inertes et doit être rapproché des troubles que l'on constate chez des vertébrés aquatiques de zone littorale exposés à de fortes pressions (après une excitation



générale vers 500 mètres de profondeur, des contractions musculaires spontanées apparaissent ensuite et les animaux sont totalement paralysés à 2000 à 3000 mètres; les profondeurs de 4000 mètres sont rapidement létales - l'anguille est une des très rares espèces de poissons capables de vivre normalement à des profondeurs de 2000 mètres au moins). Le SNHP semble bien une conséquence des effets de la pression par elle-même.

- Une seconde limitation vient des difficultés respiratoires au-delà de pressions de l'ordre de 70 à 90 atmosphères chez l'animal, difficultés respiratoires qui ne seraient pas seulement dues à l'accroissement de densité du mélange respiratoire. On a ainsi décrit chez la chèvre entre 500 et 560 mètres de profondeur un phénomène d'atonie supprimé par accroissement de la pression partielle d'oxygène. Sous certaines conditions de densité, un mélange normoxique deviendrait, ainsi hypoxique. Par ailleurs, on soupçonne également que les troubles respiratoires proviennent aussi de perturbation du transport des gaz dans les alvéoles par convection et diffusion, sans parler des altérations de la paroi de l'alvéole pulmonaire qui se manifestent sous fortes pressions chez l'animal.

Ainsi, plusieurs effets se conjuguent pour interdire l'acclimatation des mammifères sous des pressions élevées d'hélium. En schématisant beaucoup, on peut dire que les limites d'adaptation se réduisent considérablement et un physiologiste français, IMBERT, a récemment conclu d'un ensemble d'expériences sur la chèvre que, plus la pression est augmentée, plus étroits sont les domaines de variation des conditions d'environnement, dans lesquels les acclimations restent possibles. L'organisme, dit-il, paraît atteint dans ses capacités de régulation homéostatique. L'homme parviendra peut-être à dépasser la profondeur de 700 mètres. Mais ce qui est important, c'est de souligner qu'il devra pour cela mettre en oeuvre une technologie qui se révèle de plus en plus complexe et coûteuse au fur et à mesure que la profondeur augmente pour régler finement les valeurs des principaux paramètres de son environnement : oxygénation du milieu respiratoire, température, vitesse de compression, hygrométrie du milieu, et probablement encore d'autres facteurs dont l'influence est moins connue.

On le voit, nous sommes aujourd'hui très avancés et en même temps bien loin des perspectives des années 1960. A cette époque, à partir de certaines expériences sur des souris dont les poumons étaient artificiellement emplis d'un liquide bon conducteur des gaz, le fluoro-carbone, le Commandant COUSTEAU n'hésitait pas à déclarer : "Nous irons plus profond. Une étape suivra qui sera celle de la chirurgie humaine. Pour vaincre l'obstacle à sa pénétration de l'espace et à celle des masses marines, l'homme sera modifié. On remplira les poumons d'un liquide neutre, incompressible, on inhibera les centres nerveux commandant les mouvements respiratoires; une dérivation sanguine, passant à travers une cartouche chimique, assurera directement l'oxygénation du sang et l'élimination du gaz carbonique". Cette conception que l'on eut vite fait de baptiser l'*homo aquaticus* apparaît aujourd'hui en parfaite contradiction avec les progrès récents de la physiologie hyperbare et de la technologie de la plongée profonde : ce n'est pas l'homme qui est modifié, c'est tout au contraire son environnement qui est de plus en plus précisément défini et contrôlé grâce aux progrès technologiques. Il en est de même dans l'espace, que l'on compare traditionnellement à l'océan.

### *Les performances modernes dans l'océan profond*

Le développement de la plongée profonde à saturation au-delà de 100 mètres a eu pendant un certain temps un moteur scientifique. Très rapidement, compte tenu du coût croissant des expériences de plongée profonde, l'exploitation industrielle du pétrole et du gaz naturel en mer est venue donner l'élan indispensable à la poursuite de recherches que les seules motivations militaires ne suffisaient pas à préserver. Ce n'est pas un hasard si le nom de COMEX, société française spécialisée dans le service des exploitations pétrolières en mer, est étroitement associé aux performances modernes dans l'océan profond. Le plongeur intervient après la découverte des gisements pétroliers, lors de l'installation des plates-formes fixes de forage et de la pose des pipe-lines que transportent les produits pétroliers jusqu'aux postes de chargement. Il faut vérifier qu'aucun obstacle n'existe dans les zones d'installation de structures, il faut établir

un certain nombre de connexions mécaniques et, dans certains cas, procéder à des soudures sous-marines.

Sur les champs pétroliers, tous les équipements nécessaires à la plongée profonde sont présents : ensembles de caissons de décompression, tourelles de plongée avec bras manipulateur, submersibles habités, modules de soudure en saturation, cloches de plongée servant d'abri aux plongeurs intervenant à moyenne profondeur... Seule l'industrie pétrolière est actuellement capable d'assumer le coût relativement élevé de la plongée profonde et c'est elle qui représente actuellement avec les aléas économiques conjoncturels liés à la chute simultanée du pétrole et du dollar américain, l'unique moteur économique permettant le développement de la plongée industrielle profonde. On doit toutefois noter les interventions obéissant à des mobiles de service public de plongeurs professionnels sur des épaves polluantes profondes (vidange du pétrolier Böhlen, coulé par 110 mètres de profondeur à l'ouest de la baie de Douarnenez, ou de l'avant du pétrolier Tanio, coulé par 85 mètres de fond au large de la baie de Saint-Brieuc).

Ces installations pour l'intervention humaine en grande profondeur reposent sur le maintien en surface d'un navire porteur du système de caissons modulaires où les plongeurs vivront sous pression jusqu'à la fin de la période de décompression. Or, les conditions météorologiques de surface ne permettent pas d'assurer en permanence cette indispensable présence.

De cette difficulté est né, il y a une quinzaine d'années, le concept de sous-marin porteur de maison sous la mer, inventé dès 1968 par le Commandant COUSTEAU. Ce projet, baptisé à l'époque l'Argyronète, dont la construction, entreprise en 1969, fut abandonné en 1971 faute de crédits, pour des raisons qui n'ont rien à voir avec la science et la technique. La coque résistante qui avait été réalisée a été conservée : elle est aujourd'hui réutilisée et achevée par l'IFREMER et la COMEX, en association avec des sociétés canadiennes, pour réaliser l'engin SAGA.

Le submersible pourra, dès 1987, emporter à des profondeurs de 450 à 600 mètres quatre à six plongeurs dans une installation de

plongée à saturation, couplée avec un habitacle de sous-marin classique conduit par quatre hommes d'équipage. L'autonomie d'une vingtaine de jours de ce sous-marin, véritable hybride entre le submersible classique et la tourelle de plongée profonde, lui permettra de s'affranchir des mauvaises conditions de surface et de la dépendance à l'égard d'un navire ou d'une plate-forme de surface. En outre, SAGA pourra se déplacer facilement en plongée d'un site à un autre, transportant avec lui le matériel et l'outillage nécessaires à chaque intervention. A en juger par les sous-marins canadiens de la série PISCES, qui offrent les mêmes possibilités mais ne dépassent guère la profondeur de 300 mètres avec un équipage et un nombre de plongeurs plus réduits, une telle formule est susceptible d'exploiter jusqu'à ses limites physiologiques l'intervention humaine directe dans le milieu. Enfin, SAGA peut également constituer une base autonome pour la mise en oeuvre de robots d'observation et d'intervention transportés à son bord.

### *La plongée en scaphandre rigide*

Les progrès fantastiques permis par l'emploi des mélanges héliox ont, depuis une cinquantaine d'années, fortement ralenti sinon interrompu le développement des scaphandres rigides dans lesquels l'homme respire de l'air à la pression atmosphérique. Les scaphandres rigides modernes appartiennent à deux catégories :

- les scaphandres anthropomorphiques, permettant au scaphandrier d'accomplir des mouvements variés et en particulier de se déplacer en marchant sur les fonds suffisamment durs; ces scaphandriers permettent d'atteindre 400 mètres environ;
- des engins qui sont de véritables petits sous-marins autopropulsés avec lesquels le scaphandrier fait corps; la partie supérieure articulée qui contient le tronc, la tête et les bras permet quelques mouvements, alors que la partie inférieure, rigide, contient le système de propulsion et d'éclairage. On pourrait aujourd'hui réaliser de tels engins pour atteindre des profondeurs de 1000 mètres et plus, mais les contraintes

imposées par la protection contre la pression sont telles, en comparaison des possibilités offertes aujourd'hui par la robotique, qu'il paraît préférable de simplifier les structures en renonçant à toute intervention motrice dans le milieu extérieur : on parvient ainsi au concept du sous-marin profond.

### *Les sous-marins profonds habités d'exploration et d'intervention*

Avec la première plongée de la bathysphère de BEEBE au cours de l'été 1930, au large de l'île de Nonsuch dans les Bermudes, débute l'exploration moderne des grandes profondeurs. La *bathysphère* est une sphère d'acier capable d'emmener deux personnes jusqu'à plus de 800 mètres de profondeur. La sphère est suspendue à un câble qui la relie au navire porteur. Un ensemble de câbles électriques fournit à la bathysphère l'énergie électrique nécessaire à l'éclairage et permet les communications téléphoniques entre le fond et la surface; trois hublots réalisés en quartz fondu de 15 centimètres de diamètre permettent d'observer le milieu extérieur. Dès 1930, Beebe atteint la profondeur de 890 mètres. Il rapportera de ses plongées une série d'observations remarquables sur les animaux bioluminescents, principalement des poissons et des céphalopodes, dont il décrit avec autant de lyrisme que de précision scientifique les chromatophores et les leurres de mucus luminescents qu'abandonnent derrière eux les calmars effrayés par l'intrusion de la sphère.

Il n'est cependant pas question avec cet engin plus lourd que l'eau et suspendu à un câble de s'aventurer à proximité du fond: l'amplitude de la houle, amplifiée par l'élasticité du câble porteur, provoque des mouvements verticaux à la bathysphère de quelques dizaines de mètres. Ces premiers essais sont suffisamment encourageants pour que BARTON, l'ingénieur qui avait travaillé à la conception de la bathysphère, en reprenne le principe, après la Seconde Guerre mondiale, dans un nouvel engin, le *benthoscope*, également suspendu à un câble porteur, dans lequel il atteint en 1948 la profondeur record pour des engins suspendus à partir de la surface de 1360 mètres. Cette voie sera valorisée pour ce qui concerne la reconnaissance d'épaves

ou de fonds de pêche par les tourelles d'observation construites par une société italienne, les tourelles Galeazzi, dont la profondeur limite varie entre 150 et 250 mètres.

*Du bathyscaphe...*

Quelques années après les premières plongées de la bathysphère de Beebe, le physicien PICCARD, à partir de son expérience des nacelles utilisées pour l'exploration de la stratosphère, imagine en 1939 le premier sous-marin profond autonome habité, qu'il baptise le *bathyscaphe*. Les travaux de construction du prototype, interrompus pendant la Seconde Guerre mondiale, reprennent en 1946 et aboutissent à une campagne d'essais menée au large de Dakar en 1948 avec le concours de la marine française : le principe général du bathyscaphe est confirmé, mais de nombreux équipements révèlent des défaillances techniques plus ou moins graves, sans parler de certaines conceptions telles que le fait que l'entrée des plongeurs dans la sphère résistante ne peut se faire lorsque l'engin est à l'eau. Au cours de la première plongée de cet engin, PICCARD et le biologiste français MONOD qui l'accompagnait passeront plus de 25 heures enfermés dans la sphère pour atteindre la profondeur de ... 25 mètres ! Le premier bathyscaphe, baptisé F.N.R.S. II, effectue cependant quelques jours plus tard une plongée à vide jusqu'à 1380 mètres de profondeur, confirmant la validité du principe général.

Le bathyscaphe comporte une sphère résistante réalisée en acier spécial, beaucoup plus lourde que l'eau et un flotteur rempli d'essence ultralégère, jouant le même rôle que l'enveloppe gonflée d'hélium ou d'hydrogène de l'engin conçu pour l'exploration de la stratosphère. Comme l'essence se contracte sous l'effet de la baisse de température et de l'augmentation de la pression (bien entendu, le flotteur, constitué de tôles légères, communique à sa partie inférieure avec l'eau de mer; ainsi, l'essence est en équilibre hydrostatique), il faut emporter une quantité considérable de lest sous forme de graille de fer maintenue dans des silos verticaux par une vanne électromagnétique.

Après ces premiers essais, un nouvel engin fut réalisé à partir de la sphère modifiée du F.N.R.S. II. Ce second bathyscaphe, le F.N.R.S. III, effectue ses premières plongées en 1953 et atteint en février 1954 la profondeur record de 4050 mètres. Quelques années plus tard, la France met en chantier un troisième bathyscaphe, l'Archimède, conçu pour atteindre les plus grandes profondeurs de l'océan. Lancé en 1961, l'Archimède atteint la profondeur record de 9500 mètres dans la fosse des Kouriles, au nord-est du Japon, en juillet 1962. Deux ans auparavant un autre bathyscaphe conçu par Piccard, le Trieste, construit par un chantier italien et achevé après un profond remaniement par la marine américaine, avait atteint la profondeur de 10 920 mètres dans la fosse des Mariannes, dans le Pacifique. Du point de vue technique, ces deux plongées seraient comparables si le Trieste n'avait subi au cours de sa plongée des avaries suffisamment graves pour qu'il fût ensuite limité à la profondeur maximale de 4000 mètres environ.

Les deux bathyscaphes français ont effectué de 1954 à 1974 plusieurs centaines de plongées, pour la plupart à caractère scientifique. Il revint néanmoins à l'Archimède, au début des années 1970, de rechercher et de localiser avec succès grâce à un équipement de sonar panoramique l'épave du sous-marin français Eurydice perdu corps et biens au large de Toulon le 4 mars 1970 par des fonds de 1000 à 1200 mètres.

*...aux nouveaux sous-marins plus légers et plus maniables*

Les bathyscaphes restent des engins lourds, assez peu maniables et d'utilisation coûteuse. A partir de 1960 environ, une nouvelle génération de sous-marins profonds d'intervention plus légers et plus maniables a vu progressivement le jour. En France, le premier d'entre eux est la soucoupe SP 300 du Commandant Cousteau, dont la forme ellipsoïdale de la coque résistante limite la profondeur d'utilisation à 300 mètres (les bathyscaphes, pour des raisons simples de résistance à la pression, avaient des coques résistantes parfaitement sphériques limitant les contraintes exercées par la pression hydrostatique à une contraction d'ensemble).

Le développement de ces nouveaux sous-marins est marqué aux Etats-Unis par la mise en service de l'Alvin, qui parvint à récupérer avec succès une bombe atomique non armée tombée en mer à la suite d'un accident par 600 mètres de fond sur les côtes espagnoles de Méditerranée, au large de Palomares en 1969. Le même Alvin a d'ailleurs coulé quelques années après à la suite d'une fausse manoeuvre à la prise de plongée par 1600 mètres de profondeur au large de la Nouvelle Angleterre : dix mois plus tard, un autre sous-marin américain, l'Aluminaut, est parvenu à le retrouver et à fixer un câble qui a permis de le récupérer. En France, le sous-marin Cyana, capable d'atteindre la profondeur de 3000 mètres, est mis en service au début des années 1970.

Deux développements technologiques majeurs ont permis la construction de ces sous-marins légers, ne dépassant pas une dizaine de tonnes :

- l'apparition de matériaux de flottabilité nouveaux, les *mousses syntactiques*, constituées de microsphères de verre creuses, qui peuvent être usinés et mis en forme; leur densité ne varie pratiquement pas sous l'influence de la température et de la pression, dans les limites rencontrées au cours des plongées profondes;
- l'utilisation du titane pour la fabrication de la sphère résistante, métal dont la résistance à la pression et l'élasticité permettent un gain de poids significatif par rapport aux aciers spéciaux utilisés pour la fabrication de la sphère des bathyscaphes.

D'autres améliorations techniques, telles que les nouvelles sources d'énergie (moteur Stirling, miniréacteurs nucléaires, piles à combustible) ou de nouveaux matériaux de flottabilité capables d'affronter les pressions les plus élevées des océans, devraient permettre de nouveaux progrès. A l'heure actuelle, on doit souligner que le seul engin capable d'emmener des hommes à 10 kilomètres de profondeur reste le bathyscaphe Archimède, qui est malheureusement désarmé depuis près d'une dizaine d'années. La France et les Etats-Unis viennent à peu



près simultanément de mettre en service deux sous-marins capables d'atteindre 6000 mètres de profondeur, le Sea Cliff et le Nautile, et le Japon annonce pour la fin de la décennie la mise en service d'un engin capable d'atteindre... 6600 mètres. Le Nautile s'est illustré au cours de sa première campagne en été 1985 dans le système de fosses de subduction situées à l'ouest du Japon. Les problèmes de navigation et de communication avec la surface ont été résolus : le Nautile par exemple dispose d'un premier système de navigation lui permettant de se déplacer au milieu d'un champ de balises acoustiques posées sur le fond dans le cadre duquel le navire de surface localise le sous-marin et d'un second qui permet au submersible d'entretenir lui-même son estime à partir du cap et de la vitesse (centrale inertielle). Enfin, ces engins disposent d'une capacité de manipulation que n'avaient pas les bathyscaphes : un ou deux bras à commande hydraulique et à plusieurs degrés de liberté, terminés par des systèmes de préhension adaptés aux objets que l'on désire manipuler, confèrent à ces sous-marins des possibilités d'intervention légères mais réelles.

Tous ces sous-marins restent des engins liés à la surface, dont l'autonomie ne dépasse pas une dizaine d'heures en ce qui concerne l'énergie électrique et 3 ou 4 jours en ce qui concerne les réserves en oxygène nécessaire à la respiration : d'où l'intérêt d'un projet de coopération entre la France et les Etats-Unis pour l'intervention réciproque des sous-marins profonds de l'un et l'autre pays en cas d'impossibilité de remonter (blocage dans une faille, sous un surplomb, non-largage du lest de sécurité, enfouissement sous une avalanche de sédiments gorgés d'eau sur les fortes pentes).

Pour l'essentiel, ces sous-marins sont utilisés pour des programmes de recherche scientifique, et c'est à eux que l'on doit les surprenantes découvertes faites depuis moins de dix ans à l'axe des dorsales médio-océaniques (phénomènes hydrothermaux actifs, avec rejets de fluides à très haute température et communautés animales et microbiennes, dont l'existence repose sur une chimio-synthèse bactérienne intense). Ils sont cependant utilisés de manière occasionnelle pour la reconnaissance détaillée des fonds (par exemple en vue de poser des gazoducs sous-marins en grande profondeur) et plus souvent pour la recherche d'objets et d'épaves (engins balistiques aériens et tor-

pilles, épaves d'avions et d'hélicoptères, etc). Jusqu'à présent, ce type d'activité n'est absolument pas suffisant pour assurer un plein emploi de ces sous-marins. Seule, la motivation scientifique apporte actuellement une pleine justification de leur développement.

### *L'intervention sous-marine télécommandée*

On assiste depuis le début des années 1960 au développement d'une large panoplie d'engins télécommandés munis au moins d'une caméra de télévision et de moteurs de propulsion, parfois de télémanipulateurs, capables d'atteindre des profondeurs de quelques centaines à quelques milliers de mètres, développement qui répond au souci des industriels de ne pas avoir à recourir de manière fréquente aux plongeurs spécialisés : ces engins peuvent intervenir sur des objets volontairement ou accidentellement immergés et dont la position est connue avec précision. Ils sont reliés par un câble ombilical à la plateforme de commande, à laquelle ils transmettent en permanence images et autres informations et dont ils reçoivent énergie et instructions.

On peut de façon schématique distinguer deux catégories d'engins industriels :

- les uns à liaison par câble et à flottabilité nulle sont de véritables petits sous-marins inhabités dont le poids dans l'air varie entre quelques centaines de kilos et quelques tonnes. Ils disposent d'une caméra de télévision et d'un dispositif de positionnement adapté, auxquels s'ajoute parfois un bras de préhension simple;
- les autres, travaillant sur le fond, sont des engins plus lourds, dont le poids varie entre quelques dizaines et quelques centaines de tonnes. Dans cette catégorie se placent les machines à ensouiller les câbles sous-marins et les oléoducs desservant les champs pétroliers en mer, pour les mettre hors d'atteinte des engins de pêche remorqués sur le fond. On trouve également parmi eux des robots spécialisés comme le robot Tim développé en France pour l'intervention sur un puits sous-marin pétro-

lier par petite profondeur. Ces engins peuvent se déplacer sur le fond sur des chenilles ou des vis d'Archimède et disposent d'une puissance importante.

Il faut souligner que les engins légers peuvent être mis en oeuvre à partir d'un sous-marin profond : des solutions de ce type sont envisagées pour l'exploration de certaines épaves.

A côté de ces engins télécommandés avec liaison par câble et adaptés à des fonctions industrielles précises, il existe quelques engins destinés à la recherche scientifique ou à l'exploration systématique :

- Les uns sont des engins remorqués par un navire qui peut leur fournir l'énergie nécessaire et enregistrer les informations reçues par le système remorqué : le poids de ces équipements peut dépasser une tonne. Ils sont capables de travailler jusqu'à 6000 mètres de profondeur. Ils fournissent des images, accompagnées d'un certain nombre de paramètres physiques et chimiques caractérisant le milieu. Certains de ces engins sont des sonars permettant d'obtenir une représentation du relief sur des surfaces importantes, complétant les informations fournies par les sondeurs portés par les navires océanographiques. Parfois remorqués à plusieurs kilomètres de la surface à une vitesse de 5 à 6 noeuds et à quelques dizaines de mètres d'altitude au-dessus du fond, ces engins possèdent un dispositif de contrôle d'altitude et un détecteur d'obstacles. C'est en utilisant un sonar remorqué à une soixantaine de mètres au-dessus du fond qu'a été reconnue au cours de l'été 1985 la zone où repose l'épave du célèbre paquebot Titanic, dans l'Atlantique Nord Ouest.
- Enfin, il existe actuellement un engin télécommandé sans câble capable de plonger jusqu'à 6000 mètres de fond et d'y effectuer des trajets d'une dizaine de milles de longueur en photographiant systématiquement le fond. Cet engin, dénommé Epaulard, a une autonomie d'une dizaine d'heures. L'information obtenue n'est pas disponible en temps réel, s'agissant de photographies classiques. Des équipements de télévision sont possibles, mais

se heurtent encore au compromis classique en la matière de qualité-quantité : pour obtenir des images à cadence rapprochée, les contraintes de transmission par ultrasons conduisent à un signal de qualité médiocre; il faut accepter des cadences lentes pour conserver une qualité satisfaisante aux images reçues. Il ne fait guère de doute que de tels engins, parfaitement autonomes, sont appelés à se développer pour des applications industrielles (reconnaissance du fond, visualisation et exploration d'objets) à condition que l'on parvienne à résoudre la question des sources d'énergie. Les batteries d'accumulateurs encore utilisées actuellement ont un poids prohibitif.

### *Le rôle prépondérant de l'Homme dans l'océan profond*

Les trois modes d'intervention de l'homme sous la mer existant de nos jours ne sont pas concurrents, mais répondent à des besoins complémentaires. En dehors des aspects scientifiques, pour lesquels le cerveau et l'oeil humain ne sont pas prêts d'être remplacés par des robots, tant nos connaissances sur l'océan profond sont aujourd'hui encore rudimentaires, le plongeur en scaphandre souple ou en tourelle, demain à bord d'un sous-marin comme Saga, peut accomplir des tâches indispensables du point de vue sécurité et des travaux délicats et peu fréquents pour lesquels le développement de robots hautement spécialisés n'est pas toujours économiquement justifié. Les engins télécommandés peuvent de leur côté remplir toute une série de fonctions relativement simples et répétitives. Aujourd'hui, plongeurs et engins télécommandés s'aventurent aux mêmes profondeurs, jusqu'à 250 mètres environ. Il n'est pas impossible que les nouveaux matériaux permettent le développement de véritables hybrides entre le sous-marin à la pression atmosphérique et le scaphandre articulé, capables d'atteindre 1000 mètres et plus.

Ici comme ailleurs, au fond des océans comme dans l'espace, l'homme reste et restera irremplaçable. S'il ne peut plus s'adapter au-delà d'une certaine profondeur aux conditions ambiantes, il saura recréer autour de lui l'environnement qui lui convient pour tirer le meilleur parti de ses qualités intellectuelles et physiques. Ce que nous savons aujourd'hui des limites de la plongée hyperbare suggère

que, jusqu'à 500 mètres au moins et lorsque les motivations industrielles et économiques seront assez fortes, l'homme interviendra en plongée et utilisera des machines de plus en plus perfectionnées pour effectuer des tâches "intelligentes"; si le théâtre de l'aventure industrielle dans l'océan profond se déplace plus profondément, l'homme devra intervenir à partir d'enceintes à la pression atmosphérique, en commandant le travail de télémanipulateurs complexes ou en guidant les évolutions d'engins d'observation, chaque fois que les opérations à effectuer seront plus délicates et plus aléatoires. Inversement, pour des interventions relativement simples et à caractère répétitif telles que l'ensouillement des câbles ou des oéloducts posés sur le fond, l'homme devra continuer à céder le pas devant la machine. Fondamentalement, il est vraisemblable qu'il faudra d'impérieuses raisons pour chercher à permettre à l'intelligence humaine de s'exercer à plusieurs milliers de mètres de profondeur pendant des durées significatives à des activités industrielles. Les critères techniques et économiques, au-delà des aspects scientifiques, fourniront la réponse à cette interrogation.

**Lucien LAUBIER**  
**HAUT-CONSEILLER SCIENTIFIQUE DE L'IFREMER**  
**PROFESSEUR A L'INSTITUT OCÉANOGRAPHIQUE**